

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN ÇERÇEVE SİSTEM
İÇERİSİNDE HİSTERETİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

Hüseyin SÖĞÜT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

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

**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN ÇERÇEVE SİSTEM
İÇERİSİNDE HİSTERETİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

**Hüseyin SÖĞÜT
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
(BAP) tarafından FBA-2014-79 nolu proje ile desteklenmiştir.**

TEMMUZ 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRALARIN ÇERÇEVE SİSTEM
İÇERİSİNDE HİSTERETİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Hüseyin SÖĞÜT
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 02/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK (Danışman)

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Dr. Öğr. Üyesi Barış ERDİL



ÖZET

BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRALARIN ÇERÇEVE SİSTEM İÇERİSİNDE HİSTERETİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Hüseyin SÖĞÜT

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Temmuz 2019; 59 Sayfa

Yapılara yanal kuvvetlerin (deprem,rüzgar) etki etmesi durumunda, çelik çapraz (ÇÇ) elemanlar aksenal çekme kuvveti etkisi altında plastikleşmekte ve aksenal basınç kuvveti altında ise burkularak aksenal basınç kapasitelerinin büyük bir kısmını kaybetmektedirler. Bu kapasite düşmesi nedeniyle yapıların yatay yük taşıma ve enerji sönmleme kapasitesi ile yatay rijitliği önemli derecede azalmaktadır. Bu durum ise yapıların deprem ve rüzgâr gibi yatay yükler altında ağır hasar almasına veya göçmesine sebep olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı aksenal basınç etkisi altında burkulmayan ve simetrik histeretik davranışa sahip burkulması engellenmiş çelik çapraz (BEÇÇ) olarak adlandırılan elemanlar son yıllarda ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur. BEÇÇ'ler çekirdek eleman (ÇE) ve ÇE'nin burkulmasını engelleyen mekanizma (BEM) olmak üzere iki bölümden meydana gelmektedir.

Bu çalışmada, enkesit alanları farklı ÇE'lere ve 2 farklı ek BEM tipine sahip 3 adet BEÇÇ elemanın çerçeve sistem içerisindeki histeretik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. BEÇÇ'li çerçeveler ters çevrimli statik yatay yükleme altında test edilmiştir. Bu sayede BEÇÇ'lere çerçeve elemanlarından kaynaklı ek dönme talepleri uygulanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, BEÇÇ'lerin lokal ve global hasara uğramadığı görülmüştür. Her iki BEM sisteminin BEÇÇ'lerin aksenal basınç etkisi altında ÇE'ye yeterli stabilite sağladığı görülmüştür. Ayrıca deneysel çalışma sırasında BEÇÇ ile çerçeve bağlantısı ve çerçeve sistemin davranışı detaylı olarak incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Burkulması engellenmiş çelik çapraz, Çaprazlı çerçeve sistem, Çelik çapraz, Çelik yapılar, Deneysel çalışma, kayma esaslı birleşim

JÜRİ: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Dr. Öğr. Üyesi Barış ERDİL

ABSTRACT

DETERMINATION OF HYSTERETIC BEHAVIOR OF BUCKLING RESTRAINED BRACES IN FRAME SYSTEM

Hüseyin SÖĞÜT

Msc Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ramazan ÖZÇELİK

July 2019; 59 Pages

If the lateral forces induced by earthquakes or winds affect to the structures, the steel brace members yields under the effect of axial tensile demands. On the other hands, the steel braces buckle due to axial compression demands and then their axial capacity decreases significantly. The lateral load and energy dissipation capacity in addition to lateral stiffness of braced structures suffer from buckling of the brace members significantly. Due to buckling of the brace members, the unstable hysteretic behavior of the structures results in severe damages or collapse. For this reasons, the buckling restrained braces (BRBs) has become as an attractive research topic for researchers in recent years. The BRBs have mainly two parts namely casing member and core plate. The casing member provides stability to the core plate when the BRBs are under compression demands.

In this study, three BRBs with different cross-sectional areas of core plates and different types of end restrainers for the casing member have been examined experimentally. The BRB braced frames were tested under the reversed cyclic static loading technique. The hysteretic behavior of BRB braced frame was observed during the tests. As a result of experimental study, the local and global damage was not observed on the BRBs. Furthermore, during the experimental study, the connection between the BRBs and frame member were investigated in detail.

KEYWORDS: Buckling restrained brace, Braced frame system, Experimental study, Slip critical connection, Steel brace, Steel structures

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Assist. Prof. Dr. Barış ERDİL

ÖNSÖZ

Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FBA-2014-79 nolu proje ile desteklenmiştir.

FBA-2014-79 projesinde ve yüksek lisans tezi kapsamında Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz'ların (BEÇÇ'lerin) çerçeve sistemi içerisinde ters çevirimli deney yöntemi ile testleri yapılmıştır. Araştırmaya konu olan BEÇÇ'lerin üretiminde iki farklı Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM) kullanılmıştır. BEÇÇ'lerin çerçeve sistemi içerisinde çerçeve elemanlardan kaynaklı uç dönme talepleri etkisi altında histeretik davranışları bu tez kapsamında detaylı olarak ele alınmıştır. Ayrıca BEÇÇ ve çerçeve elemanlara bağlantı için kullanılan ve sürtünmeye dayalı tasarımın da BEÇÇ'li sistemin histeretik davranışına etkisi ortaya konulmuştur. Elde edilen deneysel çalışma sonucunda iki farklı BEM'e sahip BEÇÇ'nin yeterli histeretik davranışa sahip olduğu görülmüştür.

Tez konunun belirlenmesinde, araştırılmasında ve oluşumunda desteğinden dolayı danışman hocam sayın Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK'e, deneysel çalışmalarında yardımlarından dolayı bursiyer yüksek lisans öğrencisi Mücahit ÇAM'a, Pak Metal ailesine ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çelik Çaprazlar.....	1
1.2. Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar.....	2
1.2.1. BEÇÇ'nin Bileşenleri.....	3
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	5
2. KAYNAK TARAMASI.....	6
3. MATERYAL VE METOT.....	15
3.1. BEÇÇ'lerin Ön Tasarımı ve Detayları.....	15
3.1.1. BEÇÇ'lerin ön tasarımı.....	15
3.1.2. Deney elemanlarının detayları.....	16
3.2. Çerçeve Sistemin Ön Tasarımı ve Detayları.....	21
3.2.1. Çerçeve sistemin ön tasarımı.....	21
3.2.2. Çerçeve sistemin detayları.....	28
3.3. Yükleme Protokolü ve LVDT Yerleşimi.....	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	32
4.1. Boş Çerçeve Deney Sonuçları.....	32
4.2. 1. BEÇÇ'li Çerçeve Deney Sonuçları.....	34

4.3. 2. BEÇÇ'li Çerçeve Deney Sonuçları.....	36
4.4. 3. BEÇÇ'li Çerçeve Deney Sonuçları.....	39
5. SONUÇLAR.....	43
6. KAYNAKLAR	45
7. EKLER.....	47
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Çerçeve Sistem İçerisinde Histeretik Davranışının Belirlenmesi” adlı çalışmanın akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğumu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

02/07/2019

Hüseyin SÖĞÜT



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- Δ_i : kat ötelemesi
A : enkesit alanı
 $A_{\text{ÇE}}$: çekirdek elemanın enkesit alanı
b : çelik elemanın genişliği
cm : santimetre
 d_i : i'inci kattaki yatay yer değiştirme
 d_{i-1} : i-1'inci kattaki yatay yer değiştirme
E : elastite modülü
 F_{cr} : kritik burkulma gerilmesi
 F_e : elastik burkulma gerilmesi
 f_y : akma dayanımı
 h_i : kat yüksekliği
I : atalet momenti
i : atalet yarıçapı
K : burkulma boyu katsıyısı
L : eleman boyu
m : metre
mm : milimetre
 P_n : basınç dayanımı
sn : saniye
t : çelik elemanın aklınliğı
 t_f : başlık kalınliğı
 t_w : gövde kalınliğı
 λ : yerel burkulma narinlik değeri

λ_r : kompakt olamayan eleman için sınır narinlik
Ondalık ayırıcı olarak nokta kullanılmıştır.

Kısaltmalar

AISC : American Institute of Steel Construction

BEÇÇ : Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz

BEM : Burkulmayı Engelleyen Mekanizma

ÇÇ : Çelik Çapraz

ÇYTHYİY : Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği

LVDT : Linear Variable Differential Transformer

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. a)Çelik çaprazlı çerçeve; b) Çelik çaprazın histeretik davranışı	2
Şekil 1.2. BEÇÇ'nin histeretik davranışı.....	2
Şekil 1.3. Karakteristik BEÇÇ eleman detayı.....	4
Şekil 2.1. BEM'in dışında kalan ÇE kısmı	6
Şekil 2.2. a) Test düzeneği; b) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı; c) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı; d) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı; e) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı	7
Şekil 2.3. a) Deney düzeneği; b) BEÇÇ'lerin histeretik davranışları (Merritt vd. 2003) .	8
Şekil 2.4. a) Test düzeneği; b) BEM'in deney öncesi ve deney sırasındaki pozisyonu; c) Kiriş-kolon-bayrak levhası birleşiminde meydana gelen deformasyonlar; d) ÇE'de meydana gelen plastik mafsalsal; e) Referans test sonucuna göre BEÇÇ'in histeretik davranışı; f) Deney sonunda BEM'in zemin ile teması (Christopoulos 2005).....	9
Şekil 2.5. a) 1. teste ait deney düzeneği; b) 2. ve 3. teste ait deney düzeneği; c) 1. teste ait BEÇÇ'in histeretik davranışı; d) 1. test sonucunda kolon-kiriş birleşiminde ve bayrak levhasında meydana gelen akma; 2. test sonucunda üst bayrak levhasında meydana gelen burkulma; f) 2. teste ait BEÇÇ'in histeretik davranışı; g) 3. test sonucunda kolon alt başlığı kaynağında meydana gelen kırılma ve kiriş bayrak levhası birleşiminde meydana gelen kopma; h) 3. teste ait BEÇÇ'in histeretik davranışı (Aiken vd. 2002)	10
Şekil 2.6. a) Test çerçevesi; b) Bağlantı detayı (Fahnestock vd. 2007).....	11
Şekil 2.7. a) Test çerçevesi; b-h) Yapılan testlerde meydana gelen deformasyonlar (Tsai vd. 2008)	12
Şekil 2.8. a) Deney düzeneği; b) BEÇÇ elemana ait enkesit detayı; c) BEÇÇ'lerin histeretik davranışları (Judd vd. (2016)).	13
Şekil 2.9. a) BEÇÇ elemana ait enkesit detayı; b) 1 mm kauçuk malzeme kullanılan BEÇÇ elemanın histeretik davranışı; c) 1 mm hava boşluğu kullanılan BEÇÇ elemanın histeretik davranışı (Chen vd. (2016)).	14
Şekil 3.1. 1.BEÇÇ elemanına ait detay çizimleri.....	18
Şekil 3.2. 1.BEÇÇ elemanın üretim aşamaları	18
Şekil 3.3. 2.BEÇÇ elemanına ait detay çizimleri.....	19

Şekil 3.4. 2.BEÇÇ elemanın üretim aşamaları	20
Şekil 3.5. 3.BEÇÇ elemanına ait detay çizimleri.....	20
Şekil 3.6. 3.BEÇÇ elemanın üretim aşamaları	21
Şekil 3.7. Deney düzeneğine ait detay çizimi	22
Şekil 3.8. Çerçeve sistemde diyafram tanımlanan noktalar	22
Şekil 3.9. Çerçeve sisteme ait noral kuvvet ve kesme kuvveti diyagramları.....	23
Şekil 3.10. Düzgün Kuvvet Yöntemi (Christopulos 2005'den adapte edilmiştir).....	24
Şekil 3.11. Bayrak levhasına ait detay çizimi	25
Şekil 3.12. Thornton Yöntemi (Christopulos 2005'den adapte edilmiştir)	25
Şekil 3.13. Düzgün kuvvet yöntemine göre bayrak-kiriş-kolon birleşimine etki eden kuvvetler. (Christopulos 2005'den adapte edilmiştir).....	26
Şekil 3.14. a) Bayrak-kiriş-kolon birleşim bölgesi; b) Kiriş-kolon birleşim bölgesi.....	27
Şekil 3.15. Yükleme Çerçevesi	28
Şekil 3.16. a) Mesnet plakasının enkesiti; b) Mafsalsal sistem.....	29
Şekil 3.17. a) Çerçeve sistem; b) Düzlem dışı hareketi önleyen mekanizma; c) Deney düzeneği	29
Şekil 3.18. LVDT'lerin yerleşimine ait detay çizimi.....	31
Şekil 4.1. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görelî kat ötelemesi grafiği	32
Şekil 4.2. Çerçeve sistemin düzlem dışı hareketine ait deplasman-zaman grafiği	33
Şekil 4.3. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği.....	33
Şekil 4.4. 1.BEÇÇ elemana ait yatay kuvvet-birim şekil değiştirme grafiği.....	34
Şekil 4.5. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görelî kat ötelemesi grafiği	35
Şekil 4.6. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği.....	35
Şekil 4.7. Bağlantı plakalarına ait deplasman-zaman grafiği	36
Şekil 4.8. Deney sonrası 1.BEÇÇ elemanda meydana gelen deformasyonlar	36
Şekil 4.9. 2.BEÇÇ elemana ait yatay kuvvet-birim şekil değiştirme grafiği.....	37

Şekil 4.10. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görelî kat ötelemesi grafiği	37
Şekil 4.11. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği	38
Şekil 4.12. Bağlantı plakalarına ait deplasman-zaman grafiği	38
Şekil 4.13. Deney sonrası 2.BEÇÇ elemanda meydana gelen deformasyonlar.....	39
Şekil 4.14. 3.BEÇÇ elemana ait yatay kuvvet-birim şekil değiştirme grafiği.....	40
Şekil 4.15. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görelî kat ötelemesi grafiği	40
Şekil 4.16. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği	41
Şekil 4.17. Bağlantı plakalarına ait deplasman-zaman grafiği	41
Şekil 4.18. Deney sonrası çerçeve sistemde meydana gelen hasarlar.....	42
Şekil 4.19. Deney sonrası 3.BEÇÇ elemanda meydana gelen deformasyonlar.....	42
Şekil 7.1 Kiriş ve kolon elemanlarına ait enkesit detayı.....	47
Şekil 7.2. Düzgün Kuvvet Yöntemi (Christopulos 2005'den adapte edilmiştir).....	50
Şekil 7.3. Bayrak levhasına ait detay çizimi	51
Şekil 7.4. Thornton Yöntemi (Christopulos 2005'den adapte edilmiştir)	51
Şekil 7.5. Thornton yönteminde kullanılacak parametre değerleri.....	52
Şekil 7.6. Düzgün kuvvet yöntemine göre bayrak-kiriş-kolon birleşimine etki eden kuvvetler. (Christopulos 2005'den adapte edilmiştir).....	53
Şekil 7.7. Birleşim bölgesine ait detay çizimi	56
Şekil 7.8 Birleşim plakasına ait detay çizimi ve etki eden kuvvetler	58
Şekil 7.9. Birleşim plakasında oluşabilecek en elverişsiz blok kırılma durumu	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deney elemanlarına ait parametreler	17
Çizelge 3.2. Giriş ve kolon elemanların enkesit özellikleri	23
Çizelge 3.3. Yükleme protokolü	30

1. GİRİŞ

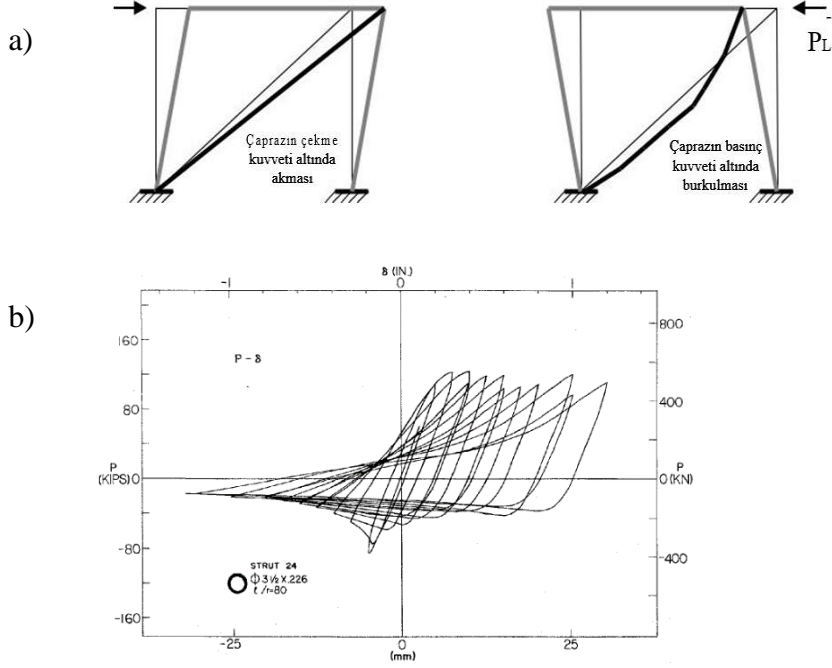
Ülkemizin hemen hemen tüm bölgeleri deprem riski taşımaktadır. Bu yüzden yapıları depreme karşı dayanıklı tasarlamak ve yapılan tasarımın sahaya uygulanması hayati öneme sahiptir.

Güncel deprem yönetmeliklerine bakıldığında sünek tasarımın ön planda tutulduğu görülmektedir. Bu nedenle yapıların deprem enerjisini sönmüleyebilecek kadar sünek olmaları istenmektedir. Böylelikle yapı deprem enerjisini sönmüleyecek ve şiddetli depremlerde dahi yapı kalıcı hasarlar (plastik şekil değiştirmeler) görerek deprem enerjisinin sönmülenmesi sağlanacaktır.

Bir yapı güçlü zemin hareketleri ve rüzgâr gibi yanal kuvvetlere maruz kalırken, yapıdaki taşıyıcı çerçeve sistemlerde büyük yanal deformasyonlar meydana gelir. Bu deformasyonlar aşırı ise yapısal bütünlükten ödün vermeden yapısal ve yapısal olmayan hasarlar meydana gelebilir. Bu deformasyonları önlemek için taşıyıcı çerçeve sistemlerde çeşitli elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanlardan bir tanesi de çelik çapraz elemanlardır.

1.1. Çelik Çaprazlar

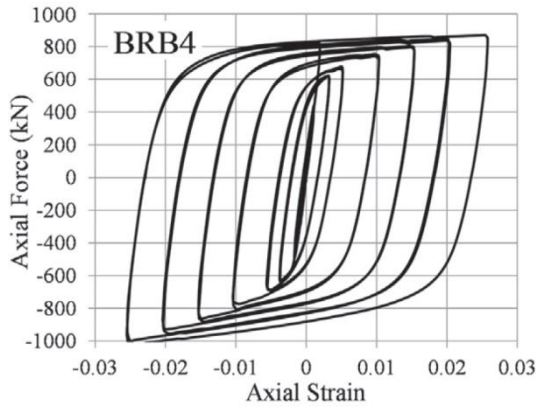
Geleneksel çelik çaprazlar yapılara etkiyen yanal yüklerin taşınmasında kullanılan ve eksenel yük taşıyan elemanlardır. Geleneksel çelik çaprazların tasarımı sırasında karşılaşılan en önemli problemlerden bir tanesi çekme ve basınç kapasitelerinin eşit olmamasıdır. Şekil 1.1.a'da çelik çaprazlı çerçeveye yatay kuvvet uygulandığı zaman, çelik çaprazın (ÇÇ) eksenel çekme etkisi altında plastikleştiği, eksenel basınç etkisi altında ise burkulduğu görülmektedir. Şekil 1.b'de ise ÇÇ elemanın tekrarlı yükler altında histeretik davranışı görülmektedir. Bu şekilde de ÇÇ'nin eksenel çekme etkisi altında plastikleştiği, eksenel basınç altında ise burkulduğu görülmektedir. ÇÇ'nin burkulmasından sonra kapasinde büyük ölçüde azalma meydana gelmektedir. ÇÇ elemanın burkulması nedeniyle çerçeve sistemlerde; yatay rijitlik kaybı, çerçeve stabilitesinin belirgin ölçüde azalması, taşıyıcı elemanlarda hasarların meydana gelmesi, yapısal göçmenin ortaya çıkması gibi sorunlar oluşabilir. Bu sebeplerden dolayı eksenel basınç etkisi altında burkulmayan ve simetrik histeretik davranışa sahip burkulması engellenmiş çelik çapraz (BEÇÇ) olarak adlandırılan elemanlar son yıllarda ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur.



Şekil 1.1. a) Çelik çaprazlı çerçeve (Özçelik 2016); b) Çelik çaprazın histeretik davranışı (Black vd. 1980)

1.2. Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar

BEÇÇ'ler genel olarak çekirdek eleman (ÇE), çekirdek elemanı saran burkulmayı engelleyen mekanizmadan (BEM) ve ÇE ve BEM arasındaki sürtünmeyi önleyen ayırıcı yüzeyden oluşmaktadır. ÇE aksenal kuvveti taşımakta ve BEM'in aksenal yük taşıma özelliği yoktur. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi BEM aksenal basınç etkisi altında ÇE'nin burkulmasını engelleyerek aksenal çekme durumundaki gibi davranmasını sağlayarak BEÇÇ'in simetrik histeretik davranış göstermesini sağlar.



Şekil 1.2. BEÇÇ'nin histeretik davranışı (Özçelik vd. 2017)

1.2.1. BEÇÇ'nin bileşenleri

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi karakteristik bir BEÇÇ eleman beş kısımdan oluşmaktadır:

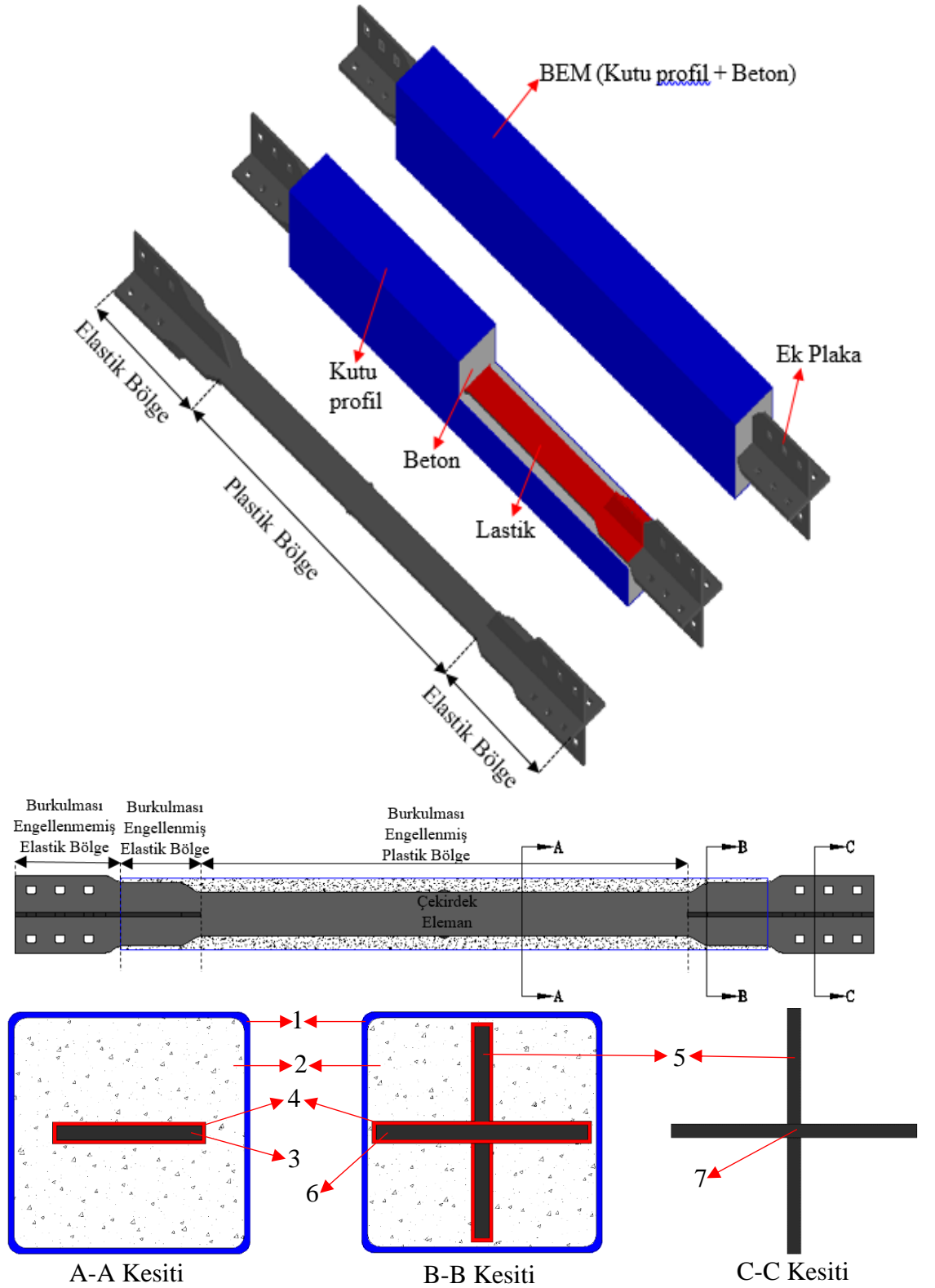
a) Burkulması Engellenmiş Plastik Bölge: Şekil 1.3'de görüldüğü gibi en kesit alanının en küçük olduğu bölgedir. Bu yüzden plastik şekil değiştirmelerin bu bölge olması beklenir. Bu bölgede süneklik kapasitesi yüksek ve sünek çelik malzeme kullanılmalıdır.

b) Burkulması Engellenmiş Elastik Bölge: Bu bölgenin elastik sınırlar içinde kalması için en kesit alanı burkulması engellenmiş plastik bölgenin en kesit alanından büyük tutulmalıdır. Burkulması engellenmiş plastik bölgeyle birleştiği kısımlarda gerilme yığılmalarının meydana gelmemesi için kesiti istavroz şeklinde yapılmalıdır (Şekil 1.3).

c) Burkulması Engellenmemiş Elastik Bölge: BEÇÇ'nin çerçeveye bağlandığı bölgedir. Burkulması engellenmiş elastik bölgenin bir uzantısıdır. Bu bölgenin de elastik sınırlar içinde kalması istendiğinden dolayı burkulması engellenmiş plastik bölgenin en kesit alanından büyük ve kararlı bir davranış göstermesi için bu bölgenin uzunluğu kısa tutulmalıdır. Uygulama sırasında montajını kolaylaştırmak için bulonlu, mafsallı veya kaynaklı birleşim olacak şekilde farklı tiplerde olabilir (Şekil 1.3).

d) Burkulmayı Engelleyen Mekanizma: Burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) ÇE'nin burkulmasını engelleyerek yeterli stabilite sağlamalıdır. Bu kısım için birçok araştırmacı farklı teknikler kullanmıştır. Şekil 1.3'de görüldüğü gibi karakteristik bir BEÇÇ eleman detayı gösterilmiş olup, BEM: çelik kutu profil ve bu kutu profilin içine beton veya beton harcı doldurularak meydana getirilmiştir.

e) Boşluk veya Yalıtım Malzemesi: ÇE ile BEM arasında sürtünmeye bağlı gerilme geçişlerinin meydana gelmemesi için ÇE ile BEM arasında sürtünmesiz bir yüzey oluşturulmalıdır. Bu yüzden ÇE'nin yüzeyi bir yalıtım malzemesiyle (lastik, silikon, kauçuk vb.) kaplanmalıdır (Şekil 1.3). Bunun yerine ÇE ile BEM arasında hava boşluğu da bırakılabilir. ÇE ile BEM arasında gerilme geçişleri önlenemez ise BEÇÇ'nin basınç kapasitesi çekme kapasitesinden daha büyük olacaktır. ÇE ile BEM arasında elemanın burkulmasına müsaade edecek kadar boşluk bırakılabilir. Bu boşluğun fazla olması durumunda ise elemanda lokal burkulmalar ve bu lokal burkulmalara bağlı olarak elemanın yorulma ömrünün kısalması ve ÇE ile BEM arasındaki sürtünmeden dolayı basınç kapasitesinde artış meydana gelebilir. Poisson etkisinden dolayı ÇE'de oluşacak hacimsel değişim de dikkate alınmalıdır.



Şekil 1.3. Karakteristik BEÇÇ eleman detayı (Özçelik vd. 2017'den adapte edilmiştir)

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

BEÇÇ'ler deprem riski taşıyan bölgelerde çelik yapıların tasarımında ve uygulamasında kullanılmaktadır. BEÇÇ'lerin uygulamada kullanılabilmesi için yeterli histeretik davranışı göstermesi gerekmektedir. American Institute of Steel Construction (AISC) yönetmeliğinde sağlaması gerekli olan histeretik davranış belirtilmiştir.

Bu tezin amacı AISC yönetmeliğinde ikinci aşama testi olarak belirtilen BEÇÇ'lerin çerçeve benzeri sistem içinde test edilerek histeretik davranışının belirlenmesidir.

Bölüm 1'de çalışmanın yapılma amacından ve tezin bölümleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2'de BEÇÇ'lerle ilgili yapılan çalışmalara değinilmiştir.

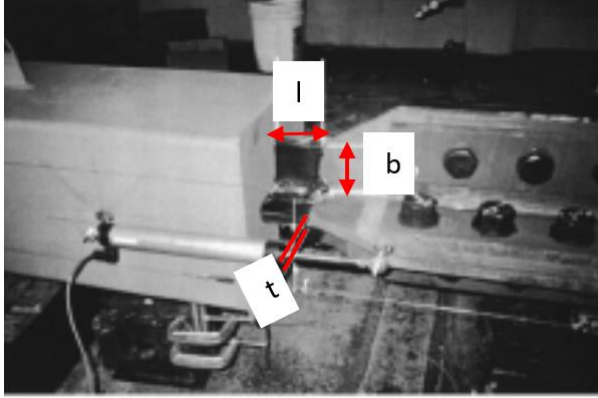
Bölüm 3'de deney düzeneğinin ve BEÇÇ elemanların tasarımı ve yapılışından bahsedilmiştir.

Bölüm 4'de test sonuçlarıyla ilgili sayısal veriler ve deney sonrası fotoğraflara yer verilmiştir.

Bölüm 5'de test sonuçlarından elde edilen sayısal veriler ve sonuçlar doğrultusunda bir değerlendirme yapılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Japonya'da Yashino ve Karino (1971) tarafından BEÇÇ'ler hakkında ilk deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada BEM sadece betondan oluşmakta ve ÇE ile BEM arasında gerilme geçişleri önlenerek, ÇE'nin sadece aksenal yük taşıması sağlanmış ve BEM'in ise ÇE'nin burkulmasını önlemiştir. (Doran vd. 2018). Watabane vd.(1988) kutu profilin içerisine beton doldurulmasıyla oluşan BEM'e sahip BEÇÇ'lerin global burkulmasını incelemiştir. Clark vd. (2000) Kalifornia Üniversitesinde iki adet dikdörtgen ve bir adet + enkesite sahip üç adet BEÇÇ elemanı testini yapmışlardır. BEÇÇ'ler \pm %2 birim şekil değiştirmede kararlı bir histeretik davranış göstermişlerdir. Black vd. (2004) çeşitli yükleme protokolleri ile + enkesitli çekirdek elemana sahip BEÇÇ'ler üzerinde testler yapmışlardır. Bu test sonuçlarına göre, ÇE'nin BEM'in dışına kalan kısmında plastik burulmalı burkulma meydana gelmemesi için genişliğinin kalınlığına oranının (b/t) 5'den küçük olması gerektiğini önermişlerdir (Şekil 2.1).

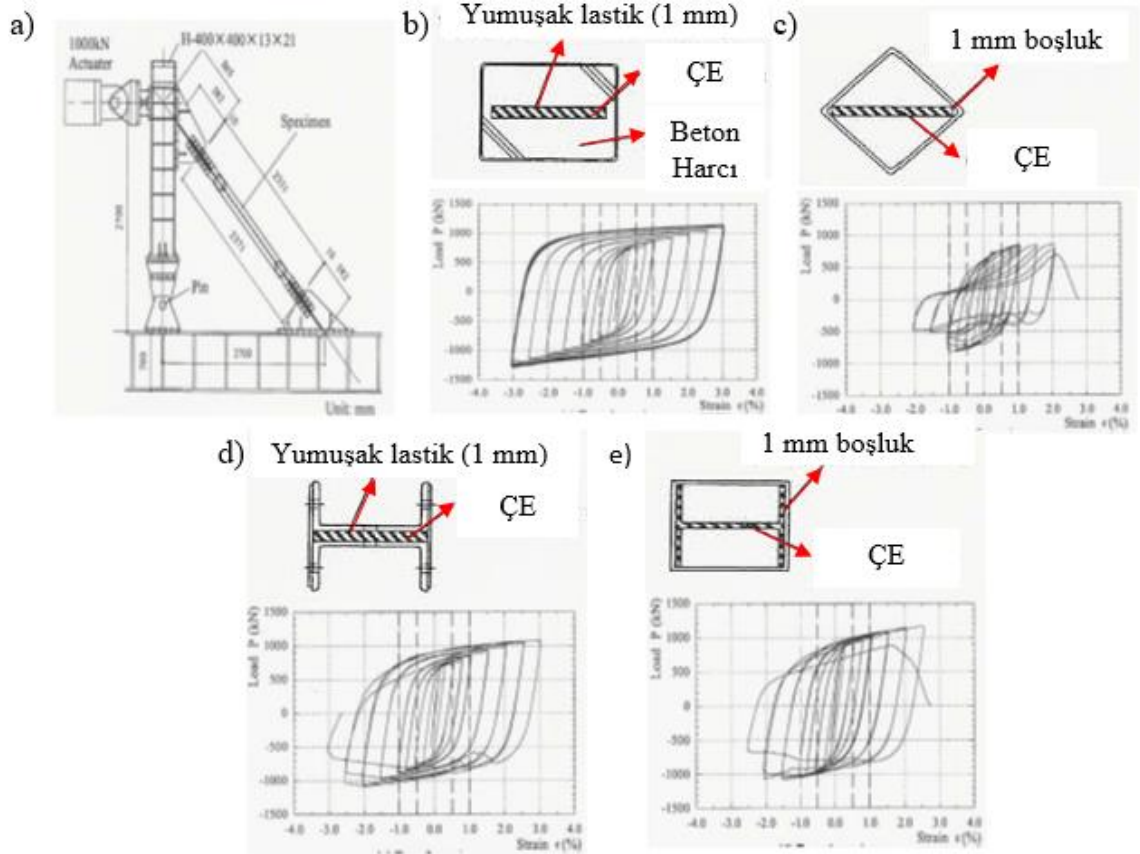


l = ÇE'nin BEM'in dışında kalan uzunluğu b = ÇE'nin başlık genişliği t = ÇE'nin başlık genişliği

Şekil 2.1. BEM'in dışında kalan ÇE kısmı. (Black vd. 2004)

Iwata vd. (2000) tarafından Şekil 2.2.a'da gösterilen test düzeneğinde farklı enkesit özelliklerine sahip 4 adet BEÇÇ elemanın testlerini yapmışlardır. BEÇÇ'lerin ÇE enkesit alanları ve çelik malzeme akma dayanımları büyük ölçüde eşittir. Şekil 2.2.b'deki BEÇÇ elemanda, ÇE'yi saran BEM kutu profil içerisine beton harcı konulmasıyla meydana getirilmiştir. ÇE ile beton harcı arasındaki sürtünmeyi önlemek için ise 1 mm kalınlığında yumuşak lastik malzeme kullanılmıştır. Şekil 2.2.b'de görülen BEÇÇ elemanda basınç yükü altında ÇE yerel burkulmalar meydana gelmiş ve beton harcında hasarlar meydana gelmiştir. Bu test elemanı kararlı bir histeretik davranış göstermiş ve test sonunda %3 birim şekil değiştirmeye ulaşmıştır. Şekil 2.2.c'deki BEÇÇ elemanda ÇE'yi saran BEM kutu profilden meydana gelmekte ve sürtünmeyi önleyici malzeme kullanılmamıştır. Bunun yerine BEM ile ÇE arasında sol ve sağ uçtan 1 mm boşluk bırakılmıştır. Bu test elemanında, basınç etkisi altında % 1 birim şekil değiştirmede ÇE'nin orta bölgelerinde yerel burkulmalar meydana gelmiş ve kutu profil deforme olmuştur. Çekme etkisi altında %2.5 birim şekil değiştirmede eleman kopmuştur. Şekil 2.2.c görüldüğü eleman kararlı bir histeretik davranışa sahip değildir. Şekil 2.2.d'deki BEÇÇ elemanda ÇE'yi saran BEM çelik U profillerin ve çelik levhaların yüksek mukavemetli bulonlarla bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Sürtünmeyi engelleyici malzeme

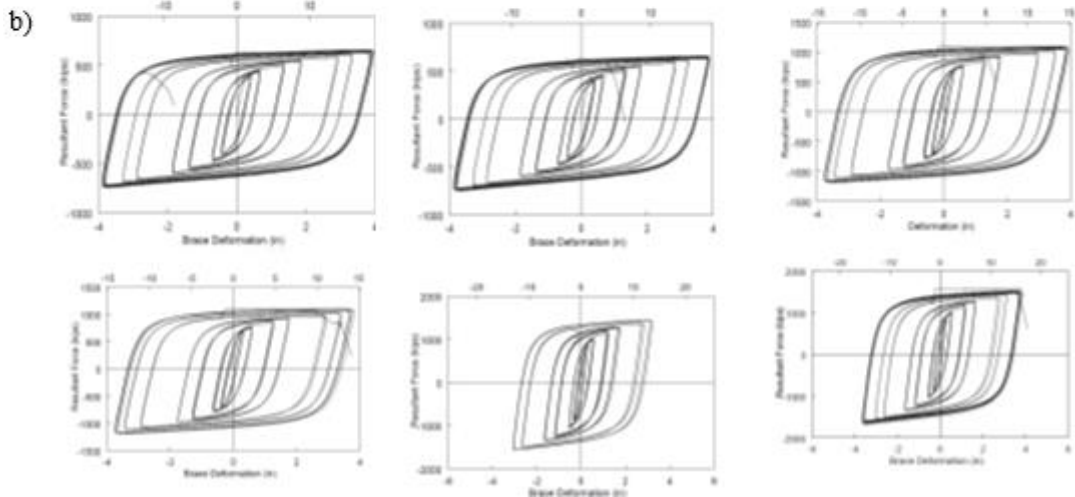
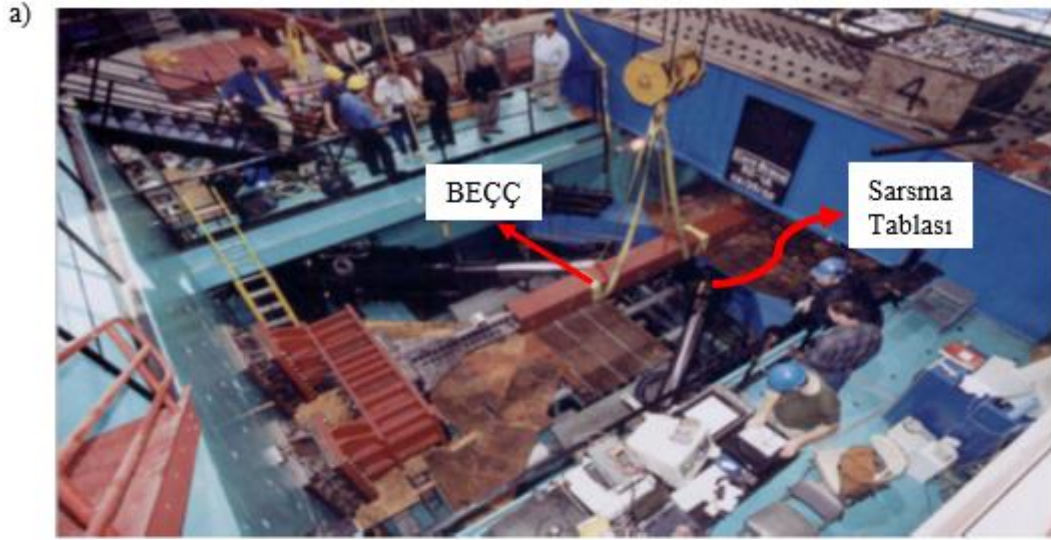
olarak da 1mm kalınlığında yumuşak lastik kullanılmıştır. Basınç etkisi altında %1 birim şekil değiştirmede ÇE’de yerel burkulmalar meydana gelmiştir. Basınç etkisinde %3 birim şekil değiştirmede yüksek mukavemetli bulon kopana kadar BEÇÇ kararlı bir histeretik davranış göstermiştir. Şekil 2.2.e’deki BEÇÇ elemanın ÇE’nin enkesiti diğer elemanlardan farklıdır. Bu elemanda ÇE geniş başlıklı yapım I profilden ve BEM kutu profilden oluşmaktadır. Kutu profil ile ÇE arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır. Şekil 2.2.c’deki elemanda olduğu gibi sürtünmeyi önleyici malzeme kullanılmamıştır. Şekil 2.2.e’deki BEÇÇ elemanda basınç etkisi altında %2 birim şekil değiştirmede ÇE’nin orta bölgelerinde yerel burkulmalar ve kutu profilde çatlaklar meydana gelmiştir. Basınç etkisi altında %2.5 birim şekil değiştirmede kutu profildeki çatlaklar devam etmiş ve kutu profil çatlakların olduğu bölgeden kırılmıştır. Test sonuçlarından görüldüğü üzere en iyi performansı Şekil 2.2.b’deki BEÇÇ eleman göstermiştir. Diğer elemanlarda ise sırasıyla Şekil 2.2.d, Şekil 2.2.e ve Şekil 2.2.c’deki BEÇÇ elemanlar daha kararlı davranış göstermiştir.



Şekil 2.2. a) Test düzeneği; b) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı; c) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı; d) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı; e) BEÇÇ eleman enkesit gösterimi ve histeretik davranışı. (Iwata vd. 2000)

Merritt vd. (2003) Şekil 2.3.a’da gösterilen deney düzeneği sayesinde hem aksenal deplasman hem de uç dönemeye maruz bırakılan 6 adet BEÇÇ eleman testini yapmışlardır. Test edilen bu elemanların 2 adedi dikdörtgen, 4 adedi + enkesit özelliğine

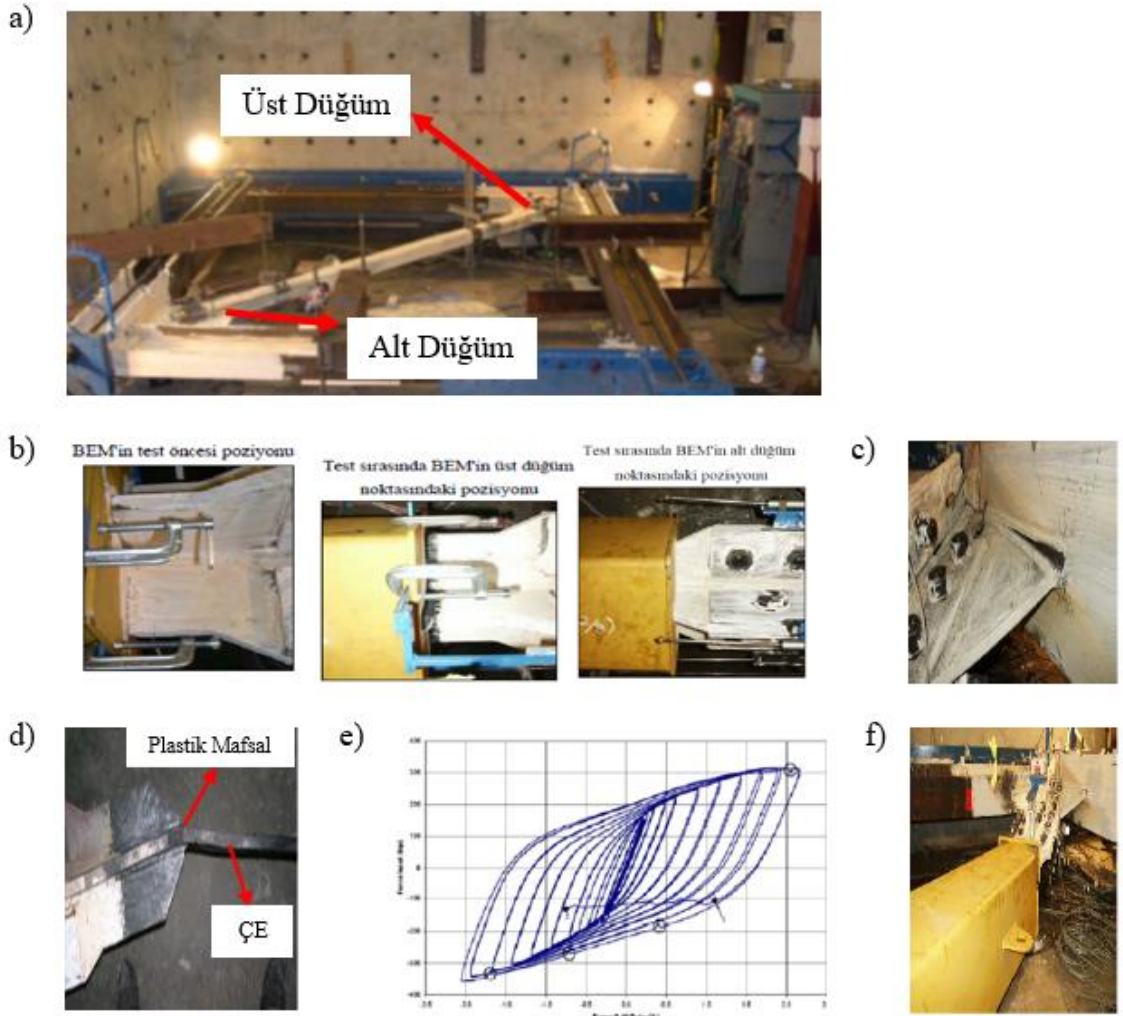
sahip ÇE'den oluşan ve kutu profilin içerisine beton dökülmesiyle elde edilen BEM'ye sahiptir. BEÇÇ'lerde kullanılan çelik malzemenin akma dayanımları 297.2 MPa ile 307.5 Mpa arasında değişmektedir. Şekil 2.3.b 'de görüldüğü gibi test sonucunda BEÇÇ'ler kararlı bir histeretik davranış göstermişlerdir.



Şekil 2.3. a) Deney düzeneği; **b)** BEÇÇ'lerin histeretik davranışları (Merritt vd. 2003)

Cristopulos (2005) Şekil 2.4.a'daki zemine paralel olan test düzeneğinde 5 adet BEÇÇ elemanın testini yapmıştır. Test sırasında BEM üst düğüm noktasından alt düğüm noktasına doğru hareket etmiş (Şekil 2.4.b) ve testin sonlarına doğru kolon-kiriş-bayrak levhası birleşimlerinde deformasyonlar meydana gelmiştir (Şekil 2.4.c). Özellikle üst kirişin düzlem dışı dönme hareketi nedeniyle stabilite problemi ortaya çıkarak, üst bayrak levhasının da düzlem dışı dönme hareketi yapmasına sebep olmuştur. Üst bayrak levhasının bu hareketinden dolayı da ÇE'nin üst ucunda plastik mafsal meydana gelmiştir (Şekil 2.4.d). Şekil 2.4.e'de referans test sonucunda BEÇÇ'in histeretik davranışı gösterilmiştir. Referans çerçeve testinde BEÇÇ'in üst düğüm noktasındaki dönmelerin

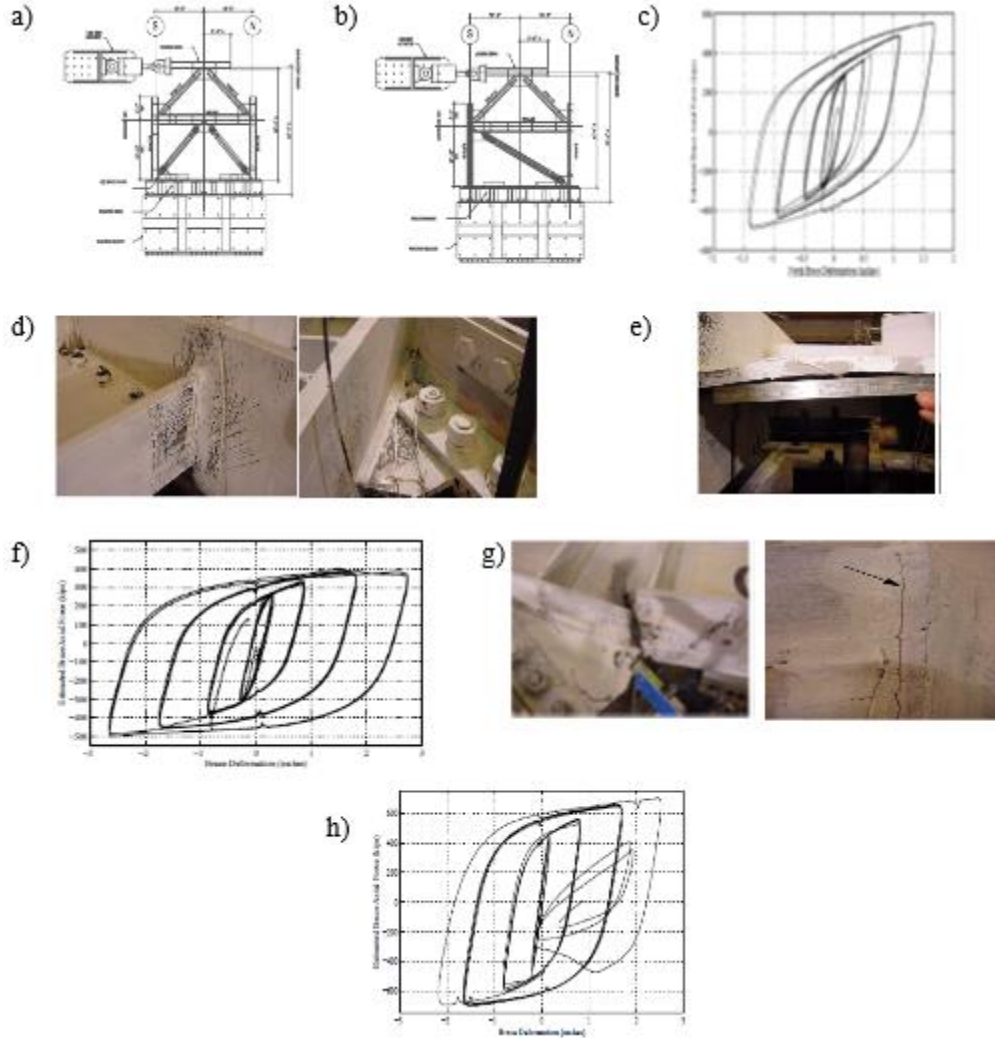
devam etmesi nedeniyle BEM yaklaşık 30 cm düşey deplasman yapmış ve zemine temas etmesiyle birlikte yükleme durdurulmuştur (Şekil 2.4.f).



Şekil 2.4. a) Test düzeneği; b) BEM'in deney öncesi ve deney sırasındaki pozisyonu; c) Kiriş-kolon-bayrak levhası birleşiminde meydana gelen deформasyonlar; d) ÇE'de meydana gelen plastik mafsal; e) Referans test sonucuna göre BEÇÇ'in histeretik davranışı; f) Deney sonunda BEM'in zemin ile teması (Christopulos 2005)

Aiken vd (2002) Kalifornia Üniversitesi'nde zemine paralel çerçeve sistemde 3 adet BEÇÇ'li çelik çerçeve testi yapmışlardır. 1. testte BEÇÇ'ler çerçevenin açıklıklarına ters v olarak yerleştirmişlerdir (Şekil 2.5.a). 2. ve 3. testte BEÇÇ eleman çapraz olarak yerleştirmişlerdir (Şekil 2.5.b). 1. testte sistem ve BEÇÇ'ler kararlı bir davranış göstermiş (Şekil 2.5.c) ve kolon-kiriş birleşimleri, bayrak levhası plastikleşmiştir (Şekil 2.5.d). 2. testte, 1. testte kullanılan BEÇÇ'ler ve bayrak levhaları değiştirilerek yerine yenileri konulmuştur. 2. testin sonunda üst bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 2.5.e). 2. test sonucunda çerçeve sistem ve BEÇÇ'ler genel olarak iyi bir histeretik davranış göstermiştir (Şekil 2.5.f). 3. testte de önceki testte kullanılan BEÇÇ eleman ve bayrak levhaları değiştirilerek yerine yenileri konulmuştur. Bu testte kolon alt başlığı

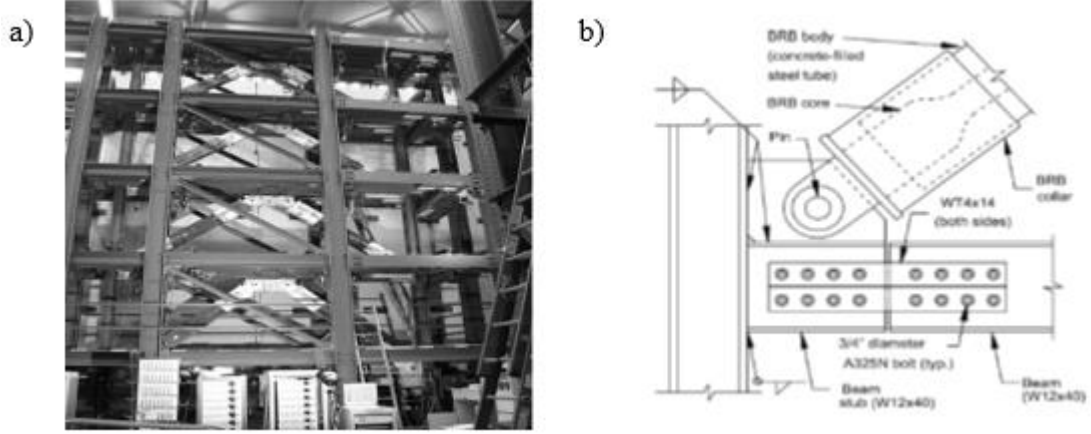
kaynağında kırılma, kolon-kiriş birleşiminde ve kiriş-bayrak levhası birleşiminde kopma gibi limit durum koşulları gözlenmiştir (Şekil 2.5.g). Bu koşulların ortaya çıkması nedeniyle çerçeve sistem diğer 2 teste göre daha kararsız bir histeretik davranış göstermiştir (Şekil 2.5.h).



Şekil 2.5. a) 1. teste ait deney düzeneği; b) 2. ve 3. teste ait deney düzeneği; c) 1. teste ait BEÇÇ'in histeretik davranışı; d) 1. test sonucunda kolon-kiriş birleşiminde ve bayrak levhasında meydana gelen akma; e) 2. test sonucunda üst bayrak levhasında meydana gelen burkulma; f) 2. teste ait BEÇÇ'in histeretik davranışı; g) 3. test sonucunda kolon alt başlığı kaynağında meydana gelen kırılma ve kiriş bayrak levhası birleşiminde meydana gelen kopma; h) 3. teste ait BEÇÇ'in histeretik davranışı (Aiken vd. 2002)

Fahnestock v.d (2007) 0.6 oranında küçültülmüş tek açıklıklı 4 katlı BEÇÇ'li çerçeve sistemi test etmişlerdir (Şekil 2.6.a). Çerçeve sistemin bağlantı tipleri; BEÇÇ ile bayrak levhası arasında mafsallı bağlantı tipi, kolon kiriş arasında bulonlu birleşim tipi kullanılmıştır (Şekil 2.6.b). Bayrak levhasının bulunduğu bölgede, kolon kiriş birleşim yeri bulonlu olsa da küçük oranda moment aktarmaktadır. Test sonucunda yaklaşık %5

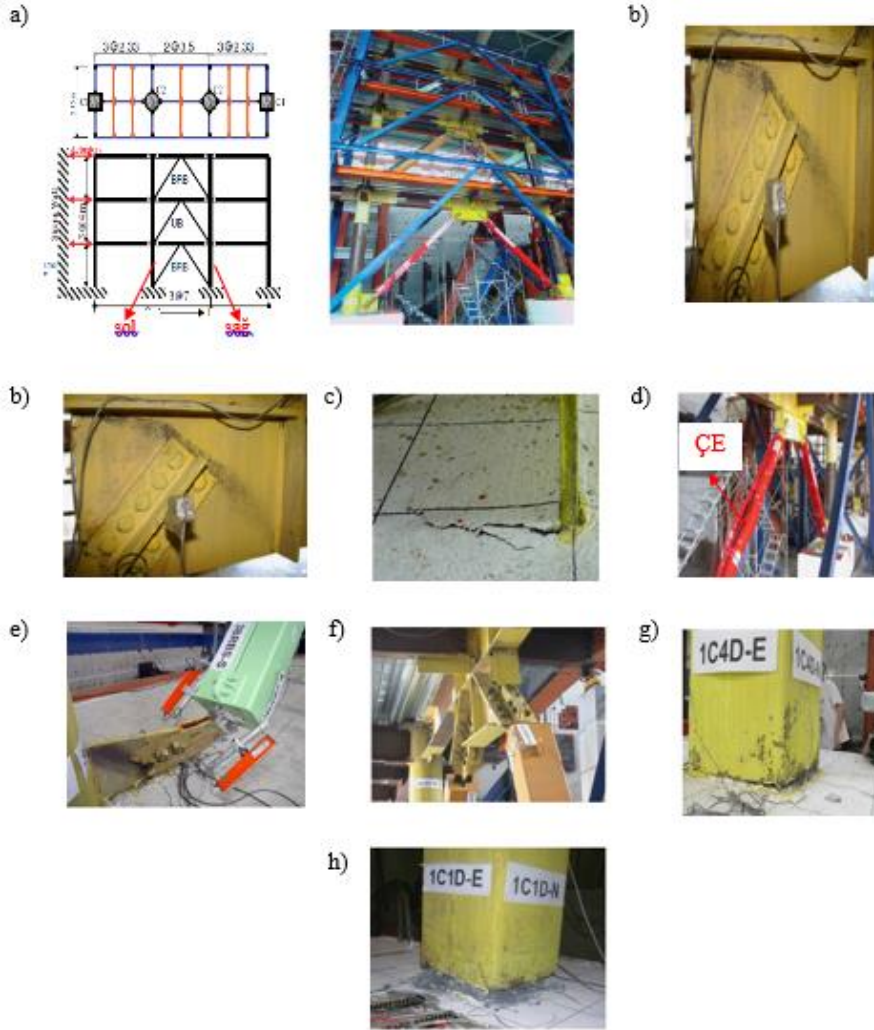
kat ötelemesine ulaşılmıştır. Bayrak levhasında, bağlantılarda hasar oluşmaması ve sistemin dayanımında düşüş olmamasından dolayı BEÇÇ'li çerçeve sistemlerde bu bağlantı tipinin iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.6. a) Test çerçevesi; **b)** Bağlantı detayı (Fahnestock vd. 2007)

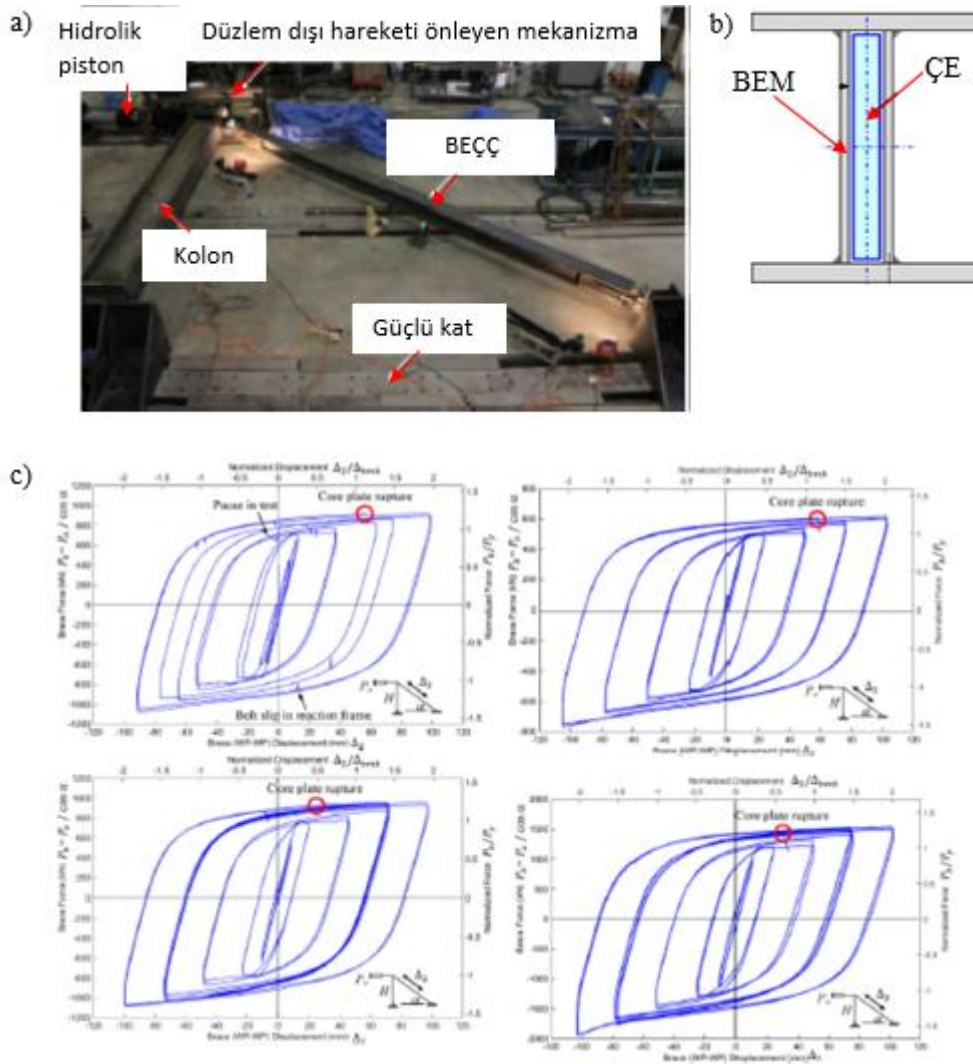
Tsai v.d (2008) 3 açıklıklı 3 katlı BEÇÇ'li sistem üzerinde dinamik benzeri ve statik yüklemeler altında çeşitli testler yapmışlardır (Şekil 2.7.a). Dinamik benzeri yük olarak 1999 Chi-Chi ve 1989 Loma Prieta deprem kayıtlarını kullanmışlardır. Statik yüklemeler olarak ise kat ötelemesine dayalı tersinir yatay yük uygulanmıştır. Testleri 1.faz ve 2.faz olmak üzere iki aşamada yapmışlardır. 1.fazda 7 test ve 2. fazda 3 test olmak üzere toplam 10 test yapmışlardır. 1. faz test 1 sonunda, 1. kat sağ BEÇÇ ile kirişin birleştiği bayrak levhasında düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir (Şekil 2.7.b). BEÇÇ elemanı ısıtılarak onarılmış ve kiriş üzerinde bulunan bayrak levhalarına ek plakalar kaynatılarak güçlendirilmiştir. Bu işlemlerden sonra test tekrarlanmıştır. 1.faz test 2 1.faz test 1 ile aynı yüklemeye sahiptir. Yükleme 1.faz test 1'e göre zıt yönde uygulanmıştır. Test sonunda, 1.kat 0.0052 radyan, 2.kat 0.0043 radyan ve 3.kat 0.0038 radyan kat ötelemesi değerine ulaşmış ve kiriş kolon birleşim bölgeleri elastik kalmıştır. 1.faz test 3 sonunda, 1.kat 0.016 radyan, 2.kat 0.017 radyan ve 3.kat 0.01 radyan kat ötelemesi değerine ulaşmıştır. 2. ve 3. kat döşemelerinin sağ BEÇÇ kolon birleşimine yakın bölgelerinde çatlaklar meydana gelmiştir. 1.faz test 4 sonunda, 1. kat sağ BEÇÇ kolon ucunda hafif bir eğilme meydana gelmiş ve o bölgedeki betonarme temelde çatlaklara sebep olmuştur (Şekil.2.7.c). Test durdurulmuş ve 1.kat bayrak levhalarına ek plakalar kaynatılarak güçlendirilmiştir. Daha sonra teste devam edilmiştir. 1.faz test 5 sırasında yükte ani bir düşme meydana gelmiş ve daha sonra yük tekrar artmaya başlamıştır. Bu test sonucunda 1.kat 0.025 radyan, 2.kat 0.02 radyan ve 3.kat 0.011 radyan kat ötelemesi değerine ulaşmıştır. 1.faz test 6 sonunda, 1.kat 0.019 radyan, 2.kat 0.017 radyan ve 3.kat 0.01 radyan kat ötelemesi değerine ulaşmış ve 1. kat sol BEÇÇ'de az da olsa yüksek modda burkulma gözlemlenmiştir. 1.faz test 7'de önceki 6 testteki gibi dinamik benzeri yük uygulanmamıştır. Bunun yerine 4'er kez 0.01, 0.0125, 0.02, 0.025 ve 2 kez 0.0375 radyan kat ötelemesine uygun şekilde tekrarlı yatay deplasman uygulanmıştır. 0.02 radyan kat ötelemesinde, 1.kat sol BEÇÇ elemanının ÇE'de yüksek modda burkulma gözlemlenmiş (Şekil 2.7.d) ve 3.kat sol BEÇÇ'in kolon birleşimi ucunda düzlem dışı

burkulma meydana gelmiştir (Şekil 2.7.e). 0.025 radyan kat ötelemesinde, 2. kat kiriş ortasındaki bayrak levhasında ve BEÇÇ'lerin uç kısımlarında burkulma meydana gelmiştir. (Şekil 2.7.f). 1.faz deneylerinden sonra çerçeve sistemde bulunan 6 adet BEÇÇ değiştirilmiştir. 2. ve 3. katta kolon BEÇÇ birleşimindeki bayrak levhalarını plakalar kaynatılarak güçlendirilmiştir. Bu işlemlerden sonra 2. faz testleri yapılmıştır. İkinci faz test 1 sonunda kolon kiriş birleşim bölgeleri akmış ve herhangi bir kopma gözlemlenmemiştir. Bu testte en büyük kat ötelemesi 1.katta meydana gelmiş ve değeri 0.024 radyandır. 2. faz test 2 sonunda kat döşemelerinin kolon BEÇÇ birleşimine yakın bölgelerinde ezilmeler meydana gelmiştir. Taşıyıcı çerçeve sistemde belirgin yapısal hasarlar gözlemlenmemiştir. Bu testte en büyük kat ötelemesi 2. katta meydana gelmiş ve değeri 0.026 radyandır. 2. faz test 3 de 1. faz test 7'deki gibi tekrarlı yatay deplasman uygulanarak yapılmıştır. 0.025 radyan kat ötelemesinde, dış kolonların temellerinde çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 2.7.g). 0.0375 radyan kat ötelemesinde dış kolonlar temelle birleştiği noktadan aşırı hasar almış ve temelleri yukarı yönde hareket ettirmiştir (Şekil 2.7.h).



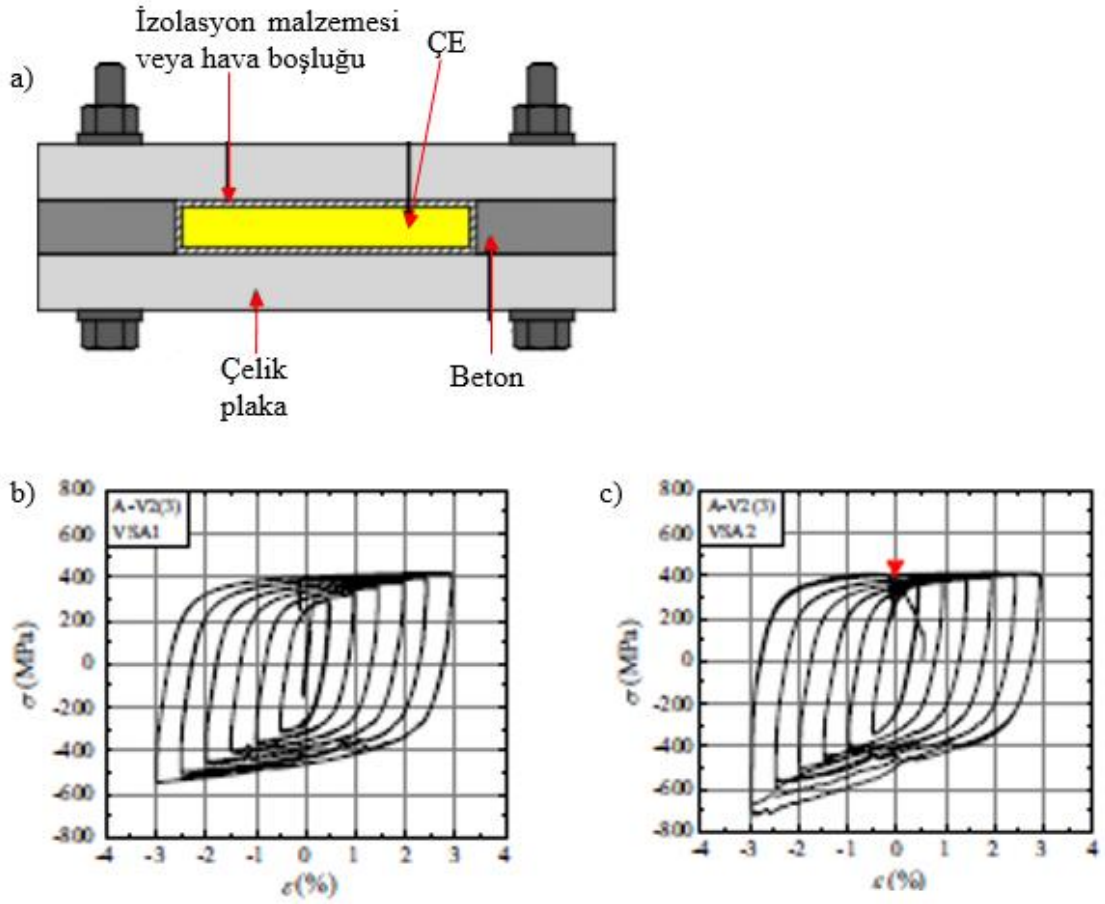
Şekil 2.7. a) Test çerçevesi; **b-h)** Yapılan testlerde meydana gelen deformasyonlar (Tsai vd. 2008)

Judd vd. (2016) 4 adet BEÇÇ elemanın histeretik davranışını belirlemek için Şekil 2.8.a'da görülen çerçeve benzeri sistem içerisinde aksel deformasyon ve uç dönmelere maruz bırakarak test etmişlerdir. Çalışmada geleneksel BEM (kutu profil - beton) yerine, çift gövdeye sahip I enkesitli yapım çelik profilden oluşan BEM kullanılmıştır (Şekil 2.8.b). Elemanlar % 2 kat ötelemesine kadar test edilmiş ve stabilite problemi, BEÇÇ bağlantı bölgelerinde kopma meydana gelmemiştir. Test edilen BEÇÇ elemanların ÇE bölgesinde kopmalar meydana gelmesine rağmen kararlı bir histeretik davranış göstermişler ve BEÇÇ'lerin basınç kapasiteleri çekme kapasitelerinin 1.3 katından küçük çıkmıştır (Şekil 2.8.c). Çift gövdeye sahip I enkesitli yapım çelik profilden oluşan BEM'e sahip BEÇÇ'lerin geleneksel BEM'e sahip BEÇÇ'lerle karşılaştırıldığında yeterli performans gösterdiği sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.8. a) Deney düzeneği; b) BEÇÇ elemana ait enkesit detayı; c) BEÇÇ'lerin histeretik davranışları (Judd vd. 2016)

Chen vd. (2016) izolasyon malzemesinin etkisini araştırmak için 7 adet BEÇÇ elemanı test etmişlerdir. Testlerde ÇE ile BEM arasında 1 mm hava boşluğu veya 1 mm kalınlığında kauçuk malzeme kullanmışlardır (Şekil 2.9.a). Test sonuçlarına göre, tüm BEÇÇ elemanların yüksek enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Fakat izolasyon malzemesi kullanılmayan BEÇÇ elemanlarda, ÇE'nin BEM ile temasından dolayı yüksek basınç kapasitelerine ulaşılmıştır. Bu yüzden basınç dayanımının çekme dayanımına oranının üst sınırı olan 1.3 değerin aşılmasına neden olmuştur (Şekil 2.9.b ve c). Test sonuçlarına göre, ince ve uzun ÇE'ye sahip BEÇÇ'lerde izolasyon malzemesinin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.



Şekil 2.9. a) BEÇÇ elemana ait enkesit detayı; b) 1 mm kauçuk malzeme kullanılan BEÇÇ elemanın histeretik davranışı; c) 1 mm hava boşluğu kullanılan BEÇÇ elemanın histeretik davranışı (Chen vd. 2016)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. BEÇÇ'lerin Ön Tasarımı ve Detayları

3.1.1. BEÇÇ'lerin ön tasarımı

Bu tez kapsamında 112M820 numaralı TÜBİTAK projesinde eleman bazında testleri yapılmış olan BEÇÇ eleman tipleri kullanılmıştır. FBA-2014-79 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında 3 adet BEÇÇ elemanın çerçeve sistem içerisindeki deneyleri yapılmıştır.

$$A_{\zeta E} = \frac{\text{Maksimum Eksenel Çekme Kuvveti}}{1,4 \times f_y} \quad (3.1)$$

BEÇÇ'lerin ST37 çeliğinden imalatının yapılması düşünüldüğünden Denklem 3.1'de akma dayanımının nominal değeri olan $f_y = 235$ MPa yerine 1.4 ile çarpılarak akma dayanımı artırılmıştır. ÇE'nin 1000 KN kuvvete göre olması gereken en büyük enkesit alanı yaklaşık 3039 mm^2 ve genişliği 202 mm dir. Fakat deney esnasında güvenlik faktörünü de dikkate alarak 1.BEÇÇ elemanın kapasitesi Denklem 3.1'e göre yaklaşık 500 KN olacak şekilde tasarlanmış ve ÇE'nin boyutları 15×100 mm olarak belirlenmiştir. Diğer BEÇÇ'lerin kapasitesi ise Denklem 3.1'e göre yaklaşık 750 KN olacak şekilde tasarlanmış ve ÇE'nin boyutları 15×150 mm olarak belirlenmiştir. BEÇÇ'lerde plastik deformasyonların sadece burkulması engellenmiş plastik bölge meydana gelmesi istendiğinden dolayı diğer bölgelerin (Burkulması engellenmiş elastik ve burkulması engellenmemiş elastik bölge) eksenel basınç kuvveti altında burkulması istenmemektedir. Bu yüzden bu bölgelere ek plakalar kaynatılarak enkesit alanı artırılmış ve "+" enkesit geometrisi elde edilmiştir. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliğine (ÇYTHYEEY) göre, eksenel basınç etkisi altındaki çelik elemanlarda yerel burkulma meydana gelmemesi için Denklem 3.2'deki değerlerin Denklem 3.3'deki değerden küçük olması gerekmektedir.

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad (\text{ÇYTHYEEY Tablo 5.1. A}) \quad (3.2)$$

$$\lambda_r = 0.45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{ÇYTHYEEY Tablo 5.1. A}) \quad (3.3)$$

$$\frac{K \times L}{i} \leq 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ ise; } (\text{ÇYTHYEEY Bölüm 8}) \quad (3.4)$$

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{f_y}{F_e} \right) \times f_y \quad (\text{ÇYTHYEEY Bölüm 8}) \quad (3.5)$$

$$\frac{K \times L}{i} > 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ ise; } (\text{ÇYTHYEEY Bölüm 8}) \quad (3.6)$$

$$F_{cr} = 0.877 \times F_e \quad (\text{ÇYTHYEEY Bölüm 8}) \quad (3.7)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{K \times L}{i}\right)^2} \text{ (ÇYTHYEEY Bölüm 8)} \quad (3.8)$$

$$P_n = A \times F_{cr} \text{ (ÇYTHYEEY Bölüm 8)} \quad (3.9)$$

Denklem 3.2 ve 3.3'deki b çelik elemanın genişliği, t çelik elemanın kalınlığı, E çelik malzemenin elastik modülü ve f_y çelik malzemenin akma dayanımıdır. Denklem 3.4'deki şart sağlanıyor ise çelik elemanda elastik olmayan burkulma ve Denklem 3.6'daki şart sağlanıyorsa çelik elemanda elastik burkulma meydana gelir. Denklem 3.4 ve 3.6'daki K burkulma boyu katsayısı, L desteklenen elemanlar arasındaki eleman uzunluğu ve i atalet yarıçapıdır. Denklem 3.5 ve 3.7'deki F_e elastik burkulma gerilmesi ve F_{cr} kritik burkulma gerilmesidir. Son olarak Denklem 3.9'daki ifade edildiği gibi enkesit alanı (A) ile kritik burkulma gerilmesinin (F_{cr}) çarpılmasıyla elemanın basınç dayanımı kuvveti bulunur. Tüm BEÇÇ'lerde burkulması engellenmemiş bölgenin enkesit özellikleri 270x270 mm ve + şeklindedir. Yukarıdaki Denklem 3.3-9'daki ifadelerle göre burkulması engellenmemiş bölgenin basınç kuvveti dayanımı yaklaşık 1840 KN'dur. 1.BEÇÇ elemanda burkulması engellenmiş elastik bölgenin enkesit özellikleri 170x170 mm ve 2. ve 3.BEÇÇ elemanda ise 220x220 mm'dir. 1. BEÇÇ için bu bölgenin basınç kuvveti dayanımı yaklaşık 1130 KN, 2.ve 3.BEÇÇ için 1490 KN'dir. BEM için laboratuvarında mevcut 250x250x6 2049 mm uzunluğunda kutu profil kullanılmıştır. BEM'de global burkulma meydana gelmemesi için Watabana vd. tarafından önerilen Denklem 3.10'daki şartı sağlamalıdır (Özçelik 2016).

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1, P_e = \frac{\pi^2 \times E \times I_{sc}}{l_{sc}}, P_y = \sigma_y \times A_c \quad (3.10)$$

Bu denklemde P_e Euler yöntemindeki burkulmaya neden olan kritik yük, E çelik malzemenin elastik modülü, I_{sc} BEM'in ağırlık merkezine göre en küçük atalet momenti, l_{sc} BEM'in boyu, P_y BEM'in akma kapasitesi, σ_y BEM'in akma gerilmesi ve A_c BEM'in enkesit alanıdır. Denklem 3.10'a göre BEM için P_e/P_y oranı yaklaşık 17'dir. Bu değer BEM'de global burkulma meydana gelmeyeceğini göstermektedir.

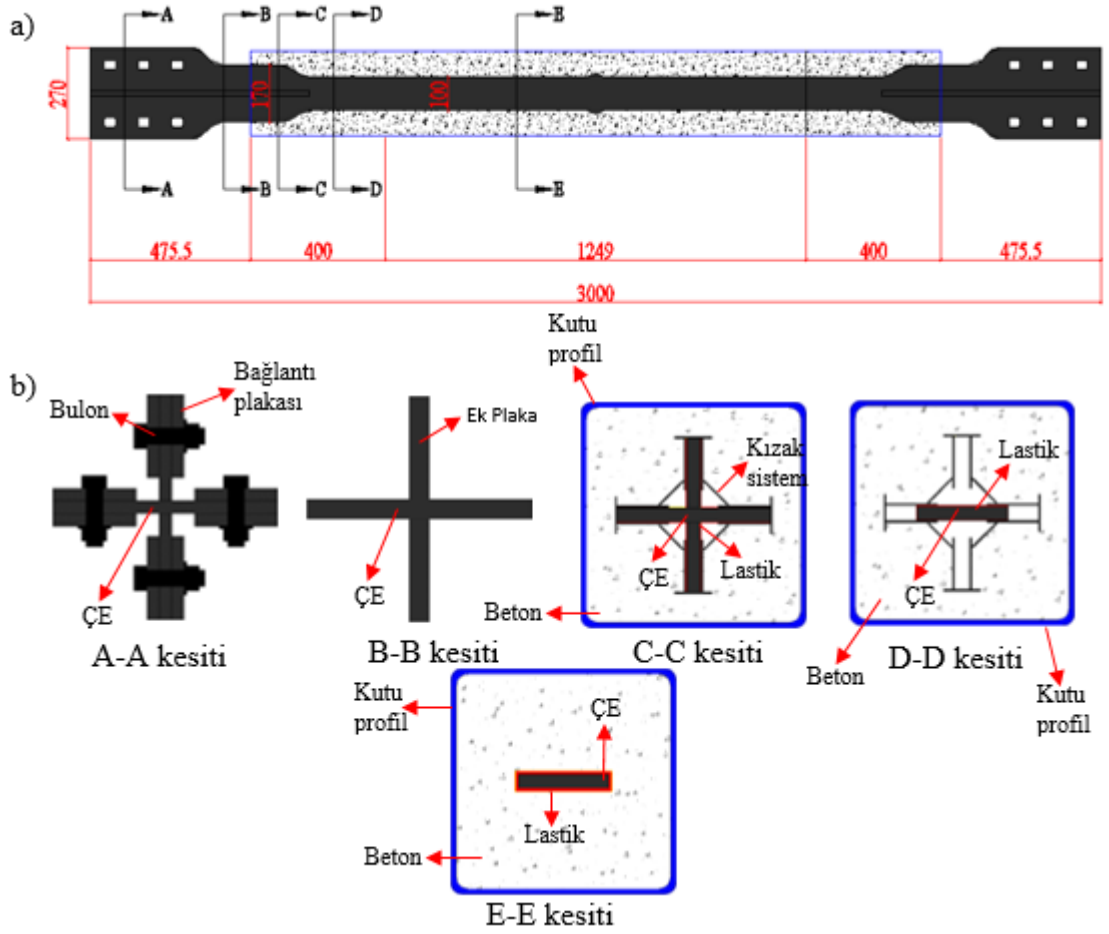
3.1.2. Deney elemanlarının detayları

Bu çalışmada, 3 metre uzunluğunda ve uzunluğunda, 15x100mm ve 15x150mm enkesitlerinde 3 adet BEÇÇ eleman çerçeve sistem içerisinde test edilerek histeretik davranışları belirlenmiştir. Tüm elemanlarda BEM kutu profil içerisine beton dökülmesiyle oluşturulmuştur. Deney elemanlarında farklı enkesitte ÇE ve burkulması engellenmiş elastik bölgede farklı ek BEM tipleri kullanılmıştır. Elemanlara ait bu parametreler çizelge 3.1'de verilmiştir.

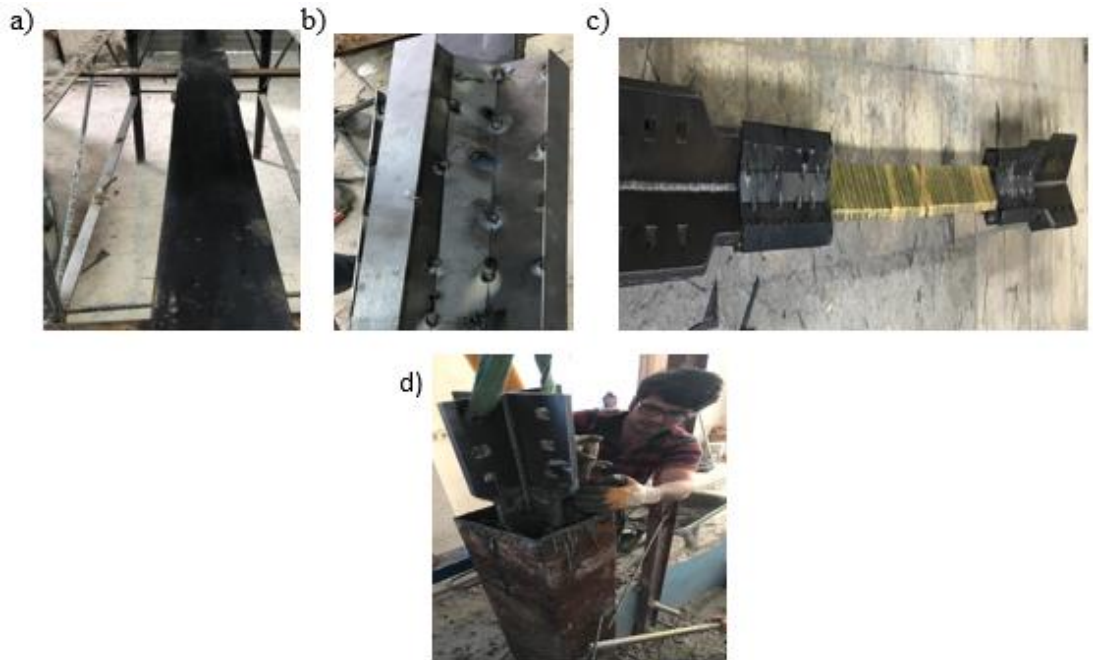
Çizelge 3.1 Deney elemanlarına ait parametreler

Eleman No	ÇE Enkesit Alanı (mm ²)	BEM	Ek BEM Tipi	Ek BEM Uzunluğu	İzolasyon Malzemesi
1. BEÇÇ	1500	Kutu Profil + Beton	Plaka	400 mm	4mm lastik
2. BEÇÇ	2250	Kutu Profil + Beton	Kutu Profil	400 mm	4mm lastik
3. BEÇÇ	2250	Kutu Profil + Beton	Plaka	400 mm	4mm lastik

1. BEÇÇ Eleman: Bu elemanda Şekil 3.1’de gösterildiği gibi 2 mm kalınlığında ve 400 mm uzunluğunda plakalar kullanılarak kızaklı ek BEM tipi oluşturulmuştur (Şekil 3.1 C-C kesiti). Bu bölgede (Burkulması engellenmiş elastik bölge) kızak sistem ile ÇE arasında sürtünmeyi azaltmak için 1 mm kalınlığında lastik kullanılmıştır (Şekil 3.1 C-C kesiti) ÇE’ nin diğer bölgelerinde (Burkulması engellenmiş plastik bölge) 4 mm kalınlığında lastik kullanılmıştır (Şekil 3.1 E-E kesiti). Elemanın imalatı sırasında öncelikle Şekil 3.1.b’de gösterilen A-A kesiti üzerine 3 adet slotlu delik açılmış 15 mm kalınlığa sahip 2 adet levhanın kaynatılması ile elde edilmiştir. Daha sonra ÇE üzeri yapıştırıcı yardımıyla lastik malzemeye ve ÇE’nin yan kısımları ise 2 mm kalınlığında izole bant ile kaplanmıştır. (Şekil 3.2.a). Bu işlemden sonra 2 mm kalınlığında 400 mm uzunluğundaki plakalar birlerine kaynatılarak kızak sistem oluşturulmuştur (Şekil 3.2.b). Kızak sistem içinde elemanın hareket edebilmesi için kızak sistem ile ÇE arasına betonun yerleşmemesi gerekmektedir. Bu yüzden kızak sistemde bulunan boşluklar silikon ile kapatılmıştır. Kızak sistem oluşturulduktan sonra kızak sistemin dışında kalan ÇE bölgelerinin üzeri şerit bant ile kaplanmıştır (Şekil 3.2.c). Bu işlem beton dökümü sırasında lastiklere zarar gelmemesi için yapılmıştır. Son olarak 250x250x6 kutu profil içine konularak beton dökme işlemi yapılmıştır. (Şekil 3.2.d).

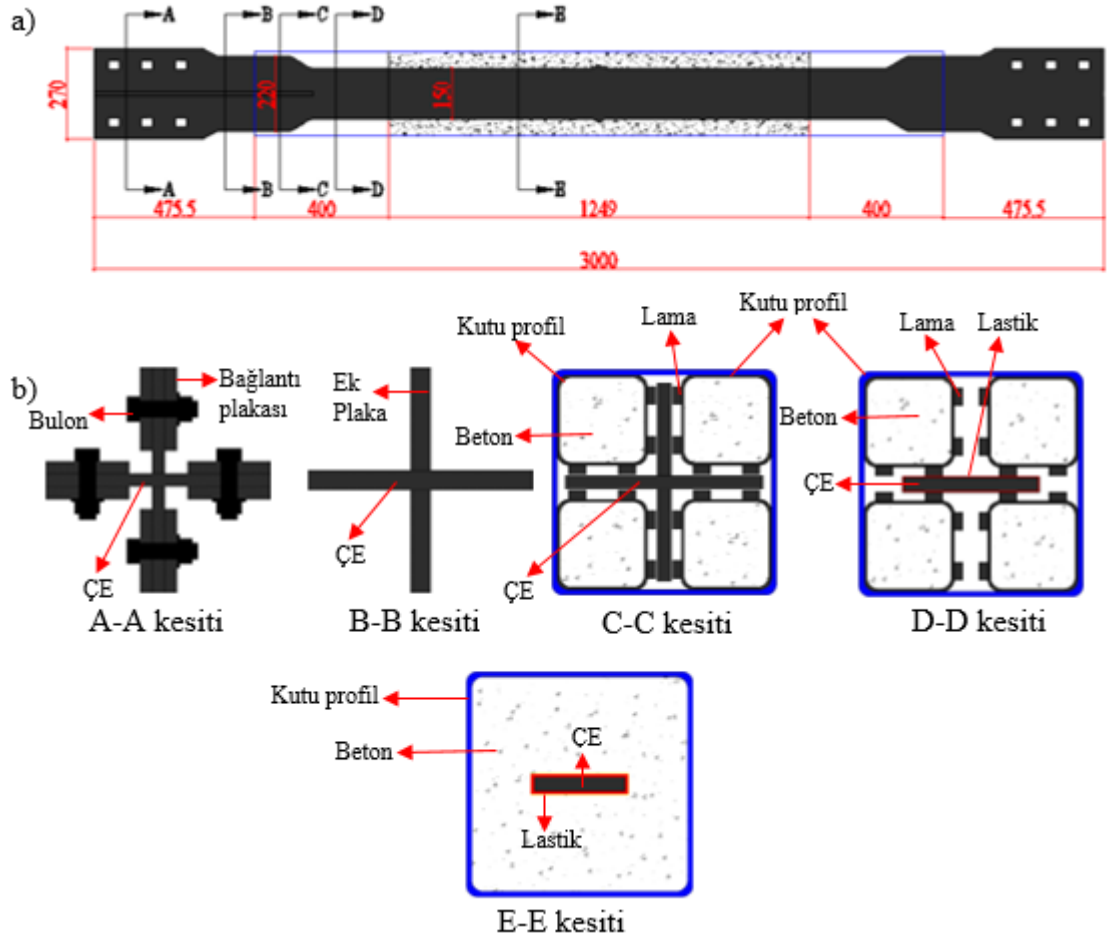


Şekil 3.1. 1.BEÇÇ elemanına ait detay çizimleri (FBA-2014-79 nolu proje)

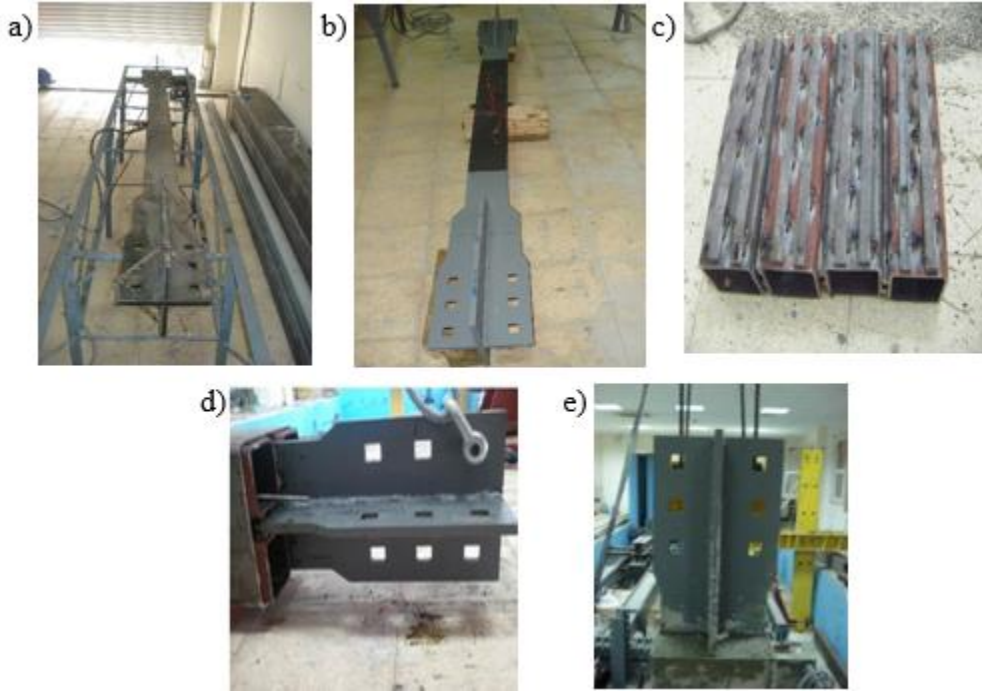


Şekil 3.2. 1.BEÇÇ elemanın üretim aşamaları

2. BEÇÇ Eleman: Bu elemanın plastik bölgenin enkesit alanı 2250 mm^2 dir. Ek BEM tipi 4 adet 400 mm uzunluğunda $100 \times 100 \times 3$ kutu profillere 10×10 boyutlarında lamaların kaynatılmasıyla oluşturulmuştur (C-C ve D-D kesitleri). Ek BEM ile ÇE arasında izolasyon malzemesi kullanılmamıştır. Bunun yerine 10×10 plakaların kullanılmasıyla 2 mm hava boşluğu bırakılmıştır. Ek BEM'in dışında kalan ÇE bölgesi (Burkulması engellenmiş plastik bölge 4 mm kalınlığında lastik kullanılmıştır (E-E kesiti). Elemanın üretim aşamaları 1.BEÇÇ eleman ile benzerdir. Bu elemanda beton dökümünden önce ek BEM ile ÇE arasına betonun yerleşmemesi için çelik plakadan meydana gelen kapak konulmuştur.

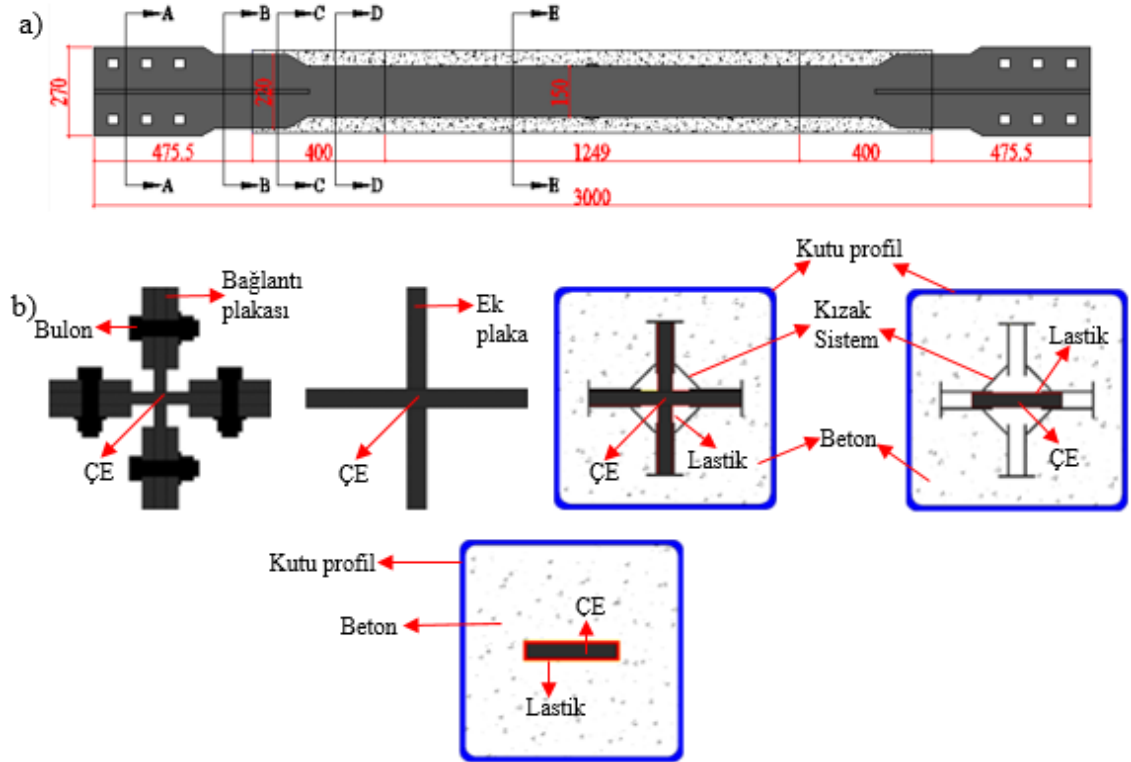


Şekil 3.3. 2.BEÇÇ elemanına ait detay çizimleri (FBA-2014-79 nolu proje)

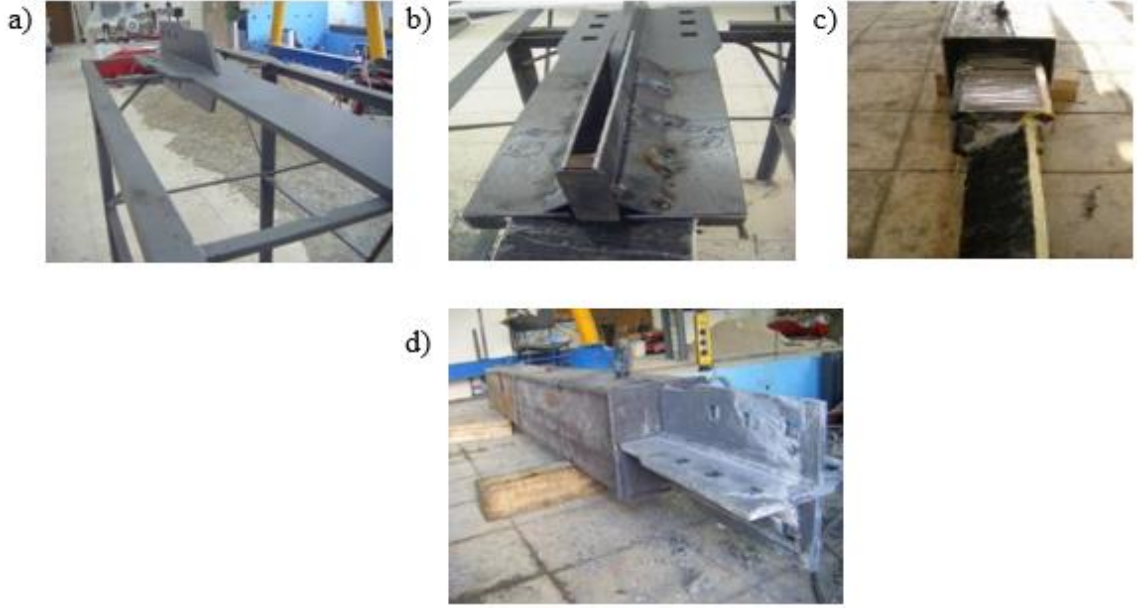


Şekil 3.4. 2.BEÇÇ elemanın üretim aşamaları

3.BEÇÇ Eleman: 1.BEÇÇ eleman ile aynı özelliklere sahiptir. Sadece ÇE'nin enkesit alanı farklı ve 2250 mm^2 dir.



Şekil 3.5. 3.BEÇÇ elemanına ait detay çizimleri (FBA-2014-79 nolu proje)



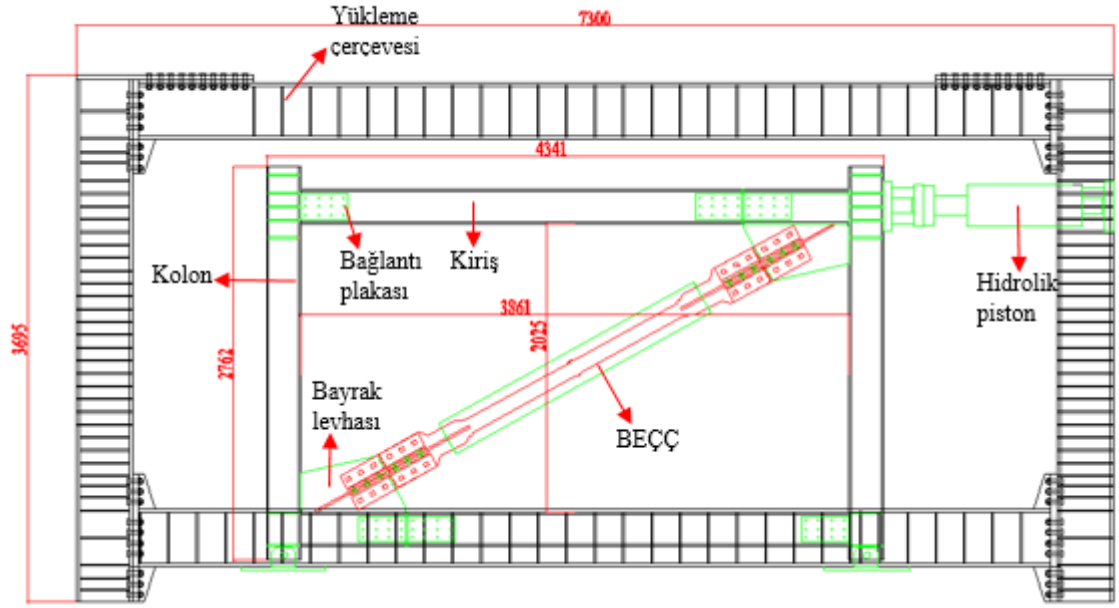
Şekil 3.6. 3.BEÇÇ elemanın üretim aşamaları

3.2. Çerçeve Sistemin Ön Tasarımı ve Detayları

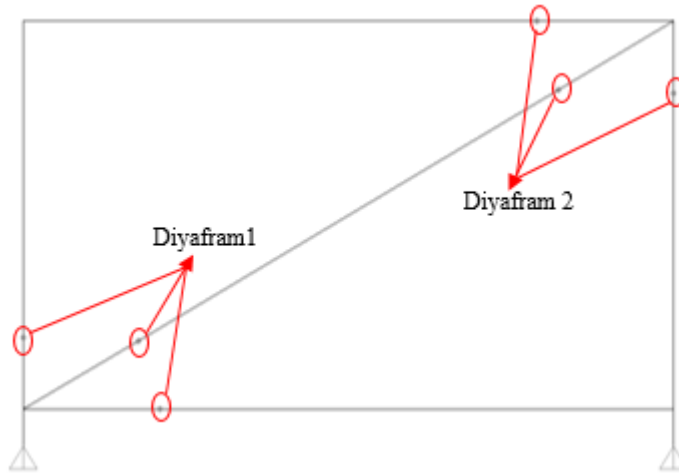
3.2.1. Çerçeve sistemin ön tasarımı

Şekil 3.7’de deney düzeneğinin detay çizimi gösterilmiştir. Burada en dışta yükleme çerçevesi ve onun içinde BEÇÇ’li çerçeve yerleştirilmiştir. BEÇÇ’lerin deney sırasında yükü doğrudan alması ve montaj kolaylığı için bulonlu birleşim tipi kullanılmıştır. Yükleme çerçevesi ise 3695 mm yüksekliğinde ve 7300 mm genişliğindedir. İçteki deney çerçevesinin boyutları belirlenirken laboratuvar şartları göz önünde bulundurulmuştur. Deney çerçevesini yüksekliği 2762 mm ve genişliği 4341 mm olarak belirlenmiştir. Kolon ve kirişler dikdörtgen çelik levhalar birine kaynaklanarak yapım I profil olarak üretilmiş ve kalınlığı 15mm, başlık genişliği 250 mm, yüksekliği 240mm’dir.

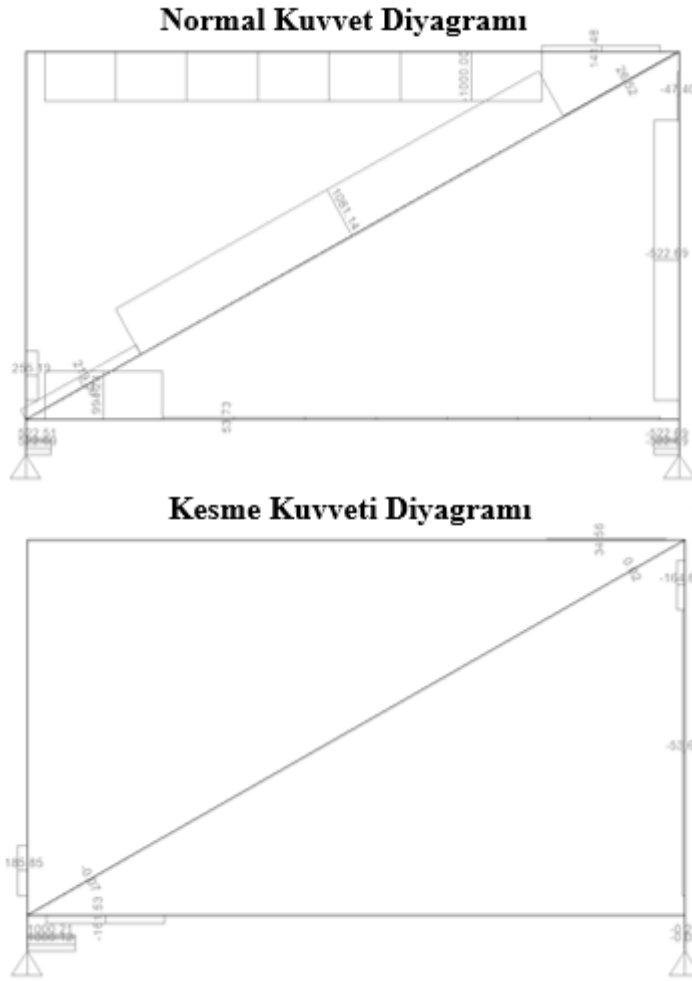
Mafsallı birleşim teşkil eden çerçeve sistem SAP 2000 (Wilson 2018) programında bazı kabuller yapılarak modellenmiştir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi bayrak levhası-kiriş-kolon birleşim bölgesinin uç noktalarının beraber hareket ettiği kabul edilerek diyafram tanımlanmıştır. Bulonlu birleşimlerin olduğu bölgelere ise mafsallı tanımlanmıştır. Şekil 3.9’da çerçeve sisteme 1000 KN yatay kuvvet etki etmesi durumunda çerçeve sistemde meydana gelen normal kuvvet diyagramı ve kesme kuvveti diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.7. Deney düzeneğine ait detay çizimi



Şekil 3.8. Çerçeve sistemde diyafram tanımlanan noktalar



Şekil 3.9. Çerçeve sisteme ait normal kuvvet ve kesme kuvveti diyagramları

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi kirişe 1000 kN ve kolona ise yaklaşık 553 kN eksenel yük etmektedir. Bu yüklere göre kiriş ve kolonlar Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliğindeki (Türk Standardı) şartları sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Kolon ve kirişe ait enkesit özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Burada "A" enkesit alanı, "I" atalet momentini ve "i" atalet yarıçapıdır.

Çizelge 3.2. Kiriş ve Kolon elemanların enkesit özellikleri

Eleman Adı	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	i _y (cm)	i _x (cm)
Kolon	106.5	10663.9	3912.16	10.01	6.06
Kiriş	106.5	10663.9	3912.16	10.01	6.06

Eksenel basınç etkisi altındaki yapım I profillerin başlıklarının kompaktlık şartını sağlaması için Denklem 3.11'deki değerin Denklem 3.12'deki değerden küçük olması gerekmektedir. Yapım I profillerin gövdeleri için ise Denklem 3.13'deki değerin Denklem 3.14'deki değerden küçük olması gerekmektedir. (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (2017)).

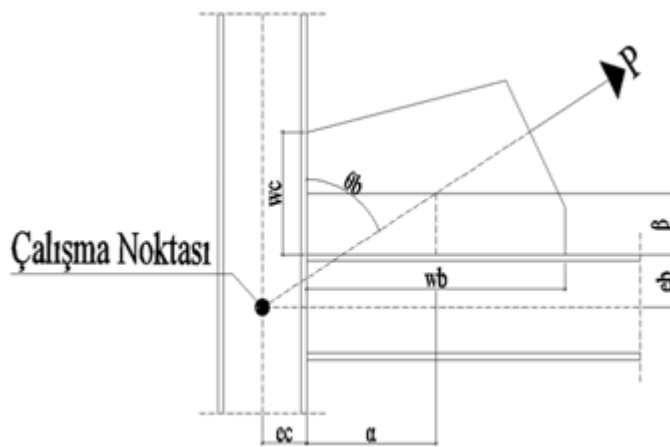
$$\lambda = \frac{b}{2 \times t_f} \quad (\text{ÇYTHY EY Tablo 5.1. A}) \quad (3.11)$$

$$\lambda_r = 0.64 \times \sqrt{\frac{k_c \times E}{f_y}} \quad (\text{ÇYTHY EY Tablo 5.1. A}) \quad (3.12)$$

$$\lambda = \frac{h - 2 \times t_f}{t_w} \quad (\text{ÇYTHY EY Tablo 5.1. A}) \quad (3.13)$$

$$\lambda_r = 1.49 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{ÇYTHY EY Tablo 5.1. A}) \quad (3.14)$$

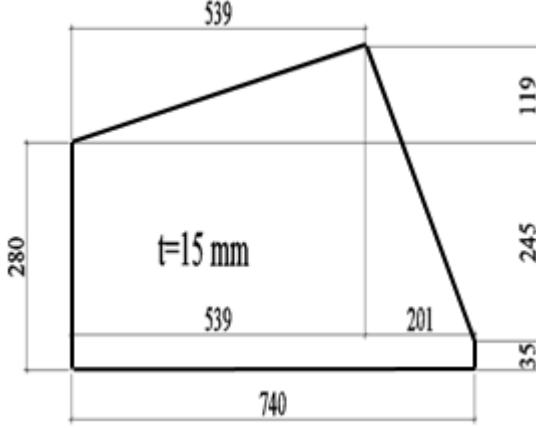
Denklem 3.11-12'de b yapım I profilin başlık genişliği, " t_f " başlık kalınlığı ve " t_w " gövde kalınlığıdır. Yukarıdaki denklemlerdeki şartlar sağlandıktan sonra Denklem 3.4-3.9'daki hesaplar yapılarak elemanın basınç kapasitesi bulunur. Bu hesaplar sonucunda kiriş ve kolon elemanların kapasitesi yaklaşık 1793 KN dur. Hidrolik pistonun maksimum yatay kuvveti vermesi durumunda (1000 KN) kirişe 1000 KN ve kolona ise 553 KN etki etmektedir. Bu sonuçlar kiriş ve kolon elemanların yeterli kapasiteye sahip olduklarını göstermektedir. 3 adet deney yapılacağından ve her deneyde tekrarlı yük uygulanacağı düşünülerek elemanların kapasiteleri gelen yüklere oranla yüksek tasarlanmıştır. Kiriş ve kolon elemanların detaylı hesapları Bölüm 7'de verilmiştir. Bayrak levhasının boyutları AISC (American Institute of Steel Construction) yönetmeliği bölüm 13'de belirtilen Düzgün Kuvvet Yöntemi (Uniform Force Method) kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi yöntemde sadece BEÇÇ elemanın kuvvetinin (P) etkisi göz önünde bulundurulur. Çalışma noktası ise kolon, kiriş ve çaprazın merkezinin kesiştiği noktadır (Christopoulos (2005)).



Şekil 3.10. Düzgün Kuvvet Yöntemi (Christopoulos 2005'den adapte edilmiştir)

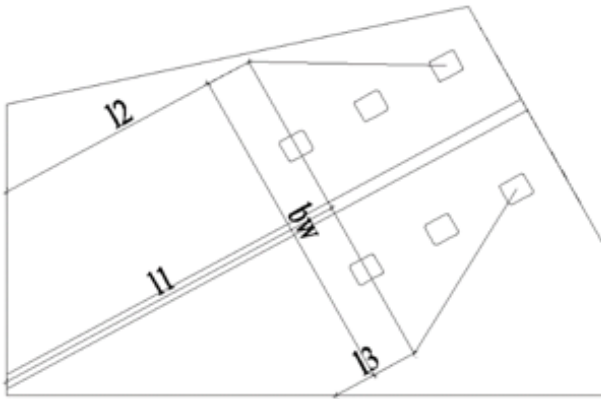
$$W_c = \frac{2w_b + e_c}{2 \tan \theta_b} - \frac{e_b}{2} \quad (3.15)$$

Şekil 3.10'da gösterilen değerler Denklem 3.15'de yerine yazılarak bayrak levhası boyutlandırılmıştır. Burada kirişin ve kolonun yüksekliği 24 cm olduğundan $e_b = e_c = 12$ cm dir. BEÇÇ'in düşey doğrultu ile arasındaki açı $\theta_b = 61.088$ dercedir. Bayrak levhasının kiriş doğrultusundaki uzunluğu $w_b = 74$ cm dir. Bu değerler Denklem 3.15'de yerine yazıldığında bayrak levhasının boyutları Şekil 3.11'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.11. Bayrak levhasına ait detay çizimi

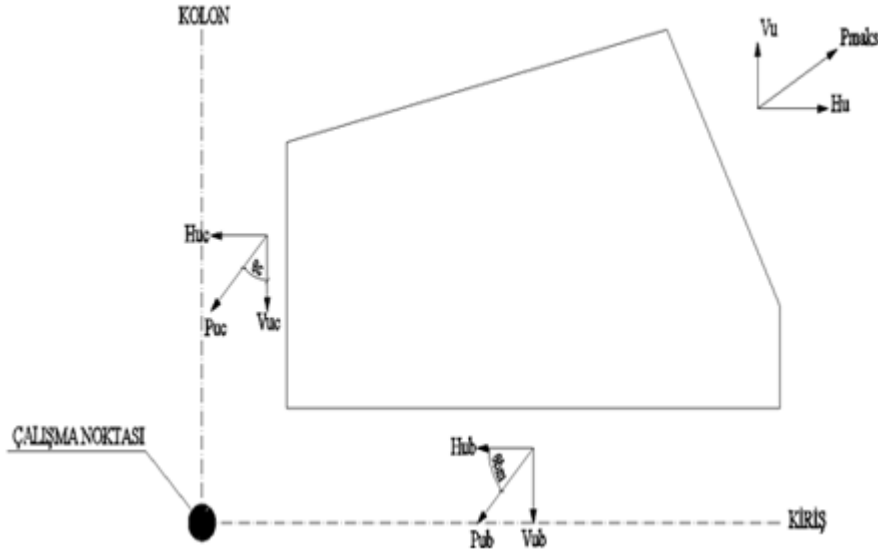
Bayrak levhasının boyutları belirlendikten sonra bu boyutlarla bayrak levhasının burkulma kapasitesi hesaplanmıştır. Burkulma kapasitesi hesaplanırken Thornton'a ait yöntem kullanılmıştır (Christopoulos (2005)). Şekil 3.12'da gösterildiği gibi delik merkezlerinden 30 derece açıyla ekstrapolasyon yapılarak eş genişlik (b_w) belirlenir. Bayrak levhasının burkulma boyu ise l_1 , l_2 , l_3 uzunluklarının ortalaması ve l_2 uzunluğu değerlerinden en küçük olanıdır (Christopoulos (2005)).



Şekil 3.12. Thornton Yöntemi (Christopoulos 2005'den adapte edilmiştir)

Bayrak levhasının burkulma boyu 21.49 cm olarak hesaplanmıştır. Burkulma boyu belirlendikten sonra Denklem 3.4-9 kullanılarak bayrak levhasının burkulma kapasitesi yaklaşık 1841 KN olarak hesaplanmıştır. Bayrak levhasının burkulma

kapasitesinin detaylı hesapları Bölüm 7’de verilmiştir. Bayrak levhası-kolon-kiriş birleşimine gelen yükler düzgün kuvvet yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemle göre BEÇÇ elemandan dolayı bayrak levhasına etki eden kuvvet ve bu kuvvet nedeniyle bayrak-kiriş, bayrak-kolon birleşim bölgelerine etki eden kuvvetler Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Düzgün kuvvet yöntemine göre bayrak-kiriş-kolon birleşimine etki eden kuvvetler. (Christopoulos 2005’den adapte edilmiştir)

Bayrak-kiriş ve bayrak-kolon birleşimlerine etki edecek kuvvetler (P_{ub} , P_{uc}) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$r = \sqrt{(\alpha + e_c)^2 + (\beta + e_b)^2} \quad (3.16)$$

$$V_{uc} = \frac{\beta}{r} \times P_{maks} \quad (3.17)$$

$$H_{uc} = \frac{e_c}{r} \times P_{maks} \quad (3.18)$$

$$V_{ub} = \frac{e_b}{r} \times P_{maks} \quad (3.19)$$

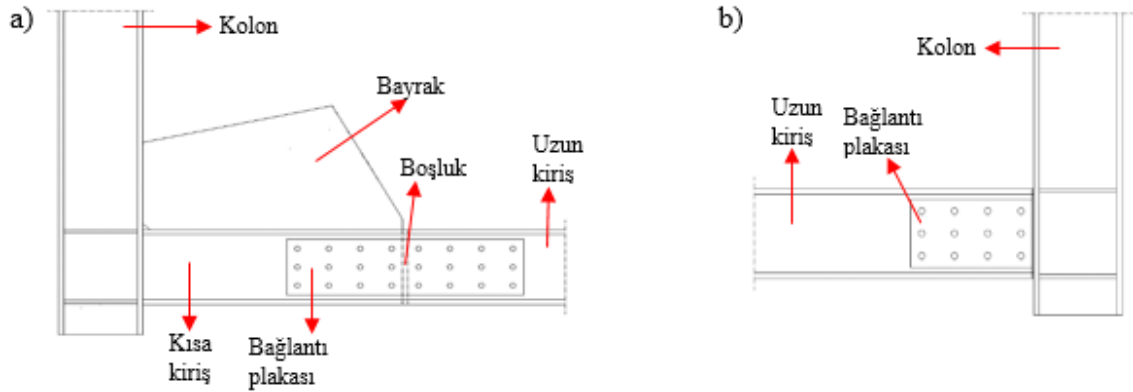
$$H_{ub} = \frac{\alpha}{r} \times P_{maks} \quad (3.20)$$

$$P_{ub} = \sqrt{H_{ub}^2 + V_{ub}^2} \quad (3.21)$$

$$P_{uc} = \sqrt{H_{uc}^2 + V_{uc}^2} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki " α ", " β ", " e_c ", " e_b " Şekil 3.11’de gösterilen bayrak levhasının boyutlarının belirlenmesinde kullanılan ifadelerdir. Bu birleşim bölgesinde

yapılacak olan kaynaklı birleşim hesabı " P_{ub} ", " P_{uc} " kuvvetleri dikkate alınarak yapılır. Denklem 3.16-22'de ifadeler yerine yazıldığında kiriş-bayrak birleşimine etki eden kuvvet (P_{ub}) yaklaşık 827 KN ve kolon-bayrak bölgesine etki eden kuvvet (P_{uc}) yaklaşık 412 KN olarak hesaplanmıştır. Kaynakların tasarımı yapılırken Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliğindeki kurallar esas alınmıştır. Hesapların sonucunda kiriş-bayrak birleşiminde çift sıra 28 cm uzunluğunda, 6 mm kalınlığında ve kolon-bayrak birleşiminde 74 cm uzunluğun, 6 mm kalınlığında çift sıra kaynak yapılması yeterli olacaktır. Çerçeve sistemde 3 deney yapılacak olması ve çevrimsel yük uygulanması sonucunda ortaya çıkacak yorulma etkisi de dikkate alınarak kaynak kalınlıkları 8 mm yapılmıştır. Bayrak-kiriş-kolon birleşimi için yapılan kaynak hesabı Bölüm 7'de detaylı olarak verilmiştir. BEÇÇ elemanın doğrudan yük alabilmesi için ve deney sırasında çerçevede meydana gelebilecek kopma, burkulma gibi durumlarda çerçeve sistemin değişiminin kolay olabilmesi için bulonlu birleşim kullanılmıştır. Bu yüzden Fahnestock v.d (2007) tarafından yapılan çalışmadakine benzer birleşim şekli kullanılmıştır. Bayrak levhasının bulunduğu birleşim bölgesinde bayrak levhası boyu kadar bir kısa kiriş kolon ve bayrak levhasına kaynaklanmıştır. Kısa kiriş ise aralarında 15 mm boşluk bırakılarak uzun kirişe iki adet 30 mm plaka yardımıyla bulonlarla bağlanmıştır (Şekil 3.14.a). Bayrak levhasının olmadığı birleşim bölgesinde kiriş ve kolon 2 adet 30 mm plaka yardımıyla bulonlarla bağlanmıştır (Şekil. 3.14.b).



Şekil 3.14. a) Bayrak-kiriş-kolon birleşim bölgesi; b) Kiriş-kolon birleşim bölgesi

Çerçeve sistemin birleşimi mümkün olduğunca moment aktarmayacak şekilde tasarlanırsa da birleşim bölgelerinde az da olsa moment etkisi meydana gelmektedir. Bu nedenle bağlantı plakası tasarlanırken yaklaşık 1000 KN çekme kuvvetinin yanı sıra momentten dolayı yaklaşık 165 KN kesme kuvveti de etki etmektedir. Bu kuvvetlere göre bağlantı plakasının ve gerekli olan bulon çapı ve adedi Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliğindeki kurallar esas alınarak belirlenmiştir. Buna göre 1000 KN eksenel kuvvet ve 165 KN kesme kuvveti için 10.9 M16-12 adet yüksek mukavemetli bulon ve 30 mm kalınlığında seçilen bağlantı plakası yeterli dayanıma sahiptir. Çerçeve sistemin bağlantı bölgeleri için detaylı hesaplar Bölüm 7'de verilmiştir. BEÇÇ'ler ile bayrak levhası arasındaki bağlantı ÇYTHY'EY'de belirtilen sürtünmeye dayalı tasarım ilkesine göre yapılmıştır.

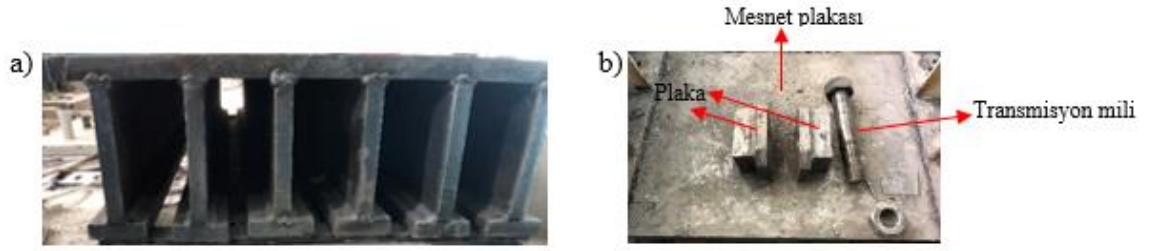
3.2.2. Çerçeve sistemin detayları

Çerçeve sistem için gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra siparişi verilmiş ve Akdeniz Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda montajı gerçekleştirilmiştir. Çerçeve sistem Şekil 3.15'de gösterilen yükleme çerçevesi içerisine kurulmuştur. Çerçeve sistemin yüksekliğinden dolayı yükleme çerçevesinin arası 75 cm açılmıştır.



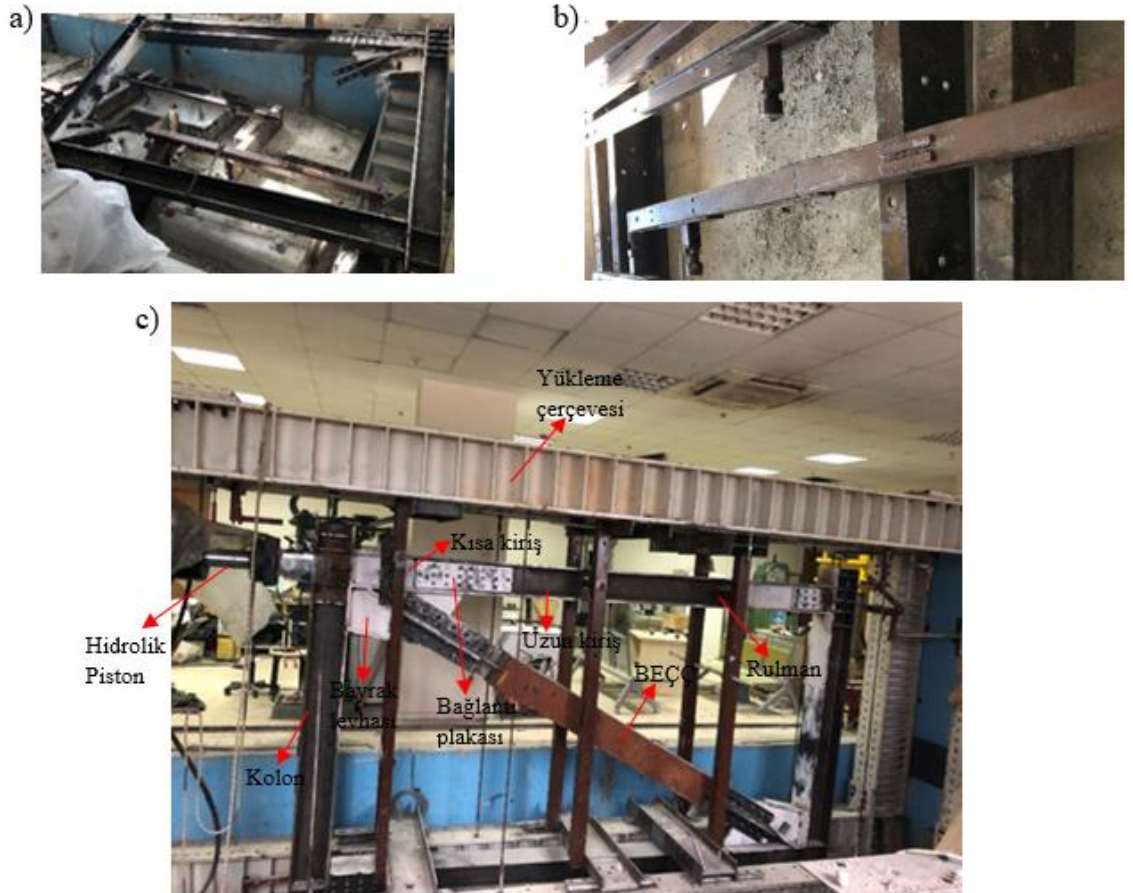
Şekil 3.15. Yükleme Çerçevesi

Şekil 3.16.a'da mesnet plakasının enkesiti görülmektedir. Mesnet plakasının kalınlığı 25 mm'dir. Bu plakayı iki ucu sabit mesnetli ve orta noktasından 100 ton tekil kuvvet etki eden basit bir kiriş olarak düşünülebilir. Mesnet plakası bu haliyle 100 ton kuvvet etki etmesi durumunda elastik sınırlar içinde kalmamaktadır. Bu yüzden mesnet plakasının altına 20 mm kalınlığında 6 adet T profil kaynatılarak eğilme rijitliği artırılmıştır. Şekil 3.16.b'de çerçeve sistemin kolonlarının oturacağı mafsal sistem görülmektedir. Mafsal sistem iç kısımda Mafsal sistem 50 mm çapında delik açılmış plakalar ve 48 mm çapında transmisyon miliyle oluşturulmuştur.



Şekil 3.16. a) Mesnet plakasının enkesiti; b) Mafsal sistem

Şekil 3.17.a'de görüldüğü gibi çerçeve sistemin bağlantıları yapıp vinç yardımıyla yükleme çerçevesine montajı yapılmıştır. Çerçeve sistemin düzlem dışı hareketini engellemek amacıyla Şekil 3.17.b'de görüldüğü gibi laboratuvarında mevcut bulunan profillerin uçlarına rulman kaynatılarak üst kirişin merkezlerine denk gelecek şekilde montajı yapılmıştır. Son olarak Şekil 3.17.c'de görüldüğü çerçeve sisteme BEÇÇ eleman ve hidrolik pistonun montajı yapılarak deney düzeneği hazır duruma getirilmiştir.



Şekil 3.17. a) Çerçeve sistem; b) Düzlem dışı hareketi önleyen mekanizma; c) Deney düzeneği

3.3. Yükleme Protokolü ve LVDT Yerleşimi

Çerçeve sisteme kat ötelemesine dayalı yükleme protokolü uygulanmıştır. Çerçeve sistemin alt kiriş aksından üst kiriş aksına olan yüksekliği 2265 mm'dir. Kat ötelemesi değeri Denklem 3.23'e göre hesaplanmıştır (Türk Deprem Yönetmeliği (2007)). Bu denklemde Δ_i kat ötelemesi, d_i i 'inci kattaki yatay yerdeğiştirme, d_{i-1} $i - 1$ 'inci kattaki yatay yer değıştirme ve h_i kat yüksekliğidir.

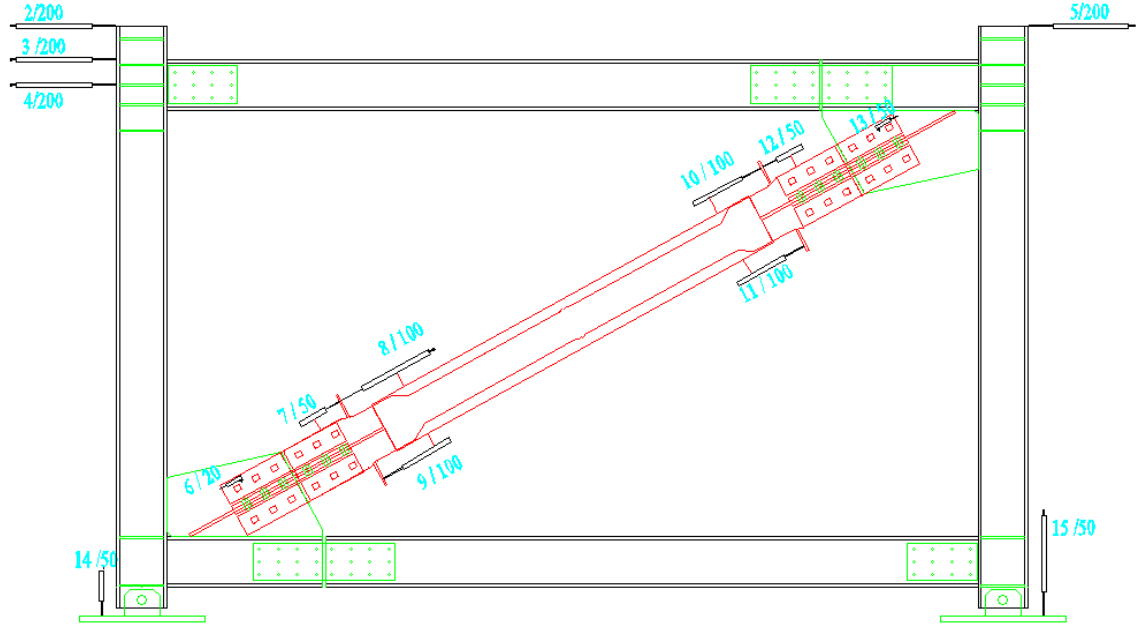
$$\Delta_i = \frac{d_i - d_{i-1}}{h_i} \quad (3.23)$$

Yükleme protokolü deplasman kontrollü hidrolik piston ile çerçeve sisteme uygulanmıştır. Her bir kat ötelemesi deplasman değeri iki kez ve ters çevrimli olarak uygulanmıştır. Yükleme protokolü ile ilgili veriler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yükleme protokolü

Kat Ötelemesi	Deplasman (mm)
0.003	-6.80
	6.80
	-6.80
	6.80
0.005	-11.33
	11.33
	-11.33
	11.33
0.0075	-17.00
	17.00
	-17.00
	17.00
0.01	-22.65
	22.65
	-22.65
	22.65
0.015	-33.98
	33.98
	-33.98
	33.98
0.02	-45.31
	45.31
	-45.31
	45.31
0.025	-56.63
	56.63
	-56.63
	56.63

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi 2,3,4,5 numaralı LVDT’ler BEÇÇ’li çerçeve sistemin tepe deplasman değerlerini, 8,9,10,11 numaralı LVDT’lerden BEÇÇ elemanın aksenal deplasman değerlerini, 6 ve 7 numaralı LVDT’ler alt bağlantı plaklarında meydana gelebilecek kaymaları, 12 ve 13 numaralı LVDT’ler üst bağlantı plaklarında meydana gelebilecek kaymaları, 14 ve 15 numaralı LVDT’ler mesnet plaklarındaki düşey deplasman değerlerini ölçmektedir. Bu ölçüm değerleri kullanılarak BEÇÇ’lerin çerçeve sistem davranışına katkısı elde edilmiştir.



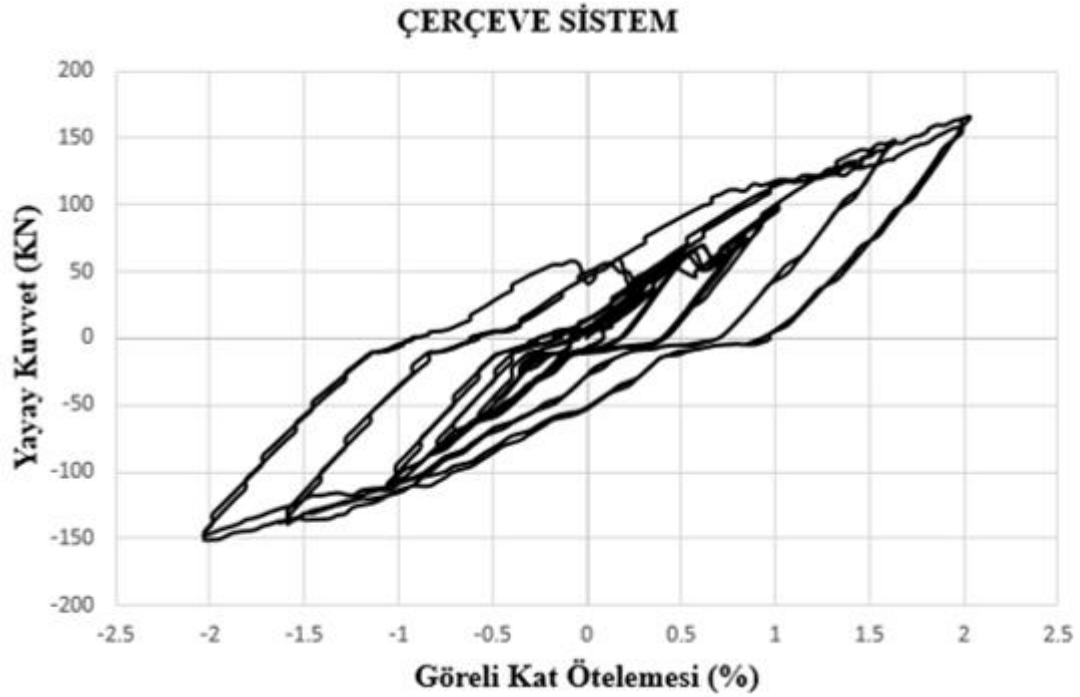
Şekil 3.18. LVDT'lerin yerleşimine ait detay çizimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında AISC (American Intitute of Steel Construction) yönetmeliğinde belirtilen BEÇÇ'lerin çerçeve sistem içerisindeki testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları çerçeve sistemin kolonuna bağlanan yük hücresinden alınan yatay yük değeri, çerçeve sitem ve BEÇÇ'lere bağlanan LVDT'lerden alınan deplasman değerleri ışığında incelenmiştir.

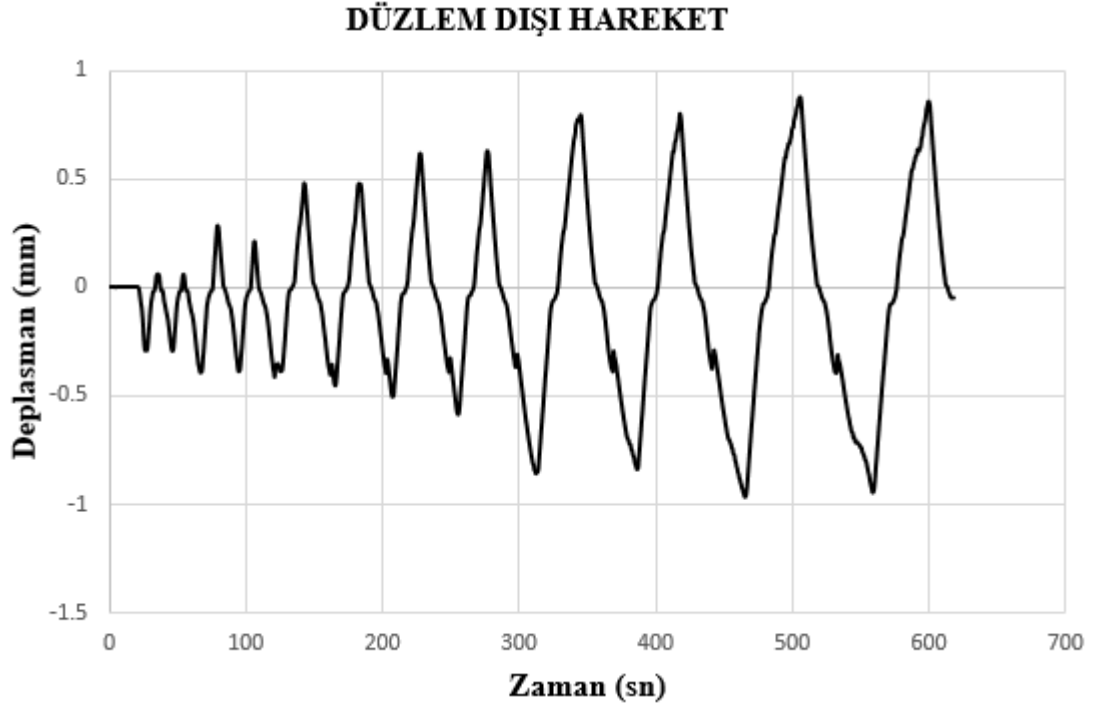
4.1. Boş Çerçeve Deney Sonuçları

Çerçeve sistemin deney düzeneğine sağladığı yatay rijitlik katkısını belirlemek için çerçeve sistem BEÇÇ eleman takılmadan test edilmiştir. Çerçeve sisteme %2.0 kat ötelemesine kadar ters çevrimli yükleme yapılmış ve Şekil 4.1'de görüldüğü gibi çerçeve sistemin yatay kuvvete katkısı yaklaşık 155 KN'dur. Deney sonrası çerçeve sistemde herhangi bir yapısal ya da yapısal olmayan hasar oluşmamıştır.

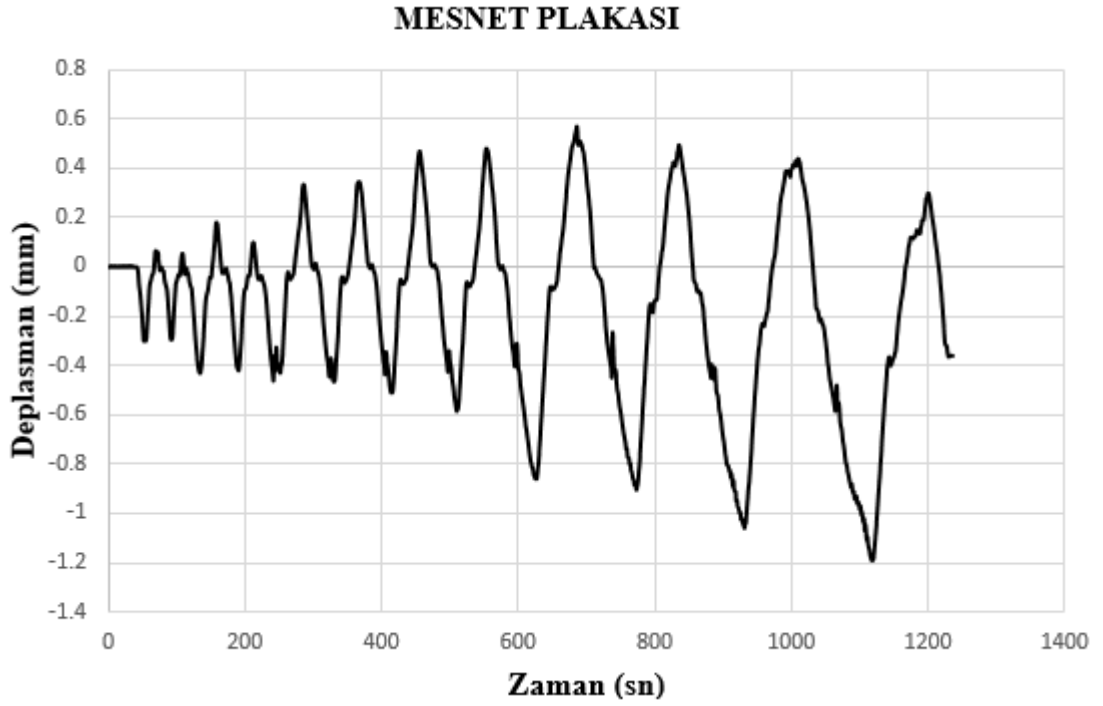


Şekil 4.1. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görel kat ötelemesi grafiği

Şekil 4.2 görüldüğü gibi çerçeve sistemin düzlem dışı yönde en büyük deplasmanı 1 mm'dir. Şekil 4.3 görüldüğü gibi mesnet plaklarında aşağı yönde (çökme) en büyük deplasman 1.2 mm ve yukarı yönde en büyük deplasman 0.6 mm'dir.



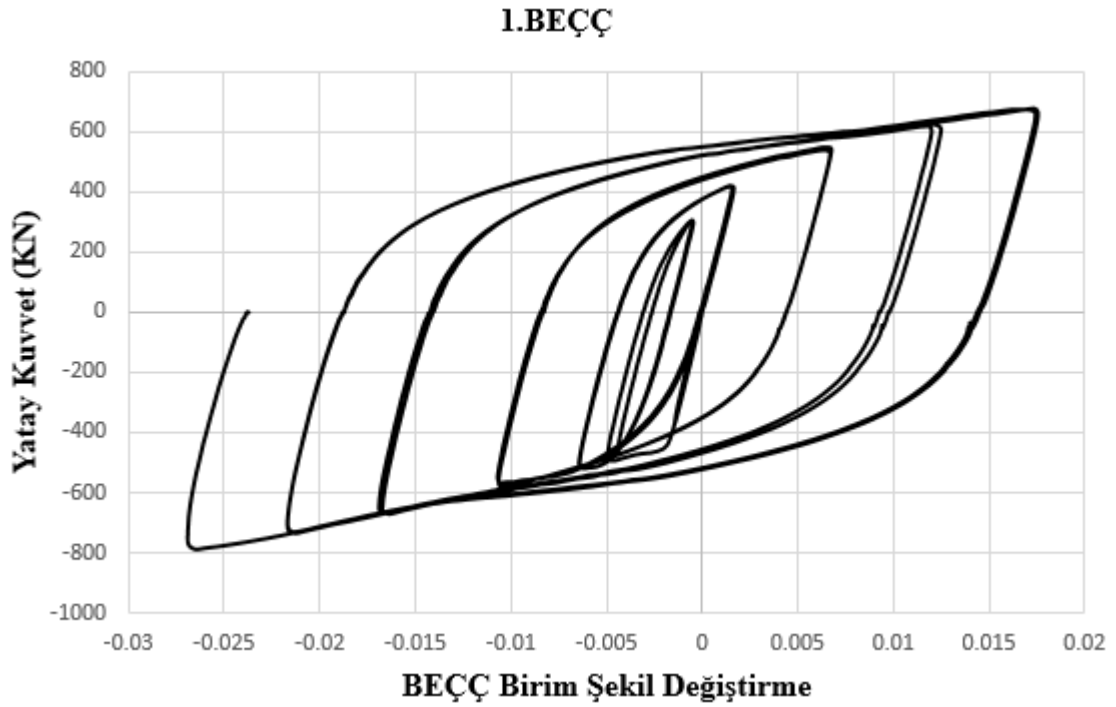
Şekil 4.2. Çerçeve sistemin düzlem dışı hareketine ait deplasman-zaman grafiği



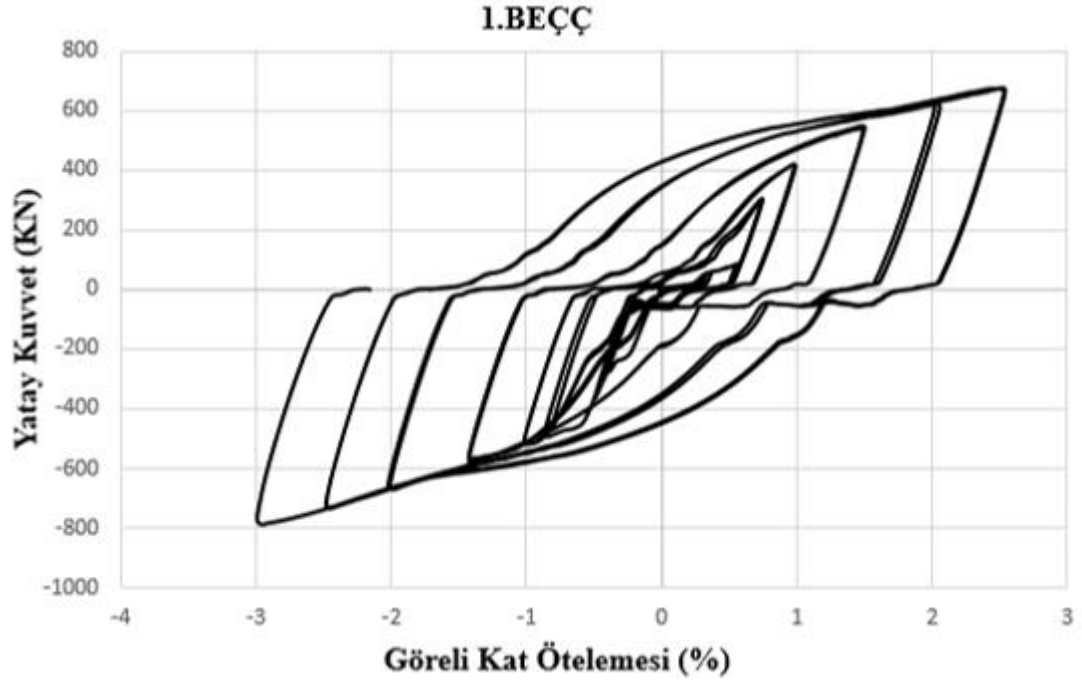
Şekil 4.3. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği

4.2. 1. BEÇÇ’li Çerçeve Deneysel Sonuçları

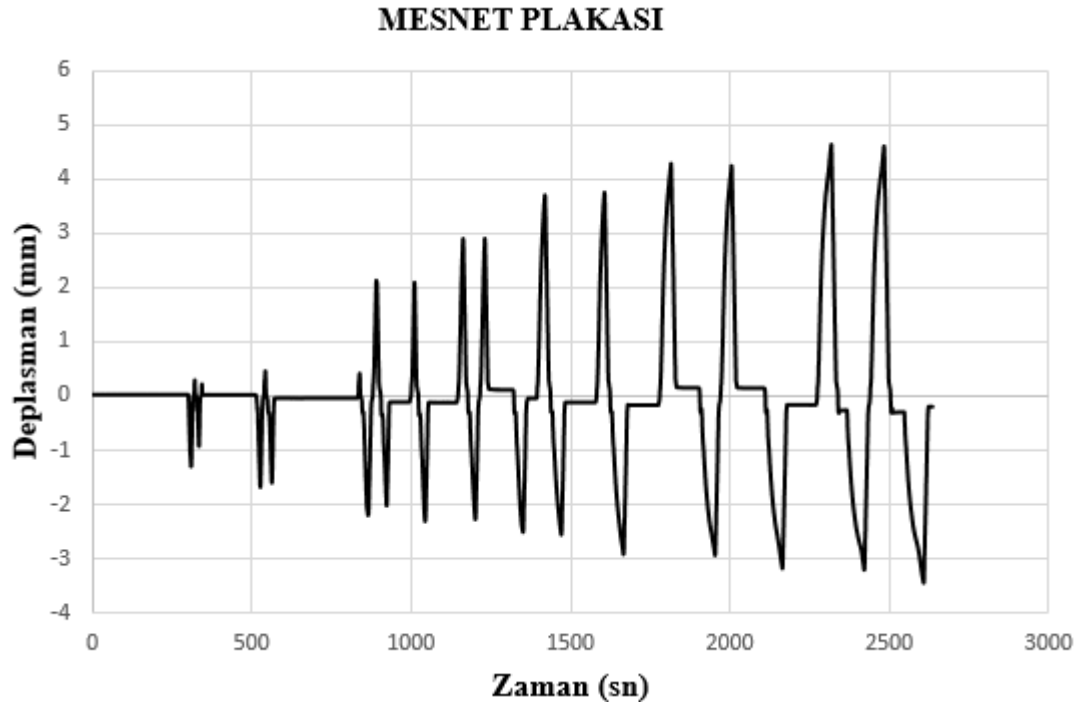
1. BEÇÇ’li çerçeve sistemde Şekil 4.4’de görüldüğü gibi en büyük yatay basınç kuvveti 788.3 KN ve en büyük yatay çekme kuvveti 676.8 KN çıkmıştır. Basınç kapasitesinin çekme kapasitesine oranı 1.16’dır. AISC yönetmeliğinde bu oran için verilen üst sınır 1.3 değerinden küçüktür. Bu değer ÇE ile BEM arasındaki sürtünmenin makul oranda olduğunu göstermektedir. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi çerçeve sistem %3 kat ötelemesine (56.63 mm) kadar test edilmiştir. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi mesnet plaklarında aşağı yönde (çökme) en büyük deplasman 3.45 mm ve yukarı yönde en büyük deplasman 4.63 mm’dir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi bağlantı plakalarında çok az miktarda kaymalar (0.06-0.1 mm) meydana gelmiştir. Deney sonrası çerçeve sistemde herhangi bir yapısal hasar meydana gelmemiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi ÇE’de yerel burkulmalar meydana gelmiştir. Deney sonuçlarına göre 1.BEÇÇ elemanı daha önceki çalışmalarda test edilen ve başarılı olan BEÇÇ’lerle karşılaştırıldığında kararlı bir histeretik davranış göstermiştir. Şekil 4.5’de görülen BEÇÇ’li çerçevenin histeretik davranışında yatay yükün sabit kalması çerçeve sistemin rijit hareketi ve mesnet çökmelerinden kaynaklanmaktadır.



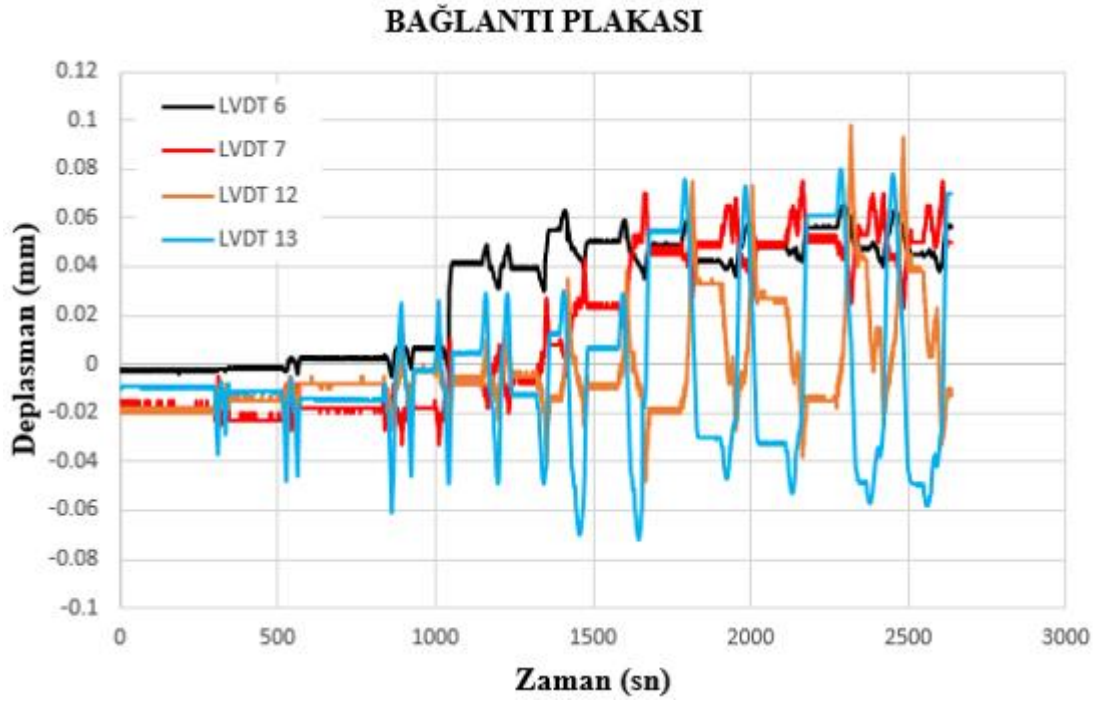
Şekil 4.4. 1.BEÇÇ elemana ait yatay kuvvet-birim şekil değişirme grafiği



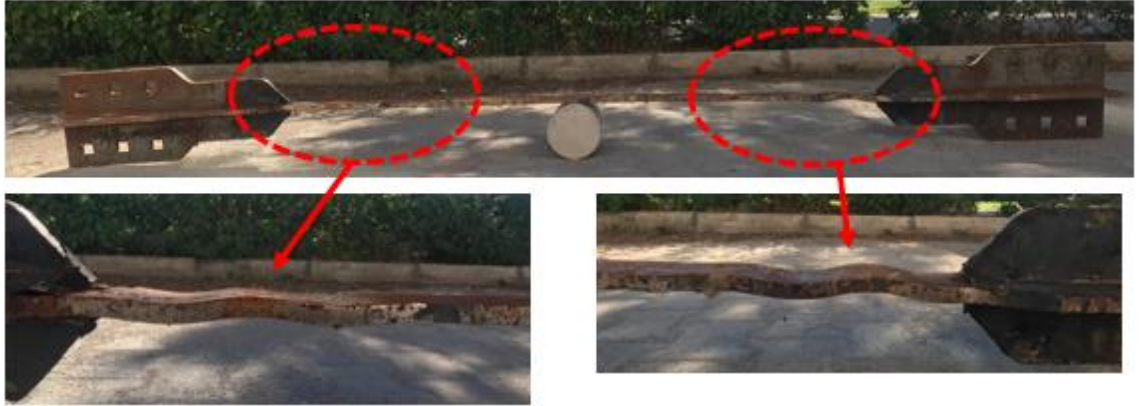
Şekil 4.5. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görelî kat ötelemesi grafiği



Şekil 4.6. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.7. Bağlantı plakalarına ait deplasman-zaman grafiği

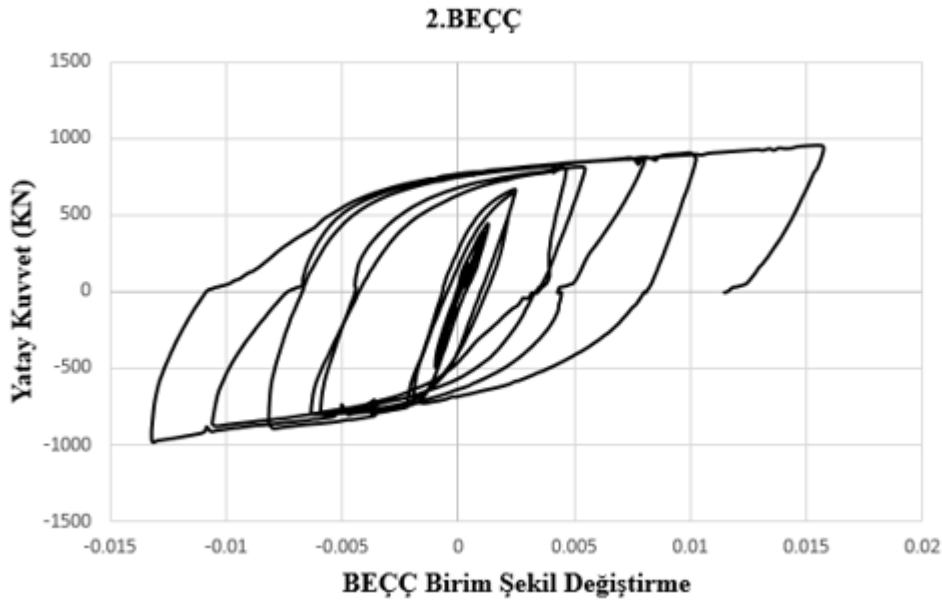


Şekil 4.8. Deney sonrası 1.BEÇÇ elemanda meydana gelen deformasyonlar

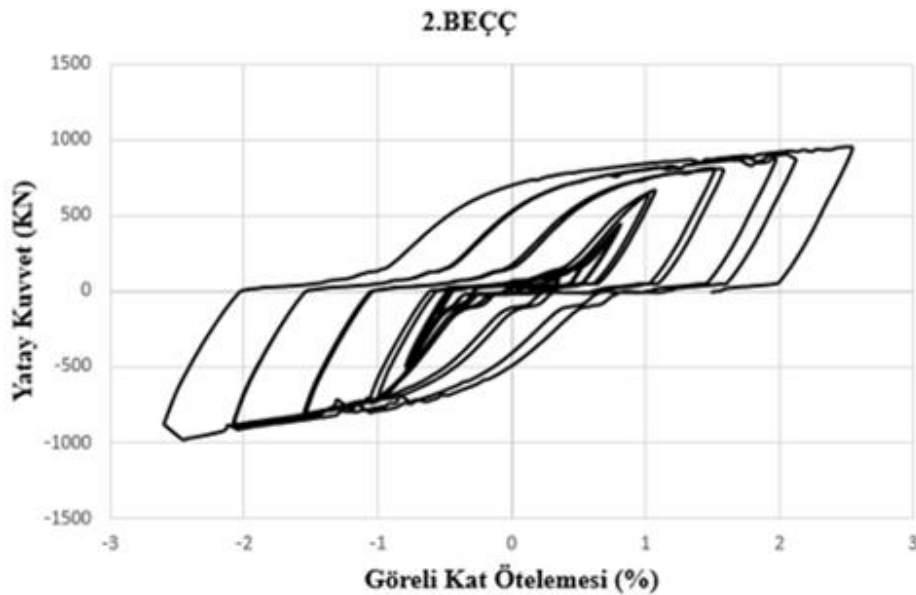
4.3. 2. BEÇÇ'li Çerçeve Deney Sonuçları

2. BEÇÇ'li çerçeve sistemde Şekil 4.9'da görüldüğü gibi en büyük yatay basınç kuvveti 977.8 KN ve en büyük yatay çekme kuvveti 954.1 KN çıkmıştır. Basınç kapasitesinin çekme kapasitesine oranı 1.02'dir. AISC yönetmeliğinde bu oran için verilen üst sınır 1.3 değerinden küçüktür. Bu değer ÇE ile BEM arasındaki sürtünmenin makul oranda olduğunu göstermektedir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi çerçeve sistem %2.5 kat ötelemesine (56.63 mm) kadar test edilmiştir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi mesnet plaklarında aşağı yönde (çökme) en büyük deplasman 4.34 mm ve yukarı yönde en büyük deplasman 6.65 mm'dir. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi bağlantı plakalarında önemli miktarda kaymalar meydana gelmiştir. Üst bağlantı plakalarında en büyük kayma

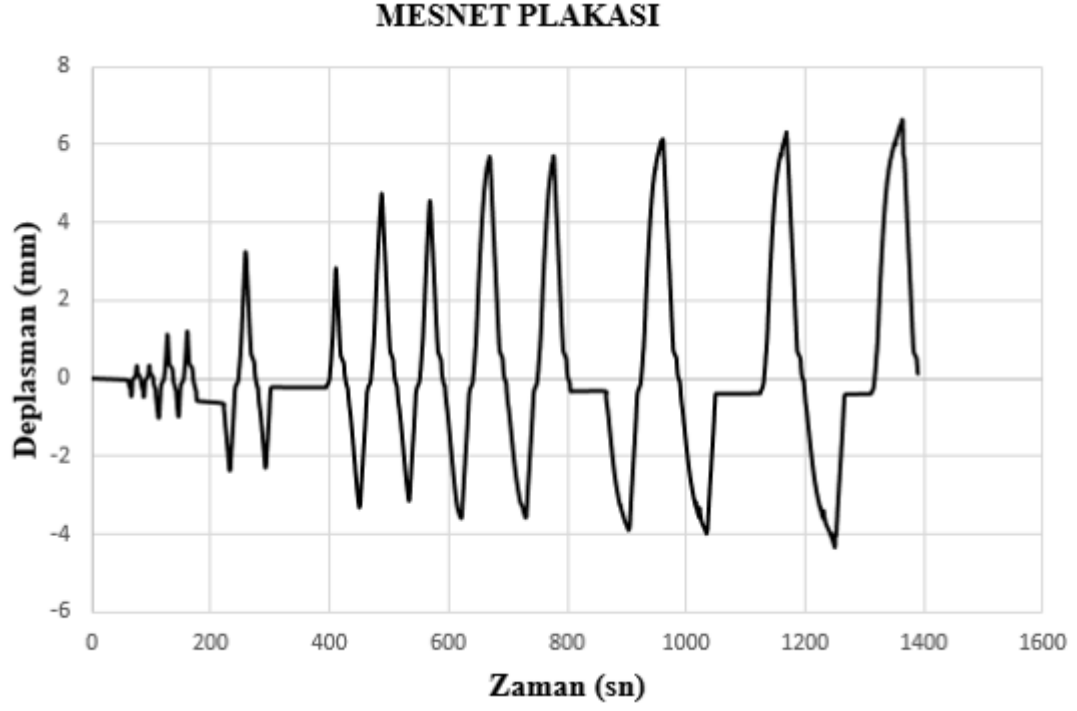
değeri 5.22 mm ve alt bağlantı plakalarında en büyük kayma değeri 4.42 mm'dir. Bu yüzden 2.BEÇÇ elemanın deplasman talebi %1.5 birim şekil değiştirmede kalmıştır ve 2. BEÇÇ eleman aksenal deplasman açısından simetrik histeretik davranış gözlemlenmemiştir. Deney sonrası çerçeve sistemde herhangi bir yapısal ya da yapısal olmayan hasar meydana gelmemiştir. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi deney BEÇÇ eleman çekme bölgesindeyken durdurulduğu için 2.BEÇÇ elemanda deformasyonlar gözlemlenmemiştir. Şekil 4.10'da görülen BEÇÇ'li çerçevenin histeretik davranışında yatay yükün sabit kalması çerçeve sistemin rijit hareketi ve mesnet çökmelerinden kaynaklanmaktadır.



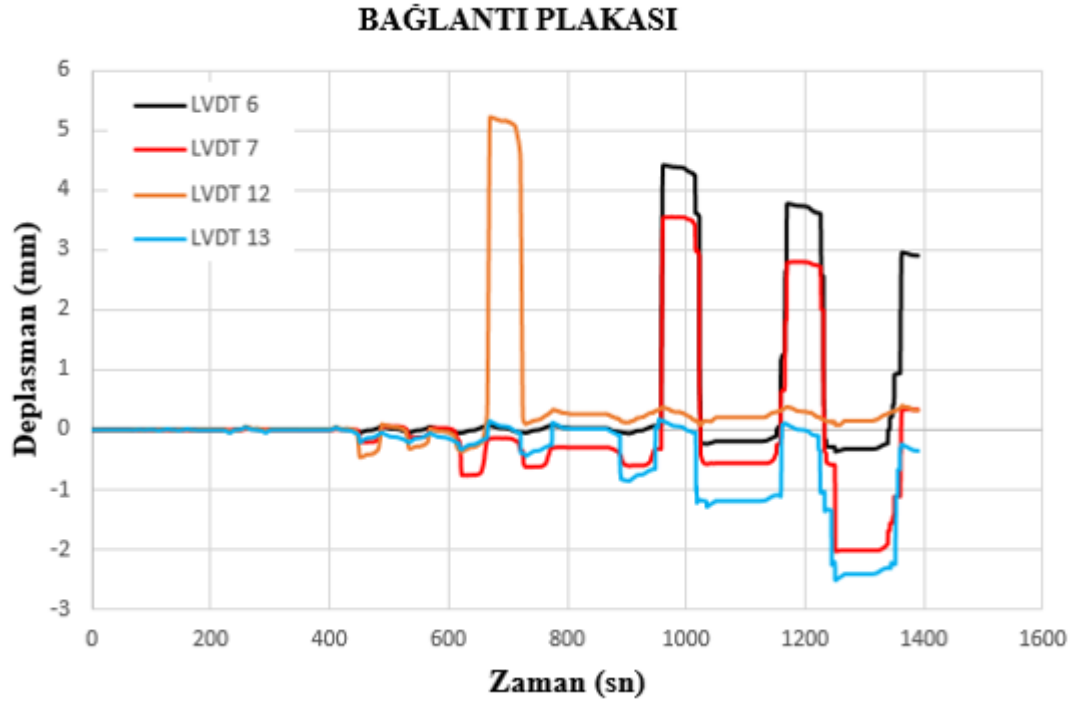
Şekil 4.9. 2.BEÇÇ elemana ait yatay kuvvet-birim şekil değişirme grafiği



Şekil 4.10. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görel kat ötelemesi grafiği



Şekil 4.11. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği



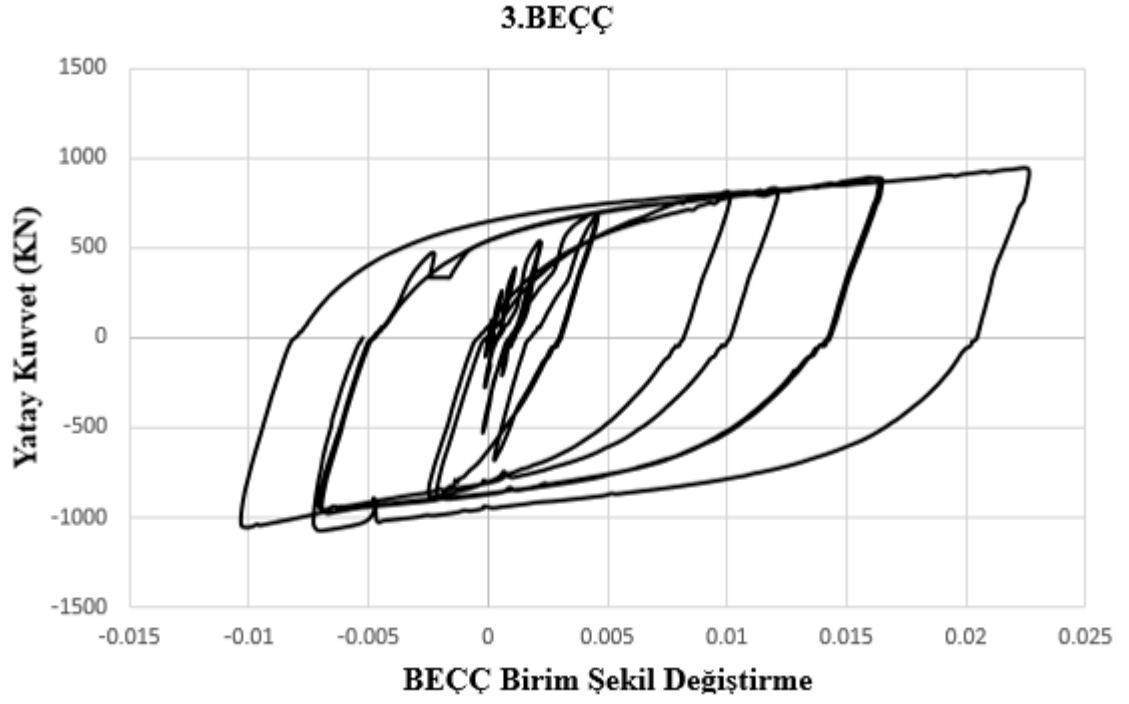
Şekil 4.12. Bağlantı plakalarına ait deplasman-zaman grafiği



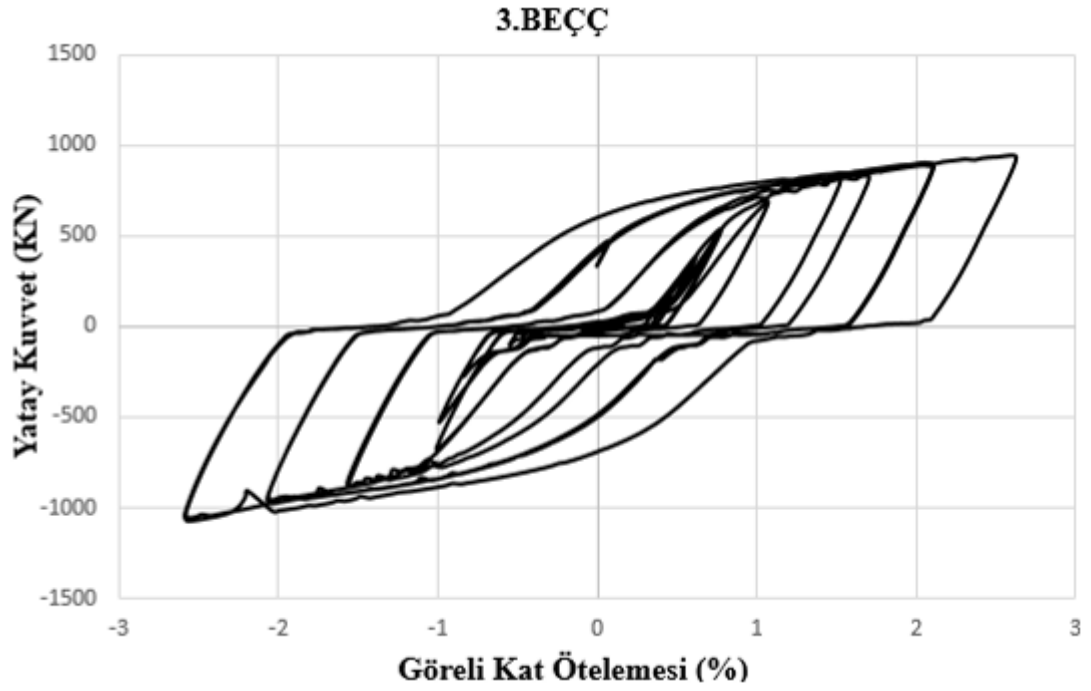
Şekil 4.13. Deney sonrası 2.BEÇÇ elemanda meydana gelen deformasyonlar

4.4. 3. BEÇÇ’li Çerçeve Deney Sonuçları

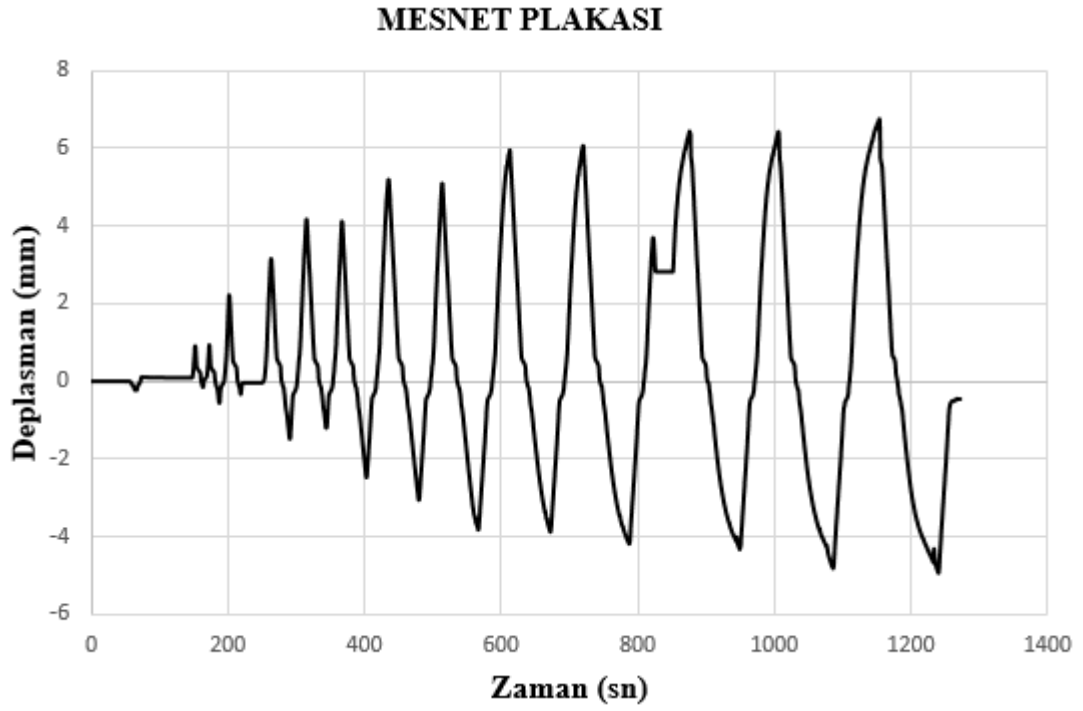
3.BEÇÇ’li çerçeve sistemde Şekil 4.14’de görüldüğü gibi en büyük yatay basınç kuvveti 1073.6 KN ve en büyük yatay çekme kuvveti 944.3 KN çıkmıştır. Basınç kapasitesinin çekme kapasitesine oranı 1.14’dir. AISC yönetmeliğinde bu oran için verilen üst sınır 1.3 değerinden küçüktür. Bu değer ÇE ile BEM arasındaki sürtünmenin makul oranda olduğunu göstermektedir. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi çerçeve sistem %2.5 kat ötelemesine (56.63 mm) kadar test edilmiştir. Şekil 4.16’da görüldüğü gibi mesnet plaklarında aşağı yönde (çökme) en büyük deplasman 4.93 mm ve yukarı yönde en büyük deplasman 6.76 mm’dir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi alt bağlantı plakalarında çok az miktarda kaymalar meydana gelmiştir. Üst bağlantı plakalarında ise önemli miktarda kayma gerçekleşmiştir. Üst bağlantı plakalarında en büyük kayma değeri 5.35 mm’dir. Ayrıca bu deneyde çerçeve sistemde yorulma etkisinden dolayı çerçeve sistemde hasarlar meydana gelmiştir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi alt kirişin kolon ile bağlantısını sağlayan plakaların kaynakları kopmuş ve üst kirişin kolonla bağlantısını sağlayan plakaların kaynaklarında çatlaklar meydana gelmiştir. Bu nedenlerden dolayı 3.BEÇÇ elemanın basınç etkisi altında deplasman talebi %1.0 birim şekil değiştirmede kalmıştır. Sonuç olarak 3. BEÇÇ eleman her ne kadar aksel kapasite açısından simetrik davranış gösterse de aksel deplasman simetrik olmayan bir histeretik davranış göstermiştir. Şekil 4.19’da görüldüğü gibi ÇE’de yerel burkulmalar meydana gelmiştir. Şekil 4.15’de görülen BEÇÇ’li çerçevenin histeretik davranışında yatay yükün sabit kalması çerçeve sistemin rijit hareketi ve mesnet çökmelerinden kaynaklanmaktadır.



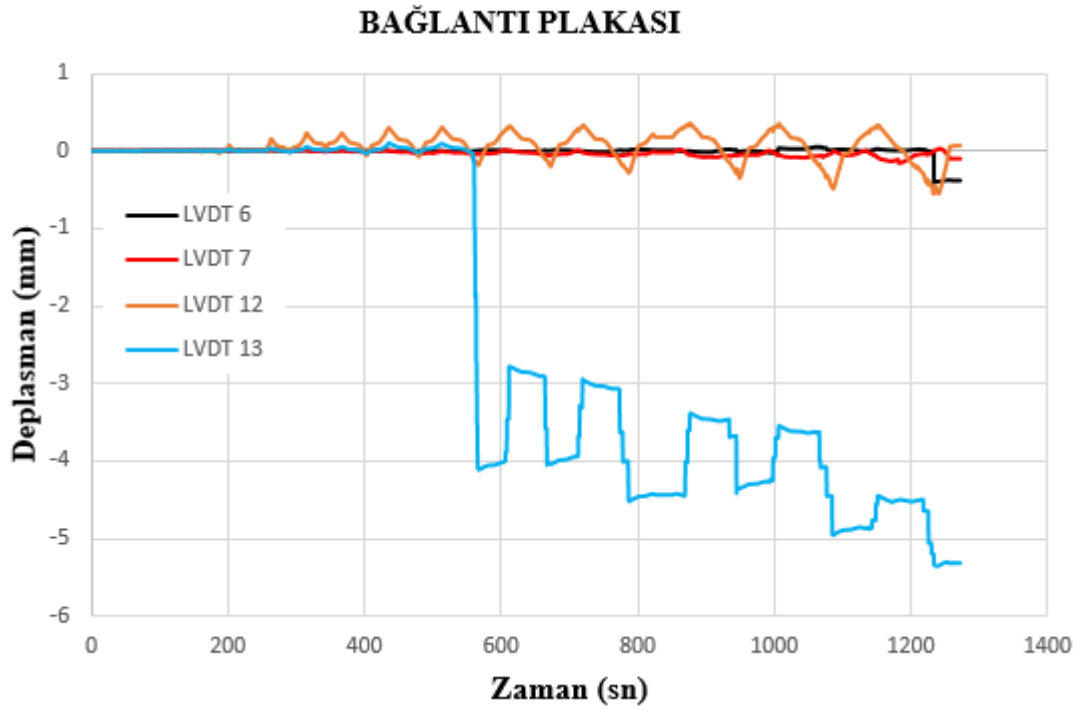
Şekil 4.14. 3.BEÇÇ elemana ait yatay kuvvet-birim şekil değişirme grafiği



Şekil 4.15. Çerçeve sisteme ait yatay kuvvet-görel kat ötelemesi grafiği



Şekil 4.16. Mesnet plakasına ait deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.17. Bağlantı plakalarına ait deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.18. Deney sonrası çerçeve sistemde meydana gelen hasarlar



Şekil 4.19. Deney sonrası 3.BEÇÇ elemanda meydana gelen deformasyonlar

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 3 adet BEÇÇ'li çerçeve ters çevirimli statik yükler altında test edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda BEÇÇ'li çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, BEÇÇ'lerde meydana gelen aksel birim şekil değiştirmeler incelenmiştir.

En kesit alanı 15x100mm olan, ek uç stabilitenin plakalar ile sağlandığı 1. BEÇÇ'de aksel çekme ve basınç birim şekil değiştirme değeri sırasıyla % 1.75 ve % 2.69'dur. Bu BEÇÇ elemanı aksel basınç istemleri altında %2.69 değerine kadar yüklenmesine rağmen lokal ve global deformasyona uğramamış ve çerçeve sisteme simetrik histeretik davranış sağlamıştır. Dolayısı ile elde edilen BEÇÇ detayı kabul edilebilir durumdadır.

En kesit alanı 15x150mm olan ek uç stabilitenin kutu profil ve lamalar ile sağlandığı 2. BEÇÇ'de aksel çekme ve basınç birim şekil değiştirme değeri sırasıyla % 1.57 ve % 1.32'dir. Söz konusu elemanda lokal ve global herhangi bir yapısal hasar meydana gelmemiştir. 2. BEÇÇ'li çerçeve testinde ise BEÇÇ ve bayrak levhası arasındaki plakaların bağlantısında kullanılan sürtünme etkili birleşim detayı kullanılan ÇE'nin malzeme akma dayanımının yüksek olmasından dolayı istenilen şekilde çalışmamıştır. Dolayısı ile plakalar arasındaki kayma BEÇÇ'lerin istenilen seviyelere kadar yüklenmesine olanak vermemiştir. Sonuç olarak 2. BEÇÇ elemanında mevcut aksel talepler altında lokal ve global deformasyona uğramadan simetrik histeretik davranış göstermiştir. Söz konusu BEM ve uç stabilite uygulaması yüksek aksel deformasyon talepleri altında BEÇÇ'lere yeterli stabilite sağlamıştır.

En kesit alanı 15x150mm olan ek uç stabilitenin plakalar ile sağlandığı 3. BEÇÇ'de aksel çekme ve basınç birim şekil değiştirme değeri sırasıyla % 2.26 ve % 1.03'dir. Söz konusu elemanda lokal ve global herhangi bir yapısal hasar meydana gelmemiştir. 3. BEÇÇ'li çerçeve testinde ise BEÇÇ ve bayrak levhası arasındaki plakaların bağlantısında kullanılan sürtünme etkili birleşim detayı kullanılan ÇE'nin malzeme akma dayanımının yüksek olmasından dolayı istenilen şekilde çalışmamıştır. Dolayısı ile plakalar arasındaki kayma BEÇÇ'lerin istenilen seviyelere kadar yüklenmesine olanak vermemiştir. 3. BEÇÇ'li çerçeve deneyinde tekrarlı yüklemelerden dolayı kaynaklarda yorulma etkisi ortaya çıkmış ve yüklemenin son döngüsünde (%2.5 görel kat ötelemesi) giriş-kolon birleşim bölgelerindeki kaynaklarda kopmalar ve çatlaklar meydana gelmiştir. Sonuç olarak 3. BEÇÇ elemanında mevcut aksel talepler altında lokal ve global deformasyona uğramadan simetrik histeretik davranış göstermiştir. Söz konusu BEM ve uç stabilite uygulaması yüksek aksel deformasyon talepleri altında BEÇÇ'lere yeterli stabilite sağlamıştır.

Söz konusu BEÇÇ'lerin üretiminde kullanılan ÇE malzemelerinin St 37 çeliği yani 235 MPa nominal akma dayanımı beklenmesine rağmen akma kapasitesinin çok yüksek olduğu görülmüştür. Bu deney sonuçlarına göre ülkemizde üretilecek olan BEÇÇ elemanlarda ÇE'nin imal edileceği çelik malzemenin dayanımı ön testlerden geçirilmelidir. Bu sebeple kupon testlerinin yapılması bir zorunluluk haline gelmelidir. BEÇÇ ve bayrak levhası arasındaki bağlantı sürtünme etkili birleşim detayı olmasından

dolayı plakalar arasında meydana gelen kayma miktarı beklenenden fazla olmuştur. Bu durum BEÇÇ'lerin tahmin edilen aksenal yükten fazla kapasiteye ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar bu yük değeri fazla olsada kullanılan denklem için sürtünme katsayısı, detaylı şekilde tayin edilmelidir.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında belirtilen detaylara uygun üretilen BEÇÇ'ler çerçeve sistem içerisinde yeterli histeretik davranışı göstermiştir.

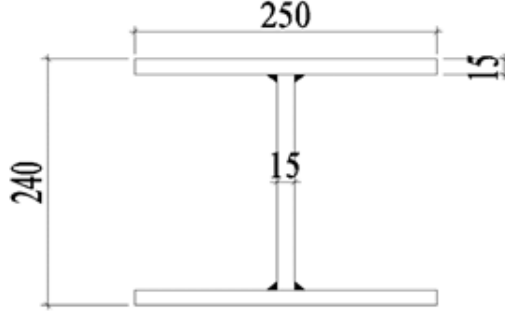
6. KAYNAKLAR

- Aiken, I.D. Mahin, S.A. and Uriz, P. 2002. Large-Scale Testing of Buckling-Restrained Braced Frames. Japan Passive Control Symposium, December, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- Black, G.R. Wenger, B.A. and Popov, P.E. 1980. Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals. University of California, Report No: UCB/EERC-80/40, Berkeley, California, USA
- Black, C.J. Makris, N. and Aiken, I.D. 2004. Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-Restrained Braces. *Journal of Structural Engineering*, 130(6): 880-894.
- Chen, Q. Wang, C. Meng, S. and Zeng, B. 2016. Effect of Unbonding Materials on The Mechanic behavior of All-Steel Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structure*, 111(2016): 478-493.
- Christopoulos, A.S. 2005. Improved Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frames. Msc Thesis, University of Washington, USA, 306 pp.
- Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği 2017. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 1. Baskı: 452 s.
- Clark, P.W. Aiken, I.D. Kasai, K. and Kimura, I. 2000. Large-Scale Testing of Steel Unbonded Braces for Energy Dissipation. Structures Congress, May, ASCE/SEI, USA.
- Doran, B. Şenol, E. ve Köse, İ. 2018. Betonarme Yapılarda Burkulması Önlenmiş Çelik Çapraz Elemanların Doğrusal Olmayan Davranışa Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59): 299-314.
- 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(9): 1205-1214.
- Iwata, M. Kato, T. and Wada, A. 2000. Buckling Restrained Braces as Hysteretic Dampers. Proceeding of The Third International Conference STESSA, pp 33-38, 21-24 August, Montreal, Canada.
- Judd, J.P. Marinovic, I. Eatherton, M.R. Hyder, C. Phillips, A.R. Tola, A.T. and Charney F.A. 2016. Cyclic Test of All-Steel Web-Restrained Buckling Restrained. *Journal of Constructional Steel Research*, 125(2016): 164-172
- Merritt, S. Uang, C.M. and Benzoni, G. 2003. Subassembly Testing of Corebrace Buckling-Restrained Braces. University of California, Report No: TR-2003/01, San Diego, USA

- Özçelik, R. 2016. Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3): 160-170.
- Özçelik, R. Dikiciaşık, Y. Erdil, E.F. 2016. The Development of The Buckling Restrained Braces With New End Restrains. *Journal of Contruictional Steel Research*, 138(2017): 208-220
- Judd, J.P. Marinovic, I. Eatherton, M.R. Hyder, C. Phillips, A.R. Tola, A.T. and Charney F.A. 2016. Cyclic Test of All-Steel Web-Restrained Bucklinng Restrained. *Journal of Contruictional Steel Research*, 125(2016): 164-172
- 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 Engineering and Structural Dynamics*, 37(7): 1081-1098
- Tsai, K.C. Hsiao, P.C. 2008. Pseudo-Dynamic Tests of A Full-Scale CFT/BRB Frame Part II: Seismic Performance of Buckling-Restrained Braces and Connection *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(7): 1099-1115
- Wilson, E. L. 2018. Analysis Reference Manual for SAP2000. Berkeley, CA, USA: CSI, Computers and Structures

7. EKLER

Çerçeve sistemin tüm hesaplar Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği dikkate alınarak yapılmıştır. Çerçeve sistemi oluşturan kiriş ve kolon elemanlar aynı enkesit özelliklerine sahiptir. Şekil 7.1’de kiriş ve kolon için en kesit detayı gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Kiriş ve kolon elemanlarına ait enkesit detayı

7.1. Kiriş Elemanın Tasarımı

$$A = 2 \times (b \times t_f) + t_w \times (h - 2 \times t_f)$$

$$A = 2 \times (25 \times 1.5) + 1.5 \times (24 - 2 \times 1.5) = 106.5 \text{ cm}^2$$

$$I_x = \frac{t_w \times (h - 2 \times t_f)^3}{12} + 2 \times \left(\left(\frac{b \times t_f^3}{12} \right) + \left(b \times t_f \times \left(\frac{h - t_f}{2} \right)^2 \right) \right)$$

$$I_x = \frac{1.5 \times (24 - 2 \times 1.5)^3}{12} + 2 \times \left(\left(\frac{25 \times 1.5^3}{12} \right) + \left(25 \times 1.5 \times \left(\frac{24 - 1.5}{2} \right)^2 \right) \right) = 10663.9 \text{ cm}^4$$

$$I_y = \frac{t_w^3 \times (h - 2 \times t_f)}{12} + 2 \times \left(\frac{b \times t_f^3}{12} \right)$$

$$I_y = \frac{1.5^3 \times (24 - 2 \times 1.5)}{12} + 2 \times \left(\frac{25 \times 1.5^3}{12} \right) = 3912.16 \text{ cm}^4$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$i_x = \sqrt{\frac{10663.9}{106.5}} = 10.01 \text{ cm}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{3912.16}{106.5}} = 6.06 \text{ cm}$$

7.1.1. Eksenel basınç kuvveti altında başlıklar için kompaktlık kontrolü

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{k_c \times E}{F_y}} = \sqrt{\frac{0.76 \times 20000}{23.5}} = 16.28$$

$$\lambda = \frac{b}{2 \times t_f} = \frac{25}{2 \times 1.5} = 8.33$$

$\lambda < \lambda_r$ Kompakt

7.1.2. Eksenel basınç kuvveti altında gövde için kompaktlık kontrolü

$$\lambda_r = 1.49 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.49 \times \sqrt{\frac{20000}{23.5}} = 43.47$$

$$\lambda = \frac{h - 2 \times t_f}{t_w} = \frac{24 - 2 \times 1.5}{1.5} = 14$$

$\lambda < \lambda_r$ Kompakt

7.1.3. Kiriş elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımı

$$\frac{K_y \times L}{i_y} = \frac{1 \times 410}{6.06} = 67.66 \text{ (Narinlik Oranı)}$$

$$4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4.71 \times \sqrt{\frac{20000}{23.5}} = 137.4$$

$$\frac{K_y \times L}{i_y} < 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{K_y \times L}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000}{(67.66)^2} = 43.12 \text{ KN/cm}^2 \text{ (Elastik Burkulma Gerilmesi)}$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{f_y}{F_e}} \right] \times f_y = \left[0.658^{\frac{23.5}{43.12}} \right] \times 23.5 = 18.71 \text{ KN/cm}^2 \text{ (Kritik Burkulma Gerilmesi)}$$

$$\phi \times P_n = \phi \times F_{cr} \times A = 0.9 \times 18.71 \times 106.5 = 1793.35 \text{ KN}$$

1000 < 1793.35 Kiriş eleman yeterli dayanıma sahiptir.

7.2. Kolon Elemanın Tasarımı

$$A = 2 \times (b \times t_f) + t_w \times (h - 2 \times t_f)$$

$$A = 2 \times (25 \times 1.5) + 1.5 \times (24 - 2 \times 1.5) = 106.5 \text{ cm}^2$$

$$I_y = \frac{t_w \times (h - 2 \times t_f)^3}{12} + 2 \times \left(\left(\frac{b \times t_f^3}{12} \right) + \left(b \times t_f \times \left(\frac{h - t_f}{2} \right)^2 \right) \right)$$

$$I_y = \frac{1.5 \times (24 - 2 \times 1.5)^3}{12} + 2 \times \left(\left(\frac{25 \times 1.5^3}{12} \right) + \left(25 \times 1.5 \times \left(\frac{24 - 1.5}{2} \right)^2 \right) \right) = 10663.9 \text{ cm}^4$$

$$I_x = \frac{t_w^3 \times (h - 2 \times t_f)}{12} + 2 \times \left(\frac{b \times t_f^3}{12} \right)$$

$$I_x = \frac{1.5^3 \times (24 - 2 \times 1.5)}{12} + 2 \times \left(\frac{25 \times 1.5^3}{12} \right) = 3912.16 \text{ cm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{10663.9}{106.5}} = 10.01 \text{ cm}$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$i_x = \sqrt{\frac{3912.16}{106.5}} = 6.06 \text{ cm}$$

7.2.1. Eksenel basınç kuvveti altında başlıklar için kompaktlık kontrolü

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{k_c \times E}{F_y}} = \sqrt{\frac{0.76 \times 20000}{23.5}} = 16.28$$

$$\lambda = \frac{b}{2 \times t_f} = \frac{25}{2 \times 1.5} = 8.33$$

$\lambda < \lambda_r$ Kompakt

7.2.2. Eksenel basınç kuvveti altında gövde için kompaktlık kontrolü

$$\lambda_r = 1.49 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.49 \times \sqrt{\frac{20000}{23.5}} = 43.47$$

$$\lambda = \frac{h - 2 \times t_f}{t_w} = \frac{24 - 2 \times 1.5}{1.5} = 14$$

$\lambda < \lambda_r$ Kompakt

7.2.3. Kolon elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımı

$$\frac{K_x \times L}{i_x} = \frac{1 \times 410}{6.06} = 67.66 \text{ (Narinlik Oranı)}$$

$$4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4.71 \times \sqrt{\frac{20000}{23.5}} = 137.4$$

$$\frac{K_x \times L}{i_x} < 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{K_x \times L}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000}{(67.66)^2} = 43.12 \text{ KN/cm}^2 \text{ (Elastik Burkulma Gerilmesi)}$$

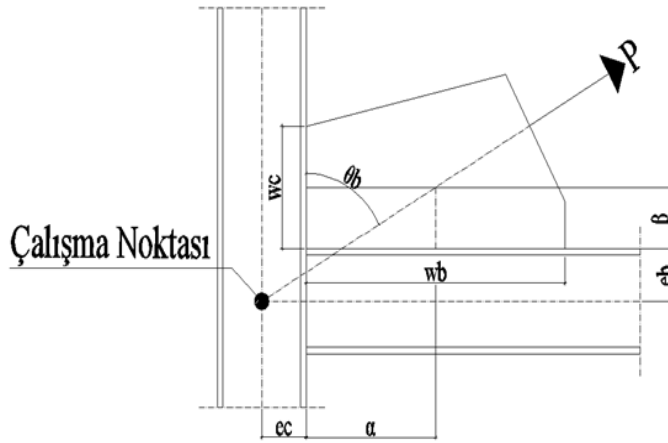
$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{f_y}{F_e}} \right] \times f_y = \left[0.658^{\frac{23.5}{43.12}} \right] \times 23.5 = 18.71 \text{ KN/cm}^2 \text{ (Kritik Burkulma Gerilmesi)}$$

$$\phi \times P_n = \phi \times F_{cr} \times A = 0.9 \times 18.71 \times 106.5 = 1793.35 \text{ KN}$$

553 < 1793.35 Kolon eleman yeterli dayanıma sahiptir.

7.3. Bayrak Levhasının Tasarımı

Bayrak levhası tasarımında Düzgün Kuvvet Yöntemi (Uniform Force Method) kullanılmıştır (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. Düzgün Kuvvet Yöntemi (Christopoulos 2005'den adapte edilmiştir)

$$e_b = \frac{d_b}{2} \quad e_c = \frac{d_c}{2}$$

$$\alpha = \frac{w_b}{2} \quad \beta = \frac{w_c}{2}$$

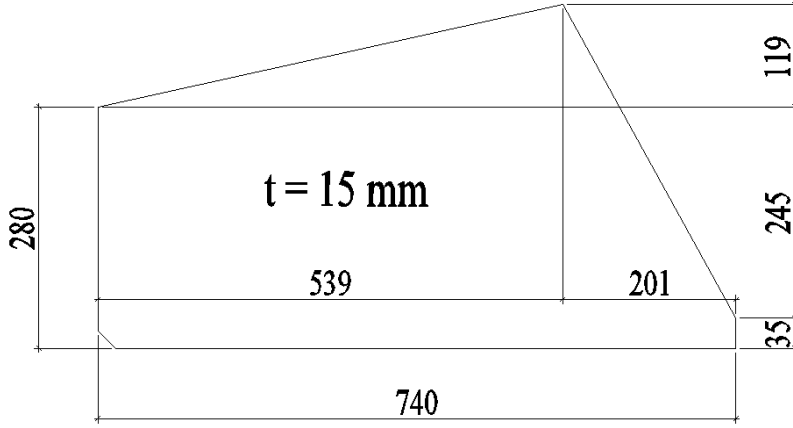
$$\alpha - \beta \times \tan\theta_b - e_b \times \tan\theta_b + e_c = 0$$

$$w_c = \frac{w_b + d_c}{\tan \theta_b} - d_b$$

$$d_c = d_b = 24 \text{ cm}$$

$$w_b = 70 \text{ cm} \quad \theta_b = 61.088^\circ$$

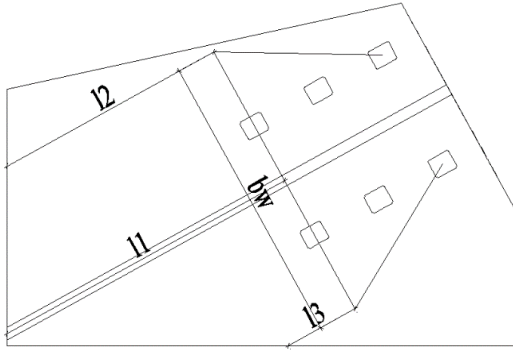
$$w_c = \frac{70 + 24}{\tan 61.088^\circ} - 24 = 28 \text{ cm}$$



Şekil 7.3. Bayrak levhasına ait detay çizimi

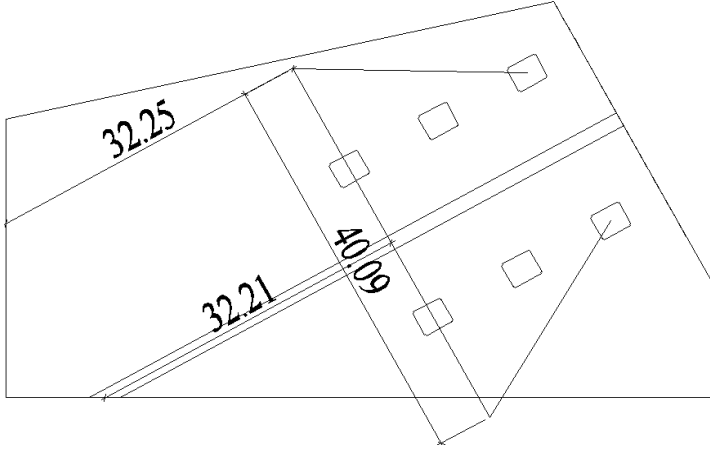
7.3.1. Bayrak levhasının karakteristik basınç kuvveti dayanımı

Bayrak levhasının karakteristik basınç dayanımı belirlenirken Thornton yöntemi kullanılmıştır (Christopoulos (2005)).



Şekil 7.4 Thornton Yöntemi (Christopoulos 2005'den adapte edilmiştir)

Bu yöntemin hesaplarında kullanılacak uzunluk parametreleri cm cinsinden Şekil 7.5’de verilmiştir.



Şekil 7.5. Thornton yönteminde kullanılacak parametre değerleri

$$l_t = \min \left(l_2, \frac{(l_1 + l_2 + l_3)}{3} \right)$$

$$l_t = \min \left(32.25, \frac{(32.21 + 32.25 + 0)}{3} \right) = 21.49 \text{ cm}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{b_w \times t^3}{12}}{b_w \times t}} = \sqrt{\frac{t^2}{12}} = \sqrt{\frac{1.5^2}{12}} = 0.433 \text{ cm}$$

$$\frac{K \times l_t}{i_y} = \frac{1 \times 21.49}{0.433} = 49.63$$

$$4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4.71 \times \sqrt{\frac{20000}{23.5}} = 137.4$$

$$\frac{K \times l_t}{i_y} < 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{K \times l_t}{i_y} \right)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000}{(49.63)^2} = 80.14 \text{ KN/cm}^2$$

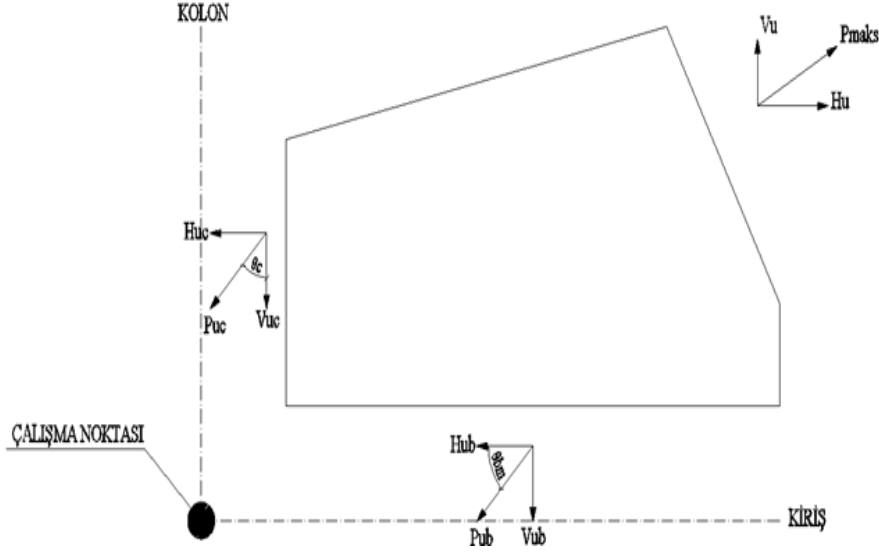
$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{f_y}{F_e}} \right] \times f_y = \left[0.658^{\frac{23.5}{80.14}} \right] \times 23.5 = 20.79 \text{ KN/cm}^2$$

$$\phi \times P_n = \phi \times F_{cr} \times A = 0.9 \times 20.79 \times 98.38 = 1840.79 \text{ KN}$$

1000 < 1840.79 Bayrak levhası yeterli dayanıma sahiptir.

7.4. Kiriş Kolon ve Bayrak Levhası Birleşim Bölgesi Kaynak Hesabı

Şekil 7.6’da görüldü gibi çaprazın birleşim bölgelerine aktardığı kuvvetler görülmektedir. Bu birleşim bölgelerinde kaynak hesabı bu kuvvetlere göre yapılmıştır.



Şekil 7.6. Düzgün kuvvet yöntemine göre bayrak-kiriş-kolon birleşimine etki eden kuvvetler. (Christopoulos 2005’den adapte edilmiştir)

$$r = \sqrt{(\alpha + e_c)^2 + (\beta + e_b)^2} = \sqrt{(35 + 12)^2 + (14 + 12)^2} = 53.71 \text{ cm}$$

$$V_{uc} = \frac{\beta}{r} \times P_{maks} = \frac{14}{53.71} \times 1200 = 312.79 \text{ KN}$$

$$H_{uc} = \frac{e_c}{r} \times P_{maks} = \frac{12}{53.71} \times 1200 = 268.11 \text{ KN}$$

$$V_{ub} = \frac{e_b}{r} \times P_{maks} = \frac{12}{53.71} \times 1200 = 268.11 \text{ KN}$$

$$H_{ub} = \frac{\alpha}{r} \times P_{maks} = H_{ub} = \frac{35}{53.71} \times 1200 = 781.98 \text{ KN}$$

$$P_{ub} = \sqrt{H_{ub}^2 + V_{ub}^2} = \sqrt{781.98^2 + 268.11^2} = 826.67 \text{ KN}$$

$$P_{uc} = \sqrt{H_{uc}^2 + V_{uc}^2} = \sqrt{268.11^2 + 312.79^2} = 411.98 \text{ KN}$$

7.4.1. Kolon bayrak levhası birleşimi için kaynak hesabı

7.4.1.1. Kaynak kalınlığının belirlenmesi

$$t_{\min} = 15 \text{ mm}$$

$$19 \geq t_{\min} > 13$$

$$a_{\min} = 6 \text{ mm}$$

$$a_{maks} = 0.7 \times (t - 2 \text{ mm}) = 0.7 \times (15 - 2 \text{ mm}) = 9.1 \text{ mm}$$

Seçilen kaynak kalınlığı $a = 6 \text{ mm}$

7.4.1.2. Kaynak kopma dayanımı

$$L_e = L - 2 \times a = 28 - 2 \times 0.6 = 26.8 \text{ cm}$$

$$A_{we} = n \times L_e \times a = 2 \times 26.8 \times 0.6 = 32.16 \text{ cm}^2$$

$$F_{nw} = 0.6 \times F_e = 0.6 \times 40 = 24 \text{ KN/cm}^2$$

$$\phi \times R_n = 0.75 \times F_{nw} \times A_{we} = 0.75 \times 24 \times 32.16 = 578.88 \text{ KN}$$

7.4.1.3. Esas metal akma dayanımı

$$L_e = L - 2 \times a = 28 - 2 \times 0.6 = 26.8 \text{ cm}$$

$$A_{BM} = L_e \times t = 26.8 \times 1.5 = 40.2 \text{ cm}^2$$

$$F_{nBM} = 0.6 \times F_y = 0.6 \times 23.5 = 14.1 \text{ KN/cm}^2$$

$$\phi \times R_n = 1.0 \times F_{nBM} \times A_{BM} = 1.0 \times 14.1 \times 40.2 = 566.82 \text{ KN}$$

7.4.1.4. Esas metal kopma dayanımı

$$L_e = L - 2 \times a = 28 - 2 \times 0.6 = 26.8 \text{ cm}$$

$$A_{BM} = L_e \times t = 26.8 \times 1.5 = 40.2 \text{ cm}^2$$

$$F_{nBM} = 0.6 \times F_y = 0.6 \times 36 = 21.6 \text{ KN/cm}^2$$

$$\phi \times R_n = 0.75 \times F_{nBM} \times A_{BM} = 0.75 \times 21.6 \times 40.2 = 651.24 \text{ KN}$$

Karakteristik kaynak dayanımı $\min(578.88; 566.82; 651.24)$

$566.82 > 411.98 \text{ KN}$ kaynak dayanımı yeterlidir.

7.4.2. Kiriş bayrak levhası birleşimi için kaynak hesabı

7.4.2.1. Kaynak kalınlığının belirlenmesi

$$t_{\min} = 15 \text{ mm}$$

$$19 \geq t_{\min} > 13$$

$$a_{\min} = 6 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = 0.7 \times (t - 2 \text{ mm}) = 0.7 \times (15 - 2 \text{ mm}) = 9.1 \text{ mm}$$

Seçilen kaynak kalınlığı $a = 6 \text{ mm}$

7.4.2.2. Kaynak kopma dayanımı

$$L_e = L - 2 \times a = 74 - 2 \times 0.6 = 72.8 \text{ cm}$$

$$A_{we} = n \times L_e \times a = 2 \times 72.8 \times 0.6 = 87.36 \text{ cm}^2$$

$$F_{nw} = 0.6 \times F_e = 0.6 \times 40 = 24 \text{ KN/cm}^2$$

$$\phi \times R_n = 0.75 \times F_{nw} \times A_{we} = 0.75 \times 24 \times 87.36 = 1572.48 \text{ KN}$$

7.4.2.3. Esas metal akma dayanımı

$$L_e = L - 2 \times a = 74 - 2 \times 0.6 = 72.8 \text{ cm}$$

$$A_{BM} = L_e \times t = 72.8 \times 1.5 = 109.2 \text{ cm}^2$$

$$F_{nBM} = 0.6 \times F_y = 0.6 \times 23.5 = 14.1 \text{ KN/cm}^2$$

$$\phi \times R_n = 1.0 \times F_{nBM} \times A_{BM} = 1.0 \times 14.1 \times 109.2 = 1539.72 \text{ KN}$$

7.4.2.4. Esas metal kopma dayanımı

$$L_e = L - 2 \times a = 74 - 2 \times 0.6 = 72.8 \text{ cm}$$

$$A_{BM} = L_e \times t = 72.8 \times 1.5 = 109.2 \text{ cm}^2$$

$$F_{nBM} = 0.6 \times F_y = 0.6 \times 36 = 21.6 \text{ KN/cm}^2$$

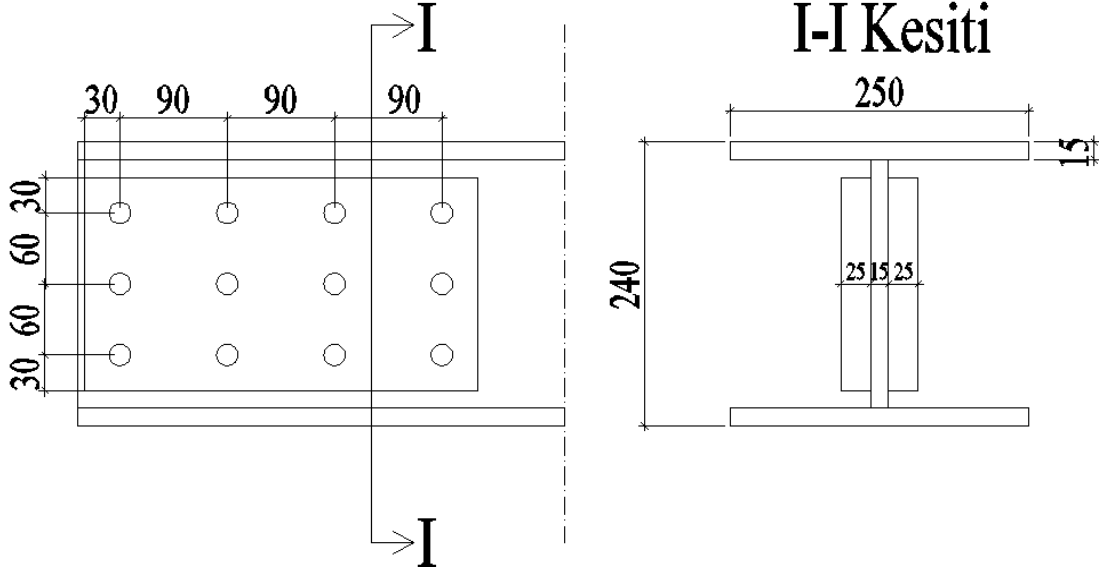
$$\phi \times R_n = 0.75 \times F_{nBM} \times A_{BM} = 0.75 \times 21.6 \times 109.2 = 1769.04 \text{ KN}$$

Karakteristik kaynak dayanımı $\min(1572.48; 1539.72; 1769.04)$

$1539.72 > 826.67 \text{ KN}$ kaynak dayanımı yeterlidir.

7.5. Çerçeve Sistemin Birleşim Bölgelerinin Tasarımı

Birleşimde 12 adet 10.9 M16 bulon kullanılmıştır. Bulonların standart dairesel delik çapı 18 mm'dir. Kenar bulonların merkezinin plaka kenarına uzaklığı 30 mm'dir. Bulonların merkezlerinin arasındaki mesafe 60 mm ve 90 mm'dir (Şekil 7.7).



Şekil 7.7. Birleşim bölgesine ait detay çizimi

7.5.1. Bulon mesafelerinin kontrolü

7.5.1.1. Kenara olan uzaklık

Çapı 16 mm olan bulonlar için kenara olan en küçük uzaklık 22 mm'dir. Kenara olan en büyük uzaklık ise bağlanan plakaların kalınlığı en küçük olanın 12 katından ve 150 mm'den büyük olamaz. (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (2017)). Bulon merkezinin kenara olan uzaklığı için belirlenen 30 mm bu şartları sağlamaktadır.

7.5.1.2. Bulon merkezleri arasındaki uzaklık

Bulon merkezleri arasındaki mesafe karakteristik bulon çapının 3 katından küçük olamaz. En büyük mesafe ise bağlanan plakalardan kalınlığı en küçük olanın 14 katından ve 180 mm'den büyük olamaz. (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (2017)). Bulon merkezleri için belirlenen 60 mm ve 90 mm bu şartları sağlamaktadır.

7.5.2. Bulonun karakteristik kesme kuvveti dayanımı

$$\phi \times R_{nv} = 0.75 \times F_{nv} \times n_{sp} \times A_b = 0.75 \times 45 \times 2 \times \left(\frac{\pi \times 1.6^2}{4} \right) = 135.72 \text{ KN}$$

7.5.3 Bulon deliği ezilme kuvveti dayanımı

7.5.3.1 Kenar bulonlar

$$R_{nv} = 1.2 \times l_c \times t \times F_u \leq 2.4 \times d \times t \times F_u$$

$$R_{nv} = 1.2 \times 2.1 \times 1.5 \times 36 \leq 2.4 \times 1.6 \times 1.5 \times 36$$

$$136.08 \text{ KN} < 207.36 \text{ KN}$$

$$R_n = \phi \times R_{nv} = 0.75 \times 136.08 = 102.06 \text{ KN}$$

7.5.3.2. Diğer bulonlar

$$R_{nv} = 1.2 \times l_c \times t \times F_u \leq 2.4 \times d \times t \times F_u$$

$$R_{nv} = 1.2 \times 5.1 \times 1.5 \times 36 \leq 2.4 \times 1.6 \times 1.5 \times 36$$

$$330.48 \text{ KN} > 207.36 \text{ KN}$$

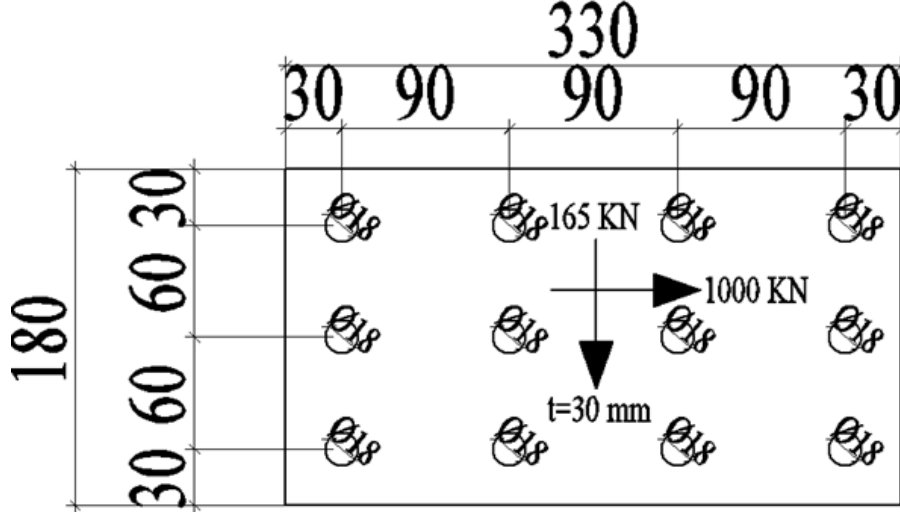
$$R_n = \phi \times R_{nv} = 0.75 \times 207.36 = 155.52 \text{ KN}$$

Birleşim için bir bulonun karakteristik dayanımı $R_n = \min(135.72; 102.06; 155.52)$

12 adet bulonun karşılayabileceği yük $R_n = 12 \times 102.06 = 1224.72 \text{ KN}$ ve birleşime etki eden yük ise 1013.52 KN'dur. Buna göre 12 adet 10.9 M16 bulon yeterli dayanıma sahiptir.

7.6. Birleşim Plakası

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi birleşim levhasına 1000 KN çekme kuvveti ve 165 KN kesme kuvveti etki etmektedir.



Şekil 7.8. Birleşim plakasına ait detay çizimi ve etki eden kuvvetler

7.6.1. Bağlantı plakasının karakteristik çekme kuvveti dayanımı

7.6.1.1 Akma sınır durumu

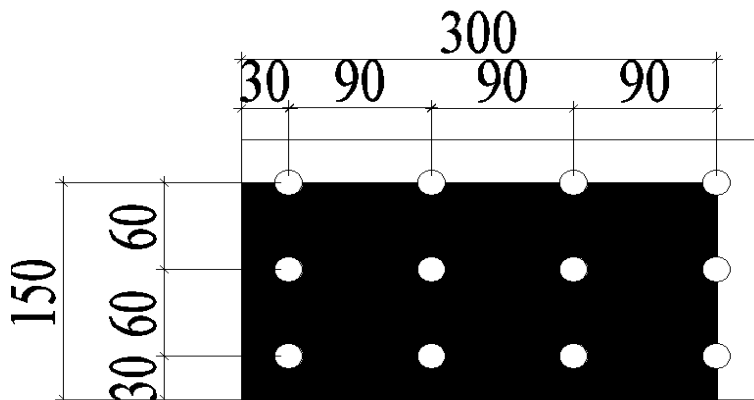
$$\phi \times R_n = 0.9 \times F_y \times A_g = 0.9 \times 23.5 \times 2 \times (18 \times 2.5) = 1903.5 \text{ KN}$$

7.6.1.2. Kopma sınır durumu

$$\phi \times R_n = 0.75 \times F_u \times (U \times A_n) = 0.75 \times 36 \times 2 \times (1 \times 18 \times 2.5) = 2430 \text{ KN}$$

7.6.1.3. Blok kırılma

Şekil 7.9’da bağlantı plakasında meydana gelebilecek en elverişsiz blok kırılma durumu gösterilmiştir.



Şekil 7.9. Birleşim plakasında oluşabilecek en elverişsiz blok kırılma durumu

$$A_{gv} = 2 \times (30 \times 2.5) = 150 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = 2 \times ((30 - 3.5 \times 1.8) \times 2.5) = 118.5 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} = 2 \times ((15 - 2.5 \times 1.8) \times 2.5) = 52.5 \text{ cm}^2$$

$$R_n = 0.6 \times F_u \times A_{nv} + U_{bs} \times F_u \times A_{nt} \leq 0.6 \times F_y \times A_{gv} + U_{bs} \times F_u \times A_{nt}$$

$$R_n = 0.6 \times 36 \times 118.5 + 1.0 \times 36 \times 52.5 \leq 0.6 \times 23.5 \times 150 + 1.0 \times 36 \times 52.5$$

$$R_n = 4449.6 > 4005$$

$$\phi \times R_n = 0.75 \times 4005 = 3337.2 \text{ KN}$$

Bağlantı plakasının karakteristik çekme dayanımı $\min(1903.5; 2430; 3337.2)$

1903.5 KN > 1000 KN bağlantı plakasının dayanımı yeterlidir

7.6.2. Bağlantı plakasının kayma etkisi altındaki dayanımı

7.6.2.1. Akma sınır durumu

$$\phi \times R_n = 1.0 \times (0.6 \times F_y \times A_{gv}) = 1.0 \times (0.6 \times 23.5 \times 150) = 2115 \text{ KN}$$

7.6.2.2. Kopma sınır durumu

$$\phi \times R_n = 0.75 \times (0.6 \times F_u \times A_{nv}) = 0.75 \times (0.6 \times 36 \times 118.5) = 1919.7 \text{ KN}$$

Bağlantı plakasının kayma etkisindeki dayanımı $\min(2115; 1919.7)$

1919.7 > 165 KN bağlantı plakasının dayanımı yeterlidir.

ÖZGEÇMİŞ

HÜSEYİN SÖĞÜT
huseyinsogut@akdeniz.edu.tr



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2010-2015	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi 2017-Devam ediyor	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
--	---

ESERLER:

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Söğüt H., Özçelik R., (2018). The Cyclic Performance Of Buckling Restrained Braced Frame. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 214-214.
- 2- Söğüt H., Özçelik R., (2018). The Numerical Analysis Of Buckling Restrained Braced Members. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 494-494.

- 3- Sögüt H., Özçelik R., Erdal F., Alanyalı M., (2018). The Strength Of Timber Beam Members Consisted Of Varying Parts. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 496-496.