

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BETONARME YAPILARIN BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK
ÇAPRAZLAR İLE DIŞ GÜÇLENDİRME METOTLARININ GELİŞTİRİLMESİ**

ELİF FİRUZE ERDİL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

DOKTORA TEZİ

Şubat 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BETONARME YAPILARIN BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK
ÇAPRAZLAR İLE DIŞ GÜÇLENDİRME METOTLARININ GELİŞTİRİLMESİ**

ELİF FİRUZE ERDİL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Şubat 2023

ANTALYA

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

**BETONARME YAPILARIN BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK
ÇAPRAZLAR İLE DIŞ GÜÇLENDİRME METOTLARININ GELİŞTİRİLMESİ**

ELİF FİRUZE ERDİL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez TÜBİTAK tarafından 116M231 nolu proje ile desteklenmiştir.

Şubat 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME YAPILARIN BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK
ÇAPRAZLAR İLE DIŞ GÜÇLENDİRME METOTLARININ GELİŞTİRİLMESİ

ELİF FİRUZE ERDİL
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 23/02/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK (Danışman)

Doç. Dr. Barış ERDİL

Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Dr. Öğr. Üyesi Tuba EROĞLU AZAK

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

ÖZET

BETONARME YAPILARIN BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR İLE DIŞ GÜÇLENDİRME METOTLARININ GELİŞTİRİLMESİ

ELİF FİRUZE ERDİL

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Şubat 2023; 200 sayfa

Deprem kuşağı üzerinde olan ülkemizde mevcut şartname ve yapım teknikleri ile depreme karşı dayanıklı yapıların yapılması mümkün hale gelmiştir. Ancak özellikle 1999 yılından önce yapılan yapılar can ve mal kaybı açısından ciddi risk teşkil etmektedirler. Mevcut ve kusurlu yapılar için günümüzde en fazla kullanılan güçlendirme yöntemleri betonarme perde duvar ve kolon mantolaması ile yapılan güçlendirmelerdir. Ancak bu yöntemlerin uygulanması aşamasında yapının kullanımı imkânsız hale gelmektedir. Özellikle kamu binalarında yapının boşaltılması kamu hizmetinin durdurulması anlamına gelmektedir. Dolayısı ile mevcut kusurlu yapıların güçlendirilmesinde dış güçlendirme yöntemlerinin de kullanılması uygulama açısından bir zorunluluk haline gelmiştir. Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ'ler) güçlendirme amaçlı kullanılabilen yeni nesil çelik çaprazlar olup hem basınç hem de çekme istemleri altında yaklaşık aynı kapasiteye sahiptirler ve BEÇÇ'lerin histeretik davranışları da oldukça stabildir.

Bu tez çalışması kapsamında hem deneysel hem de analitik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmada dört adet üç boyutlu iki katlı $\frac{1}{2}$ ölçekli kusurlu betonarme yapı ters çevrimli statik yükleme altında test edilmiştir. Bu yapılardan ilki referans (güçlendirilmemiş) yapı olup diğer üçü BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile yapı dışından güçlendirilmiş yapılardır. Güçlendirme işleminde BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile betonarme yapının birlikte çalışmaları ankraj çubukları ile sağlanmıştır. Yatay istemler betonarme çerçeveye uygulanmış olup ankrajlar yardımı ile BEÇÇ'li çelik çerçevelere aktarılmıştır. BEÇÇ'li çelik çerçeveler için mevcut temele ek temel uygulaması (temel güçlendirilmesi) yapılmıştır. Mevcut temel ile ek yeni temellerin birlikte çalışması yine ankrajlar ile sağlanmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile güçlendirilen yapıların yatay rijitliğinin, yatay yük taşıma ve enerji sönümleme kapasitelerinin arttığı görülmüştür. Güçlendirilen yapı, özellikle betonarme taşıyıcı elemanlarda plastikleşmeler sınırlı seviyede iken, BEÇÇ'lerin plastikleşerek enerji sönümlemesiyle yatay istemlere karşı oldukça kararlı davranış göstermiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak analitik çalışmalar da yapılmış olup OPENSEES programı ile gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar neticesinde güçlendirilmiş yapıların performans kriterleri ele alınmıştır. Tez çalışmasının sonucu olarak BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile dış güçlendirmeye ilişkin tasarım önerileri getirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Ankraj detayları, Binaların depreme karşı güçlendirilmesi, Burkulması engellenmiş çelik çaprazlar, Depreme karşı kusurlu betonarme binalar, Dışarıdan güçlendirme, Temellerin güçlendirilmesi

JÜRİ: Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Doç. Dr. Barış ERDİL

Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Dr. Öğr. Üyesi Tuba EROĞLU AZAK

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN



ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF DESIGN METHODS FOR SEISMIC RETROFITTING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH BUCKLING RESTRAINED BRACES

ELİF FİRUZE ERDİL

PhD Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

February 2023; 200 pages

RC structures are strong enough to withstand earthquakes with the current specification and construction techniques in Turkey earthquake-prone country. Researchers are aware, however, that existing deficient RC structures, especially those constructed prior to 1999, are hazardous to life and property. Column jacketing and shear walls are the most used retrofitting methods. However, during the application of these two methods, buildings cannot be used and must be evacuated. Particularly in public buildings, evacuation means the cessation of public services. Thus, it has become necessary in practice to use external strengthening methods for strengthening existing deficient structures. Steel buckling restrained braces (BRBs) are a novel type of brace that has been used in retrofitting solutions for decades. It is estimated that their tension and compression capacities are approximately the same, and their hysteretic behaviours are quite stable.

This thesis includes both experimental and analytical studies. The ½ scale four two-storey deficient RC structures were constructed. These structures were three-dimensional with 1x3 bays. One of these structures was tested without strengthening (reference structure) and the other two structures were retrofitted with BRB braced frames (BRBFs). The cyclic reversed static testing procedure was used during the experiments. The connection between the existing RC structure and newly added BRBFs was achieved by using anchorage rods. The lateral load was applied to the RC structure and then the force was transferred from the RC structure to the BRBFs via the anchorage rods. Furthermore, newly constructed RC foundations were also used for the BRBFs. The test results indicated that the lateral strength and stiffness and energy dissipation capacity of the retrofitted structure with BRBFs increased significantly. Additionally, the BRBs yielded significantly before the RC columns were severely damaged. Furthermore, the analytical study indicated that the behaviour of the retrofitted structure can be simulated using a computer program. As a result, it is possible to evaluate the structure's performance. Based on the findings of this study, a design procedure for external retrofitting with BRBFs is proposed.

KEYWORDS: Buckling restrained braces, Details of anchorage, Retrofitting of foundation, Seismic retrofitting of buildings, External retrofitting, Deficient reinforced concrete structures

COMMITTEE: Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Assoc. Pof. Dr. Barış ERDİL

Assoc. Pof. Dr. Ferhat ERDAL

Asst. Pof. Dr. Tuba EROĞLU AZAK



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında ülkemizde büyük yıkımlara ve can kayıplarına sebep olan depremin etkilerini azaltmak amacıyla mevcut kusurlu betonarme yapıların yeni bir yöntemle güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla güçlendirme işlemi uygulanacak olan yapının, bina sakinlerini rahatsız etmeden, mümkün mertebe dışarıdan güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda bu yöntem test edilmeye çalışılmıştır. Sonrasında yapılan analitik çalışmalar ile bu yöntemin etkinliği desteklenmiştir.

Bu özgün çalışmaya başından beri ilham veren ve her aşamasında bana yol gösteren değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Razaman ÖZÇELİK'e teşekkür ederim. Deneysel ve analitik çalışmalar esnasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Tuba EROĞLU AZAK ve Öğr. Gör. Salim AZAK'a teşekkürü borç bilirim. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 116M231 numaralı proje desteğiyle gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bursiyer olarak görev alan Mücahit ÇAM ve Durmuş ŞENER'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi bu zorlu süreçte de bana destek olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmamı başta ailem olmak üzere depremlerden zarar görmüş bütün depremzedelere ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
AKADEMİK BEYAN	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Dışarıdan Perde Duvarlar ile Güçlendirme	4
2.2. Betonarme Sisteme Dışarıdan Yeni Çerçeve Eklenmesi	11
2.3. Betonarme Sistemin Mantolanması.....	19
2.4. Çelik Çaprazlar ile Dışarıdan Güçlendirme	20
2.5. Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ'ler) ile Dışarıdan Güçlendirme	31
3. MATERYAL VE METOT	36
3.1. Deneysel Çalışmalar	36
3.1.1. Referans deney elemanı (RDE)	40
3.1.1.1. Temellerin oluşturulması	41
3.1.1.2. Donatıların hazırlanması, birinci kat kalıpların kurulması	43
3.1.1.3. Birinci kat beton dökümü.....	44
3.1.1.4 İkinci kat kalıpların kurulması	46
3.1.1.5. İkinci kat beton dökümü	47
3.1.1.6. U-Profillerin yerleştirilmesi	47
3.1.1.7. Kum torbalarının yerleştirilmesi	47
3.1.1.8. Tuğla duvarların örülmesi, sıva ve badana işlemleri	48
3.1.2. Güçlendirilmiş deney elemanları (GDE'ler)	50
3.1.2.1. Güçlendirilmiş deney elemanı-1 (GDE-1).....	53
3.1.2.2. Güçlendirilmiş deney elemanı-2 (GDE-2).....	60
3.1.2.3. Güçlendirilmiş deney elemanı-3 (GDE-3).....	63

3.1.3. Ölçüm ve yükleme sistemi.....	63
3.1.3.1. RDE için ölçüm sistemi	65
3.1.3.2. GDE-1 için ölçüm sistemi.....	68
3.1.3.3. GDE-2 ve GDE-3 için ölçüm sistemi	71
3.1.4. BEÇÇ ve BEÇÇli çelik çerçeve sisteminin detayları	74
3.1.5. Malzeme Özellikleri	77
3.1.5.1. Beton malzeme özelliklerinin tayin edilmesi.....	77
3.1.5.2. Çelik malzeme özelliklerinin tayin edilmesi.....	78
3.2. Analitik Çalışmalar.....	79
4. BULGULAR.....	82
4.1. Deneysel Bulgular	82
4.1.1. RDE'ye ait deney sonuçları	82
4.1.2. GDE-1'e ait deney sonuçları	91
4.1.3. GDE-2'ye ait deney sonuçları	99
4.1.4. GDE-3'e ait deney sonuçları	115
4.2. Deneysel Bulguların Kıyaslanması	124
4.3. Analitik Bulgular.....	126
4.4. Deneysel ve Analitik Bulguların Karşılaştırılması.....	127
5. TARTIŞMA.....	130
5.1. BEÇÇ ile Güçlendirme Sisteminin Tartışılması	130
5.2. BEÇÇ ile Güçlendirme Tasarımı	131
6. SONUÇLAR.....	133
7. KAYNAKLAR.....	135
8. EKLER	140
EK-1. Deney Elemanlarına ait Donatı Detayları.....	140
EK-2. Çelik Çerçeve Ön Tasarımı	141
EK-3. BEÇÇ'lere ait ÇE'lerin Enkesit Alanının Hesabı.....	145
EK-4. BEÇÇ'li ÇÇ'ye Ait Kesin Tasarım Hesaplamaları	148
EK-5. Bayrak Levhalarının Boyut Hesabı (Uniform Force Method)	161
EK-6. Taban Plakalarının Hesabı.....	166
EK-6.1. GDE-1'e ait kolon taban plakası tasarımı	166
EK-6.2. GDE-2 ve GDE-3'e ait kolon taban plakası tasarımı.....	170

EK-7. Deney Elemanlarına ait Beton ve Çelik Malzemelerinin Mekanik Özellikleri	185
EK-7.1. RDE'ye ait malzemelerin mekanik özellikleri.....	185
EK-7.2. GDE-1'e ait malzemelerin mekanik özellikleri	187
EK-7.3. GDE-2'e ait malzemelerin mekanik özellikleri	189
EK-7.4. GDE-3'e ait malzemelerin mekanik özellikleri	191
EK-7.5. Deney elemanlarına ait çelik malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	193
EK-8. Deney elemanlarına ait deney sonuçları	194
EK-8.1. RDE'ye ait Deney Sonuçları.....	194
EK-8.2. GDE-1'e ait Deney Sonuçları	195
EK-8.3. GDE-2'ye ait Deney Sonuçları	197
EK-8.4. GDE-3'e ait Deney Sonuçları	199
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Betonarme Yapıların Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar ile Dış Güçlendirme Metotlarının Geliştirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

23/02/2023

Elif Fırze ERDİL



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A : alan

A_a : ankraj alanı

A_b : bulon alanı

A_{brg} : ankraj çubuğunun net yatak alanı

$A_{ÇE}$: burkulması engellenmiş çelik çapraz çekirdek elemanına ait en kesit alanı

a_{duvar} : duvar eşdeğer basınç genişliği

A_{duvar} : duvar eşdeğer elemanın alanı

A_{ekolon} : kolon efektif kesit alanı

$A_{kiriş}$: kiriş kesit alanı

A_{kolon} : kolon kesit alanı

A_{net} : net alan

A_{NC} : çekme dayanımının hesaplanması için tek bir ankrajın veya ankraj grubunun öngörülen beton kırılma alanı

A_{NC0} : kenar mesafesi veya aralığı ile sınırlı değilse, çekme mukavemetinin hesaplanması için tek bir ankrajın öngörülen beton kırılma alanı

$A_{se,N}$: çekme etkisindeki ankrajın efektif enkesit alanı

$A_{se,V}$: kesme etkisindeki ankrajın efektif enkesit alanı

A_{vc} : kesme etkisindeki tek bir ankrajın veya ankraj grubunun öngörülen beton kırılma alanı

A_{vco} : köşe etkileri, ankrajlar arası mesafe veya eleman kalınlığı ile sınırlı değilse, kesme dayanımının hesaplanması için tek bir ankrajın öngörülen beton kırılma alanı

$A_{wkiriş}$: kiriş için tüm enkesit yüksekliği ile hesaplanan gövde alanı

A_{wkolon} : kolon için tüm enkesit yüksekliği ile hesaplanan gövde alanı

B : taban plakası genişliği

$b_{kiriş}$: kiriş başlık genişliği

b_{kolon} : kolon başlık genişliği

c : en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı

c_{a1} : bir ankraj çubuğunun merkezinden betonun kenarına kadar olan mesafe. Ankraja kesme kuvveti uygulanırsa, c_{a1} uygulanan kesme yönünde alınır. Ankraja çekme kuvveti uygulanırsa, c_{a1} minimum kenar mesafesidir.

c_{a2} : ankraj çubuğunun merkezinden c_{a1} 'e dik yönde betonun kenarına olan mesafe

c_{v1} : gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı

$c_{xkiriş}$: kiriş için x yönünde en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı

$c_{ykiriş}$: kiriş için y yönünde en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı

c_{xkolon} : kolon için x yönünde en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı

c_{ykolon} : kolon için y yönünde en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı

d_a : ankraj çapı

e_b : kiriş derinliğinin yarısı

e_c : kolon derinliğinin yarısı

E_c : betonun elastisite modülü

e_h : J veya L şeklindeki ankrajın iç yüzeyinden dış ucuna olan mesafe

E_m : tuğla duvarın elastisite modülü

E_s : çeliğin elastisite modülü

f_c' : betonun belirtilen basınç dayanımı

$F_{crkiriş}$: kiriş kritik burkulma gerilmesi

$F_{crkolon}$: kolon kritik burkulma gerilmesi

f_{dc} : tuğla duvarın basınç kapasitesi

F_{ekolon} : kolon elastik burkulma gerilmesi

$F_{ekiriş}$: kiriş elastik burkulma gerilmesi

F_{nta} : ankraj karakteristik çekme gerilmesi dayanımı

$F_{ntbulon}$: bulon karakteristik çekme gerilmesi dayanımı

$F_{nvbulon}$: bulon karakteristik kayma gerilmesi dayanımı

f_u	: çelik kopma dayanımı
f_{uta}	: ankraj çeliğinin belirtilen çekme dayanımı
f_y	: çelik akma dayanımı
f_{ya}	: ankraj çeliğinin belirtilen akma dayanımı
h_a	: ankraj eksenine paralel olarak ölçülen, ankrajın yerleştirildiği elemanın kalınlığı
h_{col}	: kolon yüksekliği
h_{duvar}	: tuğla duvarın yüksekliği
h_{ef}	: efektif ankraj gömme derinliği
$h_{kiriş}$	: kiriş yüksekliği
h_{kolon}	: kolon yüksekliği
$h_{wkiriş}$	: kiriş gövde yüksekliği
h_{wkolon}	: kolon gövde yüksekliği
I	: atalet momenti
I_g	: betonarme kolon brüt atalet momenti
$I_{kiriş}$	: betonarme kiriş efektif atalet momenti
I_{kolon}	: betonarme kolon efektif atalet momenti
I_{xkolon}	: çelik kolon atalet momenti (x-x eksenine göre)
$I_{ykiriş}$	: çelik kiriş atalet momenti (y-y eksenine göre)
I_{ykolon}	: çelik kolon atalet momenti (y-y eksenine göre)
$I_{xkiriş}$	: çelik kiriş atalet momenti (x-x eksenine göre)
$i_{xkiriş}$	: çelik kiriş atalet yarıçapı (x-x eksenine göre)
i_{xkolon}	: çelik kolon atalet yarıçapı (x-x eksenine göre)
i_{ykolon}	: çelik kolon atalet yarıçapı (y-y eksenine göre)
k_c	: çekmede betonun kopma dayanımı katsayısı
k_{duvar}	: duvar eksenel rijitliği

L : uzunluk

l_c : kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki net uzaklık

L_{diyag} : betonarme kolon ortası ve kat ortası arasındaki diyagonal uzunluk

L_{duvar} : tuğla duvarın uzunluğu

l_{plaka} : plaka uzunluğu

M : moment

$M_{pxkiriş}$: kiriş momenti (x-x eksenine göre)

$M_{pykiriş}$: kiriş momenti (y-y eksenine göre)

$M_{pxkolon}$: kolon momenti (x-x eksenine göre)

$M_{pykolon}$: kolon momenti (y-y eksenine göre)

M_u : moment

N : taban plakası uzunluğu

n_a : ankraj sayısı

N_b : çatlak betonda çekme etkisindeki tek bir ankrajın gömülü olduğu beton kopma dayanımı

N_{cbg} : çekme etkisindeki bir ankraj grubunun nominal beton kopma dayanımı

N_{cpg} : bir grup ankrajın gömülü olduğu betonu kaldırma dayanımı

n_b : bulon sayısı

N_n : çekmede nominal dayanım

N_p : çatlaklı betonda tek bir ankrajın çekme dayanımı

N_{pn} : çekme etkisinde tek bir ankrajın nominal sıyrılma dayanımı

N_{sa} : tek bir ankrajın veya bir ankraj grubundaki tek bir ankrajın nominal dayanımı

N_{sb} : tek bir ankrajın yan yüzeyindeki betonun patlama dayanımı

N_{sbg} : ankraj grubunun yan yüzeyindeki betonun patlama dayanımı

n_{sp} : kayma düzlemi sayısı

N_u : çekme kuvveti

N_{ua} : ankraj veya ankraj grubundaki tek ankraja uygulanan faktörlü çekme kuvveti

P : eksenel yük

$P_{BEÇÇ}$: burkulması engellenmiş çelik çaprazın eksenel yük taşıma kapasitesi

$P_{ç}$: çekme kuvveti

P_{duvar} : tuğla duvarın eksenel yük taşıma kapasitesi

$P_{nkiriş}$: kirişler için karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı

P_{nkolon} : kolonlar için karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı

P_r : YDKT veya GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli eksenel kuvvet dayanımı

P_u : burkulması engellenmiş çelik çapraz için arttırılmış eksenel yük kapasitesi

P_y : eksenel yük kapasitesi

R : tasarımda deprem azaltma katsayısı

R_{duvar} : duvarın diyagonal uzunluğu

$R_{ntkiriş}$: kiriş için karakteristik çekme kuvveti dayanımı

R_{nkolon} : kolon için karakteristik çekme kuvveti dayanımı

R_{nv} : karakteristik kesme kuvveti dayanımı

$R_{nvbulon}$: bulon karakteristik kesme kuvveti dayanımı

S_1, S_2 : ankrajlar arası merkezden merkeze uzaklık

t : kalınlık

t_{duvar} : tuğla duvarın kalınlığı

$t_{fkiriş}$: çelik kiriş başlık kalınlığı

t_{fkolon} : çelik kolon başlık kalınlığı

T_n : karakteristik çekme kuvveti dayanımı

T_{na} : ankraj için karakteristik çekme kuvveti dayanımı

$T_{nkiriş}$: kiriş karakteristik çekme kuvveti dayanımı

T_{nkolon} : kolon karakteristik çekme kuvveti dayanımı

t_{plaka} : plaka kalınlığı

$t_{wkiriş}$: çelik kiriş gövde kalınlığı

t_{wkolon} : çelik kolon gövde kalınlığı

U : gerilme düzensizliği etki katsayısı

V : kesme kuvveti

V_b : çatlak betonda kayma etkisindeki tek bir ankrajın beton kopma dayanımı

V_c : beton tarafından sağlanan nominal kesme dayanımı

V_{cbg} : kesme kuvveti etkisindeki ankraj grubunun nominal beton kopma dayanımı

V_{cpg} : bir grup ankrajın nominal betonu kaldırma dayanımı

V_n : nominal kesme kuvveti

V_{na} : ankraj nominal kesme kuvveti

$V_{nkiriş}$: kiriş kesme kapasitesi

V_{nkolon} : kolon kesme kapasitesi

V_{rkolon} : kolon kesme kapasitesi (analiz)

V_{sa} : bir ankraj grubundaki tek bir ankrajın veya tek bir ankrajın nominal kesme dayanımı

V_u : kesme kuvveti

V_{ua} : tek bir ankraj veya ankraj grubuna uygulanan faktörlü kesme kuvveti

$w_{xkiriş}$: kiriş mukavemet momenti (x-x eksenine göre)

$w_{ykiriş}$: kiriş mukavemet momenti (y-y eksenine göre)

w_{xkolon} : kolon mukavemet momenti (x-x eksenine göre)

w_{ykolon} : kolon mukavemet momenti (y-y eksenine göre)

α : kolon yüzünden bayrak levhasının ağırlık merkezine olan mesafe

β : kiriş yüzünden bayrak levhasının ağırlık merkezine olan mesafe

θ_{diyag} : betonarme kiriş- kolon arasındaki diyagonal açı

θ_{duvar} : tuğla duvarın diyagonal açısı

λ	: narinlik
λ_a	: Belirli beton ankraj uygulamalarında hafif betonun azaltılmış mekanik özelliklerini yansıtmak için modifikasyon faktörü
$\emptyset$	: çap
$\emptyset_{bulon}$	: bulon çapı (mm)
ϕ	: dayanım azaltma faktörü
ϕ_n	: azaltma faktörü
τ	: kayma dayanımı
ψ_c	: kapağa göre geliştirme uzunluğunu değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{c,N}$	: betonda çatlak olup olmamasına bağlı olarak ankrajların çekme dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{c,P}$	: betonda çatlak olup olmamasına bağlı olarak ankrajların sıyrılma dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{c,V}$	: betonda çatlak olup olmamasına ve ek donatının bulunup bulunmadığına bağlı olarak ankrajların kayma dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{cp,N}$	: montajdan kaynaklanan çekme gerilmelerini hesaba katmak için ek donatı olmadan çatlaksız betonda kullanılması amaçlanan sonradan takılan ankrajların çekme dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{ec,N}$	: uygulanan yüklerin eksantrikliğine bağlı olarak ankrajların çekme dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{ec,V}$	: uygulanan yüklerin eksantrikliğine bağlı olarak ankrajların kayma dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{ed,N}$	: beton elemanın kenarlarına yakınlığına bağlı olarak ankrajların çekme dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{ed,V}$	: beton elemanın kenarlarına yakınlığına bağlı olarak ankrajların kesme dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
$\psi_{h,V}$	: $h_a < 1.5c_{a1}$ olan beton elemanlarda bulunan ankrajların kesme dayanımını değiştirmek için kullanılan faktör
σ_{ϕ}	: basınç gerilmesi

Kısaltmalar

B/A : Betonarme

BEÇÇ : Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz

BEM : Burkulmayı Engelleyen Mekanizma

cm : Santimetre

C10 : 10 MPa Dayanıma Sahip Beton Sınıfı

ÇÇ : Çelik Çapraz

ÇE : Çekirdek Eleman

EÇÇ : Eşmerkezli Çelik Çapraz

EÇÇÇ : Eşmerkezli Çelik Çaprazlı Çerçeve

FRP : Fiber Takviyeli Polimer

GDE : Güçlendirilmiş Deney Elemanı

GDE-1: Güçlendirilmiş Deney Elemanı-1

GDE-2: Güçlendirilmiş Deney Elemanı-2

GDE-3: Güçlendirilmiş Deney Elemanı-3

GKÖ : Görelî Kat Öteleme

GKÖÖ: Görelî Kat Öteleme Oranı

GKT : Güvenlik Katsayıları ile Tasarım

kN : Kilo Newton

LP : Lifli Polimer

mm : milimetre

MPa : Mega Pascal

M14 : Metrik 14

RDE : Referans Deney Elemanı

T.E. : Tarafsız Eksen

YDKT : Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesi için kullanılan yöntemler	2
Şekil 2.1. a) Güçlendirilmemiş deney elemanları ve deney düzeneği; b) güçlendirilmiş deney elemanları ve deney düzeneği (Kaltakçı vd. 2008).....	4
Şekil 2.2. a) Tip-1 okul binasının genel görünüşü ve 1'inci kat planı (10 derslik); b) Tip-2 okul binasının genel görünüşü ve 1'inci kat planı (14 derslik); c) Tip-3 okul binasının genel görünüşü ve 1'inci kat planı (21 derslik) (Kaltakçı vd. 2008).....	5
Şekil 2.3. Dış perde duvarla güçlendirme (Binici 2010; Ozkok 2010).....	6
Şekil 2.4. Dış perde duvarla güçlendirme deneyi sırasında oluşan hasarlar (Binici 2010)	7
Şekil 2.5. Deneysel programdaki deney elemanları a) güçlendirilmemiş (boş) çerçeve; b) boş çerçeveye bitişik perde duvar ile güçlendirilmiş deney elemanı; c) boş çerçeveye bitişik perde duvar uygulamasında kullanılan ankraj çubukları; d) çelik bağ kirişli (IPE240) e) betonarme bağ kirişli (Öztürk 2010).....	7
Şekil 2.6. Deneysel sonuçlar (Kaltakçı vd. 2010).....	8
Şekil 2.7. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Kamanlı vd. 2011)	9
Şekil 2.8. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Kaplan vd. 2011)	10
Şekil 2.9. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Bahadır 2012)	10
Şekil 2.10. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Ünal vd. 2013)	11
Şekil 2.11. Deney numunelerinin özellikleri (Furukawa vd. 2004).....	12
Şekil 2.12. Deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları (Binici 2010; Özkök 2010; Özkök vd. 2009).....	13
Şekil 2.13. Deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları (Hsiao vd. 2013; Shih vd. 2015).....	14
Şekil 2.14. Deney numunelerinin özellikleri a) genel görünüm; b) yan görünüş; c) güçlendirilmemiş çerçeve (ön görünüş); d); e) güçlendirilmiş çerçeveler (ön görünüş) f) güçlendirilmiş çerçeveler plan görünüş (Liu vd. 2016).....	15
Şekil 2.15. Deney numunelerinin özellikleri a) kaynaklı birleşim yöntemi; b) bulonlu birleşim yöntemi; c) ve d) güçlendirilmiş çerçevenin ön ve arka izometrik görünüşü ve e); f) güçlendirilme yönteminin saha uygulamaları (Jung ve Lee 2020).....	17

Şekil 2.16. Deney numunelerinin özellikleri a) birleşim yöntemi; b) kontrol kutusu; c) çelik çerçeve detayları; d) güçlendirilmemiş çerçeve; e) güçlendirilmiş çerçeve; f); g) güçlendirilme yönteminin saha uygulamaları (Jung vd. 2021).....	18
Şekil 2.17. Deney numunelerinin özellikleri a) güçlendirilmemiş model; b) güçlendirilmiş model; c) güçlendirilmemiş modele ait test sonucu; d) güçlendirilmiş modele ait test sonucu; e) güçlendirilmemiş bina; f) güçlendirilmiş bina modeli; g) binaya ait analiz sonuçları (Balkaya 2017)	19
Şekil 2.18. Sonlu elemanlar modellemeleri a) güçlendirilmemiş model; b) güçlendirilmiş model; (Reggio 2019)	20
Şekil 2.19. Deney numunelerinin özellikleri a) deney numunesi; b) analitik çalışmada kullanılan alt grup; c) alt grubun analitik modeli (Badoux ve Jirsa 1990).....	21
Şekil 2.20. Deney numunelerinin özellikleri a) deney numunesi; b) deney sonucu; c) çelik çapraz bağlantı detayı; d) kolondaki kesme kırılması (Bush vd. 1991).....	22
Şekil 2.21. Güçlendirilmiş binalar (Pincheria ve Jirsa 1995)	23
Şekil 2.22. Güçlendirilen binanın detayları (Timler ve Sherstobotoff 1995)	24
Şekil 2.23. a) Eski tip bina; b) kutu tipi bina; c) güçlendirilmiş eski tip bina; d) güçlendirilmiş kutu tipi bina; e) eski tip binaya ait analiz sonuçları; f) kutu tip binaya ait analiz sonuçları (López vd. 2006; López vd. 2007)	25
Şekil 2.24. a) Referans yapı; b) onarılmış hasarlı yapı; c) güçlendirilme çerçevesi; d) güçlendirilmiş ve onarılmış hasarlı yapı; e) güçlendirilmiş hasarsız yapı; f) kutu tip binaya ait analiz sonuçları (Görgülü 2008; Görgülü vd. 2012)	26
Şekil 2.25. a) Örnek fabrika binası; b) ve c) güçlendirme çerçevesi ve betonarme bina arası bağlantı detayı; d) güçlendirilmiş bina 3-boyutlu modeli; e) güçlendirilmiş binaya ait plan görünüş (Mowrtage 2013)	27
Şekil 2.26. Deney numuneleri: a) 1/2 ölçekli EÇÇÇ b) 1/3 ölçekli RC çerçeve; c) EÇÇÇ ile güçlendirilmiş 1/3 ölçekli RC çerçeve; d) 1/3 ölçekli EÇÇÇ; İtme analizi SAP2000 programı ile yapılmış güçlendirilmiş numuneler: e) RC boş çerçeve; f) V çaprazlı; g) ters V çaprazlı; h) diyagonal çaprazlı; i) Ters diyagonal çaprazlı; j) X çaprazlı; k) K çaprazlı; l) boş çerçeve (Ünal ve Kaltakçı 2016).....	28
Şekil 2.27. Bina modelleri (Formisano vd. 2020).....	29
Şekil 2.28. Bina modelleri (Ecemis vd. 2021)	30
Şekil 2.29. a) Mevcut bina; b) güçlendirilmiş bina c) kat planı; d) güçlendirilmiş bina ön görünüş (Islam vd. 2006).	31
Şekil 2.30. a) Dış güçlendirme yapım aşamaları; b) OpenSees modeli; c) deney elemanı örneği; d) vaka çalışmasına ait bina ve detayları (Cao vd. 2019).....	32

Şekil 2.31. a) Boş çerçeve; b) iç çelik çerçeve+BEÇÇ ile güçlendirilmiş çerçeve; c) dış çelik çerçeve+BEÇÇ ile güçlendirilmiş çerçeve (Sütçü vd. 2020)	33
Şekil 2.32. a) Dış güçlendirme yapım aşamaları; b) deney elemanı; c) analizde kullanılan çerçeve ve kesit özellikleri (3 katlı örnek için) (Cao vd. 2021)	34
Şekil 3.1. Kalıpların bükülmemiş halleri	37
Şekil 3.2. Kalıpların üretilmesi a) kalıp parçalarının birleştirilmeden önceki hali; b) kalıp parçalarının birleştirildikten sonraki hali	38
Şekil 3.3. Referans deney elemanı ve yükleme sistemi a) üç boyutlu görünüş; b) ön görünüş; c) plan görünüş	39
Şekil 3.4. Kolon giriş detayları a) yükleme yönüne paralel orta girişler (yatay yük uygulaması için); b) yükleme yönüne paralel girişler c) yükleme yönüne dik girişler; d) kolonlar (Boyutlar mm cinsindendir)	40
Şekil 3.5. Betonarme eleman donatıları	40
Şekil 3.6. RDE yapım aşamaları özeti a) kalıp sökümü sonrası; b) kum torbalarının yerleşimi sonrası; c) tuğla duvar örme işlemi sonrası; d) sıva işlemi sonrası; e) badana sonrası	41
Şekil 3.7. Temellerin yerleşimi (Boyutlar cm cinsindendir)	42
Şekil 3.8. Temellerin oluşturulma aşamaları a) temel kalıplarının yerleştirilmesi; b) temel gijonlarının deliklere yerleştirilmesi; c) PVC borularının gijonlara sarılması; d) temel donatılarının yerleştirilmesi; e) temel betonunun dökülmesi	42
Şekil 3.9. Temellerin oluşturulması a) temel gijonları ve pvclerin, kalıpların ve donatıların yerleşimi sonrası; b) beton dökümü sonrası; c) pvc boru ve gijon detayı; d) kolon filizleri	43
Şekil 3.10. Donatıların hazırlanması a) girişlere ait etriye hazırlama plakası; b) kolon ve girişlere ait donatılar	43
Şekil 3.11. Birinci kat kalıp kurulumu ve donatı yerleşimi aşamaları a) kolon donatı filizlerine bağlanması; b) kolon kalıp yerleşimi; c) giriş kalıp yerleşimi; d) döşeme kalıp yerleşimi; e) giriş donatı yerleşimi; f) döşeme donatı yerleşimi	44
Şekil 3.12. Birinci kat kalıp kurulumu ve donatıların yerleştirilmesi a) kolon filiz detayları; b) kolon donatısının filize bağlanması; c); d) kolon kalıp yerleşimi; e) giriş ve döşeme kalıplarının ve giriş donatılarının yerleşimi; f) döşeme donatılarının yerleşimi	44
Şekil 3.13. Birinci kat beton dökümü	45
Şekil 3.14. İkinci kat kalıp kurulumu ve donatıların yerleştirilmesi a) kolon donatılarının filizlere bağlanması; b) kolon kalıplarının yerleşimi; c) giriş	

kalıplarının yerleşimi; d) döşeme kalıplarının yerleşimi; e) kiriş donatılarının yerleşimi; f) döşeme donatı	46
Şekil 3.15. İkinci kat kalıp kurulumu ve donatıların yerleştirilmesi	46
Şekil 3.16. İkinci kat beton dökümü ve kalıp sökümü sonrası	47
Şekil 3.17. Yapıya düşey yükleme için kum torbalarının yüklenmesi a); b) kumun çuvallara doldurulması (her bir çuval 25 kg olacak şekilde); c); d); e) kum torbaları katlara yerleştirildikten sonra	48
Şekil 3.18. Tuğla boyutları.....	48
Şekil 3.19. Kapı pencere lentolarının hazırlanması	48
Şekil 3.20. Tuğla duvar örme işlemi.....	49
Şekil 3.21. Sıva işlemi	49
Şekil 3.22. Badana sonrası yapının durumu	49
Şekil 3.23. GDE'lerin genel görünümü a) üç boyutlu görünüş; b) yan görünüş; c) plan görünüş.....	50
Şekil 3.24. GDE-1'in detayları	51
Şekil 3.25. GDE-2'in detayları	52
Şekil 3.26. GDE-3'ün detayları	53
Şekil 3.27. GDE-1'e ait çelik çerçeve ve BEÇÇ detayları	54
Şekil 3.28. Çelik çerçeve montaj aşamaları a) imalat sonrası; b) 1, 2 ve 3 numaralı parçaların montajı sonrası; c) 4 numaralı parçanın montajı sonrası; d) 5 numaralı parçanın montajı sonrası; e) 6 numaralı parçanın montajı sonrası.....	57
Şekil 3.29. Çelik çerçeve montajı a) montajda kullanılan ankrajlar (kirişler için 33 cm, kolonlar için 20 cm uzunluğunda); b) ankraj deliği açma işlemi; c) açılan deliğin basınçlı hava ile temizlenmesi; d) deliklere epoksi sıkılması; e) ankrajların yerleşimi.....	58
Şekil 3.30. Çelik çerçeveler ve betonarme çerçeve arasına beton dökülmesi a) mikserde betonun hazırlanması; b) kolonlar arası beton dökümü; c) ikinci kat kirişler arası beton dökümü; d) birinci kat kirişler arası beton dökümü; e) beton silindir numuneleri	59
Şekil 3.31. GDE-2'ye ait çelik çerçeve ve BEÇÇ detayları	60
Şekil 3.32. Temellerin güçlendirilme aşamaları a) temel kalıplarının yerleştirilmesi, temel gijonlarının deliklere yerleştirilmesi ve PVC borularının gijonlara sarılması; b) betonarme elemana ait temel donatılarının yerleştirilmesi; c) betonarme elemana	

ait temel betonunun dökülmesi; d) betonarme elemanın üretilmesi; e) çelik çerçevelere ait temel alt donatılarının ve temeller arası yatay ankrajların yerleştirilmesi; f) çelik çerçevelere ait temel üst donatılarının ve çelik çerçevelerin yerleştirilmesi; g) çelik çerçevelere ait temel betonunun dökülmesi; h) çelik çerçevelere ait temeldeki gijon etrafındaki pvc borularının fazla kısımlarının kesimi ve gijonların pul ve somunlarının takılması..... 61

Şekil 3.33. Temellerin güçlendirilmesi a) temel kalıplarının yerleştirilmesi, temel gijonlarının deliklere yerleştirilmesi, PVC borularının gijonlara sarılması ve betonarme elemana ait temel donatılarının yerleştirilmesi; b) betonarme elemana ait temel betonunun dökülmesi; c) çelik çerçevelerin taban plakalarına ait ankrajlar; d) çelik çerçevelere ait temel alt donatılarının ve temeller arası yatay ankrajların yerleştirilmesi; e); f) çelik çerçevelere ait temel üst donatılarının ve çelik çerçevelerin yerleştirilmesi; g) çelik çerçevelere ait temel betonu dökülmeden önce deney elemanının genel görünümü; h); i) çelik çerçevelere ait temel betonunun dökümü sonrası 62

Şekil 3.34. GDE-3'e ait çelik çerçeve ve BEÇÇ detayları 63

Şekil 3.35. Yükleme sistemi 64

Şekil 3.36. Yük protokolü..... 65

Şekil 3.37. Veri toplama sistemleri..... 65

Şekil 3.38. RDE için deplasman ölçerlerin yerleşimi a) üç boyutlu görünüm; b) ön görünüş; c) plan görünüş..... 66

Şekil 3.39. RDE'ye ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (1'inci kısım) 67

Şekil 3.40. RDE'ye ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (2'nci kısım) 67

Şekil 3.41. RDE'ye ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (3'üncü kısım) 68

Şekil 3.42. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının yerleşimleri 69

Şekil 3.43. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (1'inci kısım)..... 70

Şekil 3.44. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (2'nci kısım)..... 70

Şekil 3.45. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (3'üncü kısım)..... 71

Şekil 3.46. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının yerleşimleri 72

Şekil 3.47. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (1'inci kısım) 73

Şekil 3.48. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (2'nci kısım) 73

Şekil 3.49. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (3'üncü kısım)..... 74

Şekil 3.50. BEÇÇ elemanı detay çizimleri 75

Şekil 3.51. BEÇÇ eleman detayları	75
Şekil 3.52. BEÇÇ elemanlarının üretim ve montaj işlemleri.....	77
Şekil 3.53. Betonun silindir kalıplara yerleşimi ve test edilmesi a) kalıpların yağlanması; b) betonun kalıplara yerleşimi; c) kükürt başlıkların hazırlanması; d); e) numunelere kükürt başlığı yapımı; f); g) numunenin test cihazına yerleşimi ve test edilmesi	78
Şekil 3.54. Çelik numunelerin test edilmesi a) donatı numunesinin çekme cihazına yerleşimi; b) kopma sonrası donatı numunesi; c) Amerikan standardına göre kupon ölçüleri d) çelik malzemeden kesilmiş kupon örneği; e); f) test önce ve sonrası kupon numunesi	79
Şekil 3.55. Modelleme stratejisi.....	80
Şekil 4.1. Betonarme yapıya ait yapısal elemanların numaralandırması	83
Şekil 4.2. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	85
Şekil 4.3. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	85
Şekil 4.4. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	86
Şekil 4.5. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	87
Şekil 4.6. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	88
Şekil 4.7. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	89
Şekil 4.8. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar	90
Şekil 4.9. RDE'ye ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat görelî öteleme, 2'nci kat kesme kuvveti-2'nci kat görelî öteleme grafikleri	91
Şekil 4.10. RDE'ye ait tuğla duvar diyagonal uzama grafikleri	91
Şekil 4.11. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar	93
Şekil 4.12. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar	94
Şekil 4.13. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait duvarlarda gözlenen hasarlar	94
Şekil 4.14 Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait temel ve kolonlarda gözlenen hasarlar.....	95
Şekil 4.15. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait temel ve kolonlarda gözlenen hasarlar.....	95

Şekil 4.16. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait duvarlarda gözlenen hasarlar	96
Şekil 4.17. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar	97
Şekil 4.18. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar	97
Şekil 4.19. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar	98
Şekil 4.20. GDE-1'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat görelî öteleme, 2'nci kat kesme kuvveti-2'nci kat görelî öteleme grafikleri	99
Şekil 4.21. GDE-1'e ait çelik çerçeve mesnetleri deplasman-zaman grafikleri	99
Şekil 4.22. GDE-1'e ait BEÇÇ elemanları eksenel şekil değıştirme-zaman grafikleri	100
Şekil 4.23. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar	102
Şekil 4.24. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar	103
Şekil 4.25. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar	103
Şekil 4.26. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar	104
Şekil 4.27. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar.....	105
Şekil 4.28. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait çelik çerçevelerde gözlenen hasarlar.....	106
Şekil 4.29. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar.....	107
Şekil 4.30. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait çelik çerçevelerde gözlenen hasarlar.....	108
Şekil 4.31. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (1'inci kısım).....	109
Şekil 4.32. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (2'nci kısım)	110
Şekil 4.33. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (3'üncü kısım)	111
Şekil 4.34. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait çelik çerçevelerde gözlenen hasarlar.....	111
Şekil 4.35. Deney sırasında (%3.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (1'inci kısım).....	112

Şekil 4.36. Deney sırasında (%3.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (2'nci kısım)	113
Şekil 4.37. Deney sırasında (%3.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (3'üncü kısım)	113
Şekil 4.38. GDE-2'ye ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat görelî öteleme grafikleri....	114
Şekil 4.39. GDE-2'ye ait çelik çerçeve mesnetleri deplasman-zaman grafikleri	115
Şekil 4.40. GDE-2'ye ait BEÇÇ elemanları eksenel şekil değiştirme-zaman grafikleri	116
Şekil 4.41. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar	118
Şekil 4.42. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar	118
Şekil 4.43. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (1'inci kısım)	119
Şekil 4.44. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (2'nci kısım)	119
Şekil 4.45. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar	120
Şekil 4.46. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (1'inci kısım)	120
Şekil 4.47. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (2'nci kısım)	121
Şekil 4.48. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar	121
Şekil 4.49. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait çelik çerçevede gözlenen hasarlar	122
Şekil 4.50. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar	122
Şekil 4.51. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait çelik çerçevede gözlenen hasarlar	123
Şekil 4.52. GDE-3'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 2'nci kat kesme kuvveti-2'nci kat görelî öteleme grafikleri.....	123
Şekil 4.53. GDE-3'e ait çelik çerçeve mesnetleri deplasman-zaman grafikleri	124
Şekil 4.54. GDE-3'e ait BEÇÇ elemanları eksenel şekil değiştirme-zaman grafikleri	125

Şekil 4.55. Deney elemanlarına ait deney sonuçlarının karşılaştırılması	127
Şekil 4.56. Deney elemanlarına ait analiz sonuçları; taban kesme kuvveti-tepe deplasman.....	128
Şekil 4.57. Deney elemanlarına ait analiz sonuçları; tepe deplasman-döngü sayısı ve 2'nci kat GKÖÖ-döngü sayısı.....	130
Şekil 8.1. Deney elemanlarına ait donatı detayları a) üst görünüş; b) sol ve sağ görünüş; c) ön görünüş.....	140
Şekil 8.2. Ön tasarım çerçeveleri (moment aktaran çerçeveler)	141
Şekil 8.3. Ön tasarım çerçeveleri (moment aktarmayan çerçeveler)	142
Şekil 8.4. Ön tasarım çerçevelerinde kullanılan profillere ait kesitler.....	144
Şekil 8.5. Çelik çerçeveye ait SAP2000 analiz sonuçları a) +x yönünde yükleme durumu; b) -x yönünde yükleme durumu.....	148
Şekil 8.6. Yapma profillere ait kesitler	149
Şekil 8.7. a) Diyagonal çapraz bağlantısı ve dış yükler; b) bayrak levhası serbest cisim diyagramı; c) kiriş serbest cisim diyagramı.....	162
Şekil 8.8. GDE-1 ve GDE-2'ye ait bayrak levhalarına ait serbest cisim diyagramları	163
Şekil 8.9. GDE-3'e ait bayrak levhalarına ait serbest cisim diyagramları.....	164
Şekil 8.10. GDE-1 için tasarlanan çelik kolon taban plakalarına ait detaylar	166
Şekil 8.11. GDE-2 ve GDE-3'e ait taban plakalarına ait detaylar (birimler milimetre cinsindendir).....	170
Şekil 8.12. Ankraj tasarımı için akış şeması (Silva ve Hoehler, 2007)	171
Şekil 8.13. GDE-2 ve GDE-3'e ait Taban Plakası-1	172
Şekil 8.14. Çekme etkisinde çeliğin kopması (ACI, 2014)	175
Şekil 8.15. Çekme etkisinde çeliğin göçmesi (ACI, 2014).....	176
Şekil 8.16. Çekme etkisinde betonun kopması (ACI, 2014).....	176
Şekil 8.17. Taban plakası-1 için çekme etkisinde betonun kopması tahkiki	178
Şekil 8.18. Çekme etkisinde sıyrılma (ACI, 2014).....	179
Şekil 8.19. Kesme etkisinde beton kopması (ACI, 2014).....	180
Şekil 8.20. Kesme etkisinde kaldıraç etkisi (ACI, 2014).....	182

Şekil 8.21. Kesme ve çekme kuvvetleri etkileşim denklemi (ACI, 2014).....	183
Şekil 8.22. GDE2 ve GDE-3'e ait Taban Plakası-2.....	184
Şekil 8.23. Çelik malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	193
Şekil 8.24. RDE'ye ait düzlem dışı deplasmanlar	194
Şekil 8.25. RDE'ye ait temel deplasmanları	194
Şekil 8.26. GDE-1'e ait düzlem dışı deplasmanlar.....	195
Şekil 8.27. GDE-1'e ait temel deplasmanları	195
Şekil 8.28. GDE-1'e ait çelik ve betonarme çerçeveler arası görelî deplasmanlar.....	196
Şekil 8.29. GDE-2'ye ait düzlem dışı deplasmanlar.....	197
Şekil 8.30. GDE-2'ye ait temel deplasmanları	197
Şekil 8.31. GDE-2'ye ait çelik ve betonarme çerçeveler arası görelî deplasmanlar.....	198
Şekil 8.32. GDE-2'ye ait kaymalar (slot delikten dolayı)	198
Şekil 8.33. GDE-3'e ait düzlem dışı deplasmanlar.....	199
Şekil 8.34. GDE-3'e ait temel deplasmanları	199
Şekil 8.35. GDE-3'e ait çelik ve betonarme çerçeveler arası görelî deplasmanlar.....	200
Şekil 8.36. GDE-3'e ait Kaymalar (daireseî delikten dolayı).....	200

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. BEÇÇ'ler ile dış güçlendirme yöntemleri kullanılarak güçlendirme yapılan çalışmalara ait yapıların özellikleri	35
Çizelge 3.1. Beton karışımı (C10)	45
Çizelge 3.2. C20 kalitede beton için karışım oranı (betonarme ve çelik çerçeveler arasına dökülen beton)	58
Çizelge 3.3. C30-C35 kalitede beton için karışım oranı (güçlendirilmiş temel betonu)	61
Çizelge 3.4. BEÇÇ eleman detayları	76
Çizelge 3.5. Beton karışım oranı (C10 için)	73
Çizelge 4.1. RDE'de gözlenen hasarlar	84
Çizelge 4.2. GDE-1'de gözlenen hasarlar.....	92
Çizelge 4.3. GDE-2'de gözlenen hasarlar.....	101
Çizelge 4.4. GDE-3'te gözlenen hasarlar	117
Çizelge 4.5. Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	126
Çizelge 4.6. Deneylerden Elde Edilen Maksimum ÇE Eksenel Birim Şekil Değiştirme	126
Çizelge 4.7. Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	129
Çizelge 8.1. Çerçevelere ait ağırlık ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri	143
Çizelge 8.2. Yapma profilden imal edilen çerçevelere ait ağırlık ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri	149
Çizelge 8.3. Bayrak levhalarının boyut hesabı	165
Çizelge 8.4. RDE'ye ait beton malzemesinin mekanik özellikleri	185
Çizelge 8.5. RDE'ye ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri.....	186
Çizelge 8.6. GDE-1'e ait beton malzemelerin mekanik özellikleri	187
Çizelge 8.7. GDE-1'e ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri	188
Çizelge 8.8. GDE-2'ye ait beton malzemelerin mekanik özellikleri	189
Çizelge 8.9. GDE-2'ye ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri	190
Çizelge 8.10. GDE-3'e ait beton malzemelerin mekanik özellikleri	191

Çizelge 8.11. GDE-3'e ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri	192
---	-----



1. GİRİŞ

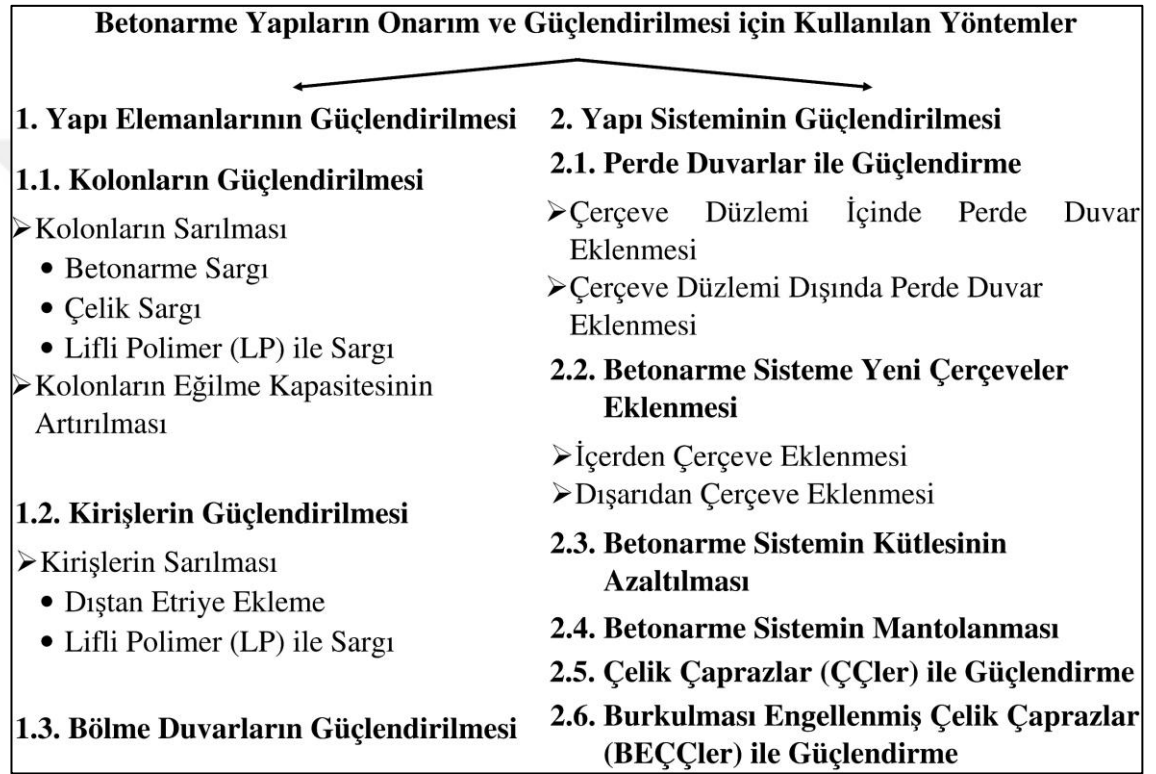
Yapıların depreme karşı güçlendirilmesi hem ülkemizde hem de diğer deprem kuşağı üzerindeki ülkelerde can ve mal kaybının en aza indirilebilmesi açısından önemli bir gereksinimdir. Ülkemizde özellikle 1999 yılından, Afet bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik (TDY 1998) yürürlüğe girmeden, önce inşa edilen ve hâlâ kullanılmakta olan yapıların can ve mal kaybı açısından ciddi risk oluşturdukları bilinmektedir. Söz konusu bu yapılarda tasarım ve yapım aşamalarındaki kontrollerin yetersiz olmasından kaynaklanan yapısal kusurlar bulunmaktadır (Özçelik vd. 2012; Özçelik vd. 2013). Bu yapısal kusurlar şu şekilde sıralanabilir;

- a) düşük beton dayanımı (10 MPa civarında),
- b) kolonlarda ve kirişlerde yetersiz sargısı uygulaması (geniş etriye aralıkları, etriye bacalarının 90° bükülmesi, etriye çapının yetersiz olması),
- c) yetersiz boyuna donatı miktarı (ülkemizdeki yapı stokundaki kolonlarda boyuna donatı oranı %1'den daha azdır),
- d) güçlü kolon-zayıf kiriş uygulamasına uyulmaması,
- e) kolon kiriş birleşim noktasında sargı bulunmaması,
- f) yetersiz bindirme boyu kullanımı.
- g) yetersiz veya hatalı projelendirme.

Yapısal kusurlara sahip mevcut betonarme yapılar için iki farklı çözüm bulunmaktadır. Bunlar; yapıların yıkılıp yeniden inşa edilmesi ve yapıların güçlendirilmesidir. Bilindiği gibi ülkemizde birçok kentsel dönüşüm projesi uygulanmaya başlanmıştır. Ancak bu kentsel dönüşüm projeleri ile yıkılıp yeniden inşa edilen yapıların sayısı mevcut kusurlu yapı stokunun çok küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle güçlendirme alternatifi ekonomik açıdan hâlâ en çok tercih edilen yöntem olarak görülmektedir. Bunun yanı sıra yapıların yıkılıp yeniden yapılmasının söz konusu olduğu durumlarda muhtemel imar mevzuatı değişikliklerinden kaynaklanan emsal azalmaları sebebiyle yapı sahipleri tarafından mecburi güçlendirme yoluna gidilmesi de günümüzde karşılaşılan diğer bir durumdur. Ayrıca kamu binaları için güçlendirme maliyetinin yeniden yapım maliyetinin yaklaşık %40'ından fazla olmaması durumunda güçlendirme seçeneği tercih edilmektedir.

Betonarme yapılarda kullanılan onarım ve güçlendirme yöntemleri Şekil 1.1'de gösterildiği gibi genel olarak yapı elemanlarının güçlendirilmesi ve yapı sistemlerinin güçlendirilmesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki güçlendirme yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar son yirmi yıldır artan bir ivmeyle devam etmektedir. Bu çalışmalar sonucunda ülkemizde kullanılan yürürlükteki deprem şartnamesine farklı güçlendirme yöntemleri eklenmiştir. Şartnamemizde mevcut olan yöntemlerden mühendisler tarafından en fazla kullanılan güçlendirme yöntemi betonarme perde duvarlar ve kolonların mantolanması ile yapılan güçlendirmelerdir. Her iki yöntemin de güvenilirliği yapılan birçok akademik çalışma ile ispatlanmıştır ve bu iki yöntem ile

hazırlanan güçlendirme projeleri ticari alanda kullanılan, statik çözümleme yapabilen paket programlarla kolaylıkla yapılabilmektedir. Ancak her iki yöntemin uygulama aşamasında güçlendirme yapılan yapının kullanılması imkânsızdır ve yapının boşaltılması gerekmektedir. Özellikle kamu binalarında yapının boşaltılması kamu hizmetinin de durdurulması anlamına gelmektedir. Bu sebeple mevcut kusurlu yapıların güçlendirilmesinde iç güçlendirmeye alternatif olarak dış güçlendirme yöntemlerinin de kullanılması uygulama açısından bir zorunluluk haline gelmiştir. Başka bir ifade ile özellikle güçlendirilecek olan binalarda mümkün mertebe iç ve dış güçlendirme alternatiflerinin her ikisinin de kullanılarak güçlendirilmenin yapılması ve mümkün mertebe dıştan müdahale edilmesi konusunda yapı sahipleri veya kullanıcıları tarafından talepler bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesi için kullanılan yöntemler

Sucuoğlu vd. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışma bunu destekler niteliktedir. Söz konusu çalışmada İstanbul'da yüksek sismik risk altındaki bazı orta katlı konutlar için uygulanabilir güçlendirme çözümleri geliştirilmiştir. Uygun bir çözüm; maliyet, güçlendirme süresi, bina sakinlerine verilen rahatsızlık, teknik uygulanabilirlik ve sosyal etkinin optimal kombinasyonu olarak kabul edilmiştir. Güçlendirme çözümleri, yapı elemanı ve yapı sistemi seviyelerinde dayanımı ve sünekliği iyileştirmek için kullanılan güçlendirme yöntemlerinin çeşitli kombinasyonlarını içermiştir. Tüm çözümler, dış ve iç güçlendirme olmak üzere iki ana alternatif sınıfa ayrılmıştır. Dış güçlendirme esas olarak bina çevresine dışarıdan eklenen perde duvarlardan oluşurken, iç güçlendirmenin temel elemanları beton dolgulu perde duvarlardır. Gerektiğinde her iki güçlendirme çözümünde de ikincil elemanlar kullanılmıştır. Bu ikincil elemanlar temel olarak, yüzeylerine kafes donatı, Fiber Takviyeli Polimer (FRP) levhalar veya ince prekast beton paneller uygulanarak

güçlendirilmiş mevcut yığma bölme duvarlardır. Her alternatifin sismik tepkisi, basitleştirilmiş performans değerlendirme prosedürleriyle hesaplanmış ve kabul edilebilirlikleri doğrulanmıştır. Daha sonra fizibiliteleri, maliyet-fayda analizi yoluyla “yık ve yeniden inşa et” alternatifine karşı test edilmiştir. Tüm çözüm alternatifleri, incelemeleri için bina sahiplerine iletilmiştir. Sonuç olarak dış güçlendirme, çoğu binada uygulanabilir çözüm olarak galip gelmiştir.

Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ’ler) hem eksenel basınç hem de eksenel çekme kapasiteleri hemen hemen aynı olan yeni nesil çelik çaprazlardır. Bunun yanı sıra BEÇÇ’lerin histeretik davranışları da oldukça stabildir. BEÇÇ’ler genel olarak çekirdek eleman (ÇE) ve burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Son yıllarda BEÇÇ’lerin ÇE ve BEM konfigürasyonlarında farklı sistemlerin denendiği çalışmalar mevcuttur (Özçelik 2016a; Özçelik vd. 2017). BEÇÇ’ler hakkında detaylı bilgi Özçelik (2016b) çalışmasında mevcuttur.

Bu tez çalışması kapsamında hem deneysel hem de analitik çalışma yapılmıştır. Söz konusu deneysel çalışmada dört adet üç boyutlu iki katlı $\frac{1}{2}$ ölçekli kusurlu betonarme yapı ters çevrimli statik yükleme altında test edilmiştir. Bu yapılardan ilki referans yapı yani güçlendirilmemiş olup diğer üç yapı BEÇÇ’li çelik çerçeveler ile yapı dışından güçlendirilmiştir. Bu güçlendirme işleminde betonarme yapı ile BEÇÇ’li çelik çerçevelerin birlikte çalışması için ankraj çubukları kullanılmıştır. Yatay istemler betonarme yapıya uygulanmış olup kullanılan ankrajlar yardımı ile BEÇÇ’li çelik çerçevelere aktarılmıştır. Ayrıca betonarme yapının dış aksında BEÇÇ’li çelik çerçeveler için ek temel uygulaması (temel güçlendirilmesi) yapılmıştır. Burada yine mevcut temeller ile ek yeni temellerin birlikte çalışması ankrajlar yardımı ile sağlanmıştır. Ters çevrimli statik yükleme altında gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına göre BEÇÇ’li çelik çerçeveler ile güçlendirilen yapıların yatay rijitliğinin ve yatay yük taşıma kapasitesi ile enerji sönümleme kapasitelerinin arttığı görülmüştür. Özellikle betonarme taşıyıcı elemanlarda yapısal hasarlar sınırlı seviyedeysen, BEÇÇ’lerin plastikleşerek enerji sönümlemesi, güçlendirilen yapının yatay istemlere karşı oldukça kararlı davranış göstermesine olanak sağlamıştır. Bu deneysel çalışmalara ek olarak OPENSEES programı kullanılarak analitik çalışmalar da yapılmış olup gerçekleştirilen sayısal modellemeler neticesinde güçlendirilmiş yapıların performans kriterleri ele alınmıştır. Tez çalışmasının sonucunda, elde edilen verilere göre BEÇÇ’lerin dış güçlendirme uygulamasında nasıl kullanılacağına dair tasarım önerileri getirilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Betonarme yapıların güçlendirilmesine dair birçok güçlendirme çalışması bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen literatür taraması kapsamında Şekil 1.1’de gösterilen yapı sisteminin dışarıdan güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar ele alınmıştır.

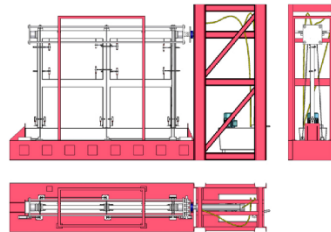
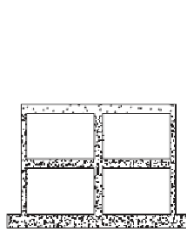
2.1. Dışarıdan Perde Duvarlar ile Güçlendirme

Betonarme yapıların güçlendirilmesi için en çok tercih edilen yöntem betonarme perde duvarlar olmuştur. Literatürde yer alan çerçeve düzlemi dışına perde duvar eklenmesi ile ilgili çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

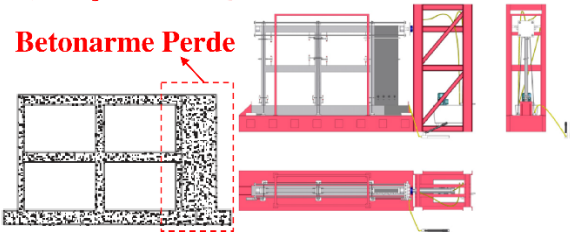
Kaltakçı vd. (2008) yeni bir teknik olarak betonarme perde duvarla dış güçlendirme yöntemini Türkiye’deki depremde zarar görmüş bazı okul binalarına uygulamışlardır. Bu yöntemi uygulamaya karar vermelerinde literatürde yer alan güçlendirme metotlarıyla problemi çözmenin uzun zaman alması, binanın işlevine müdahale edildiği için binayı kullananların bu durumdan rahatsız olması ve hem maliyetin artması hem de mevcut yöntemlerin uygulanmasının çok zor olması etkili olmuştur. Bu amaçla üç adet tipik okul projesini perde duvarla dışarıdan güçlendirmişlerdir (Şekil 2.2). Bu çalışmanın deneysel aşamasında, dış perde duvar uygulamasının performansını değerlendirmek için bir program oluşturmuşlardır. Deney programında, dikkate alınan okul binalarının tasarım ve detay verilerini kullanarak 1/3 ölçekli iki katlı ve iki açıklıklı dört adet betonarme test numunesi üretmişlerdir (Şekil 2.1). Bu numunelerden ikisi güçlendirilmemiş ikisi ise dış perde duvar uygulamasıyla güçlendirilmiştir. Üretilen numuneleri gerçek deprem yükünü temsil eden döngüsel yatay yükleme altında test etmişlerdir (Şekil 2.1).

Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, okul binalarında betonarme dış perde duvar ekleyerek güçlendirme ve sistem iyileştirmesi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda dıştan güçlendirmenin maliyeti azalttığını, uygulamayı kolaylaştırdığını, binanın mimari planı değiştirilmeden çözüm üretilebildiğini göstermişlerdir. Yapının yatay yük taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin yaklaşık dört kat arttığını ve maksimum yük seviyelerinde binanın önemli bir hasar almadığını gözlemlemişlerdir.

a) Güçlendirilmemiş Numune

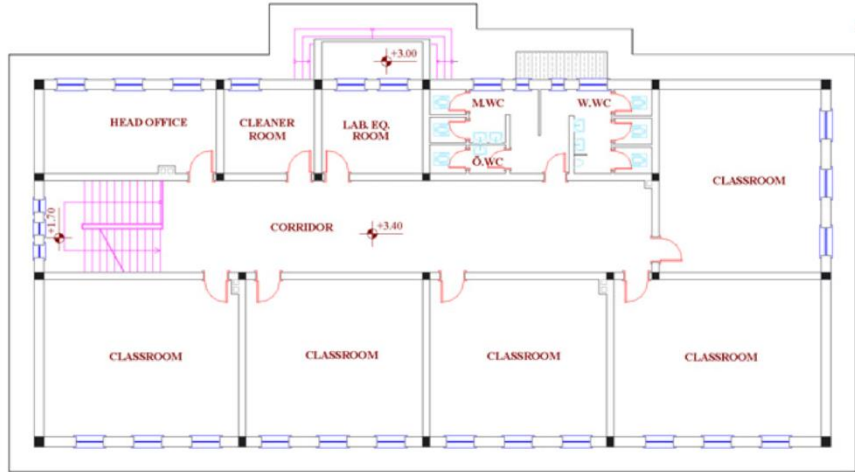


b) Güçlendirilmiş Numune

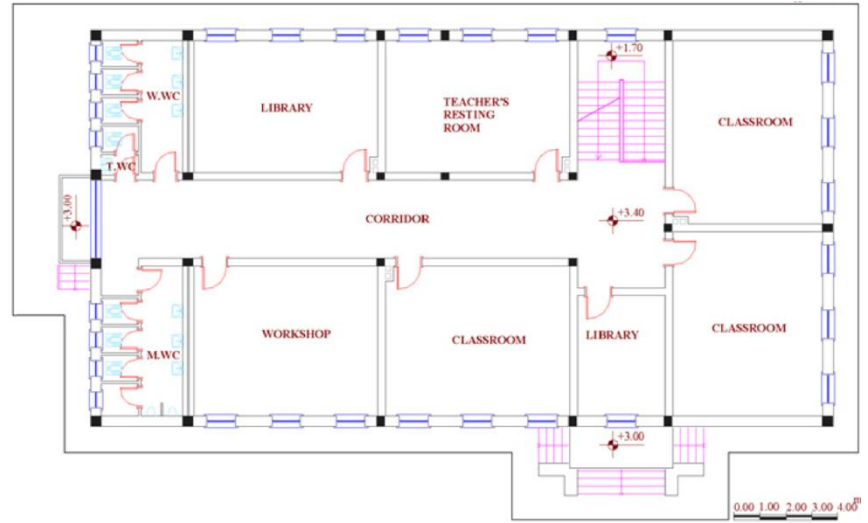


Şekil 2.1. a) Güçlendirilmemiş deney elemanları ve deney düzeneği; b) güçlendirilmiş deney elemanları ve deney düzeneği (Kaltakçı vd. 2008)

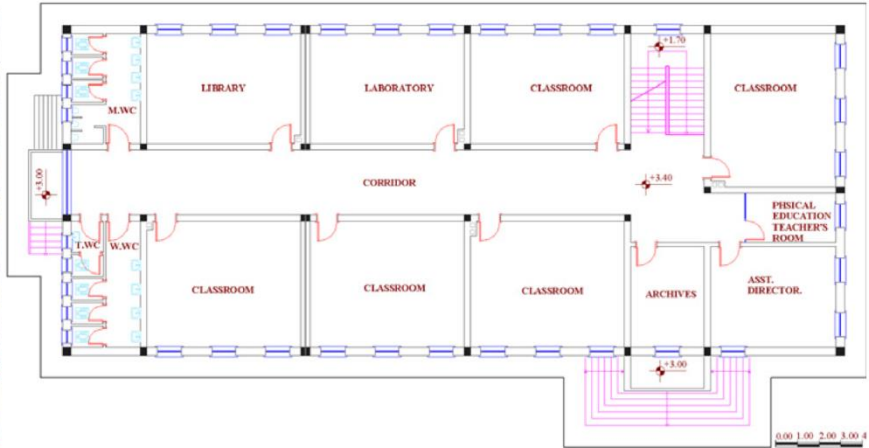
a)



b)



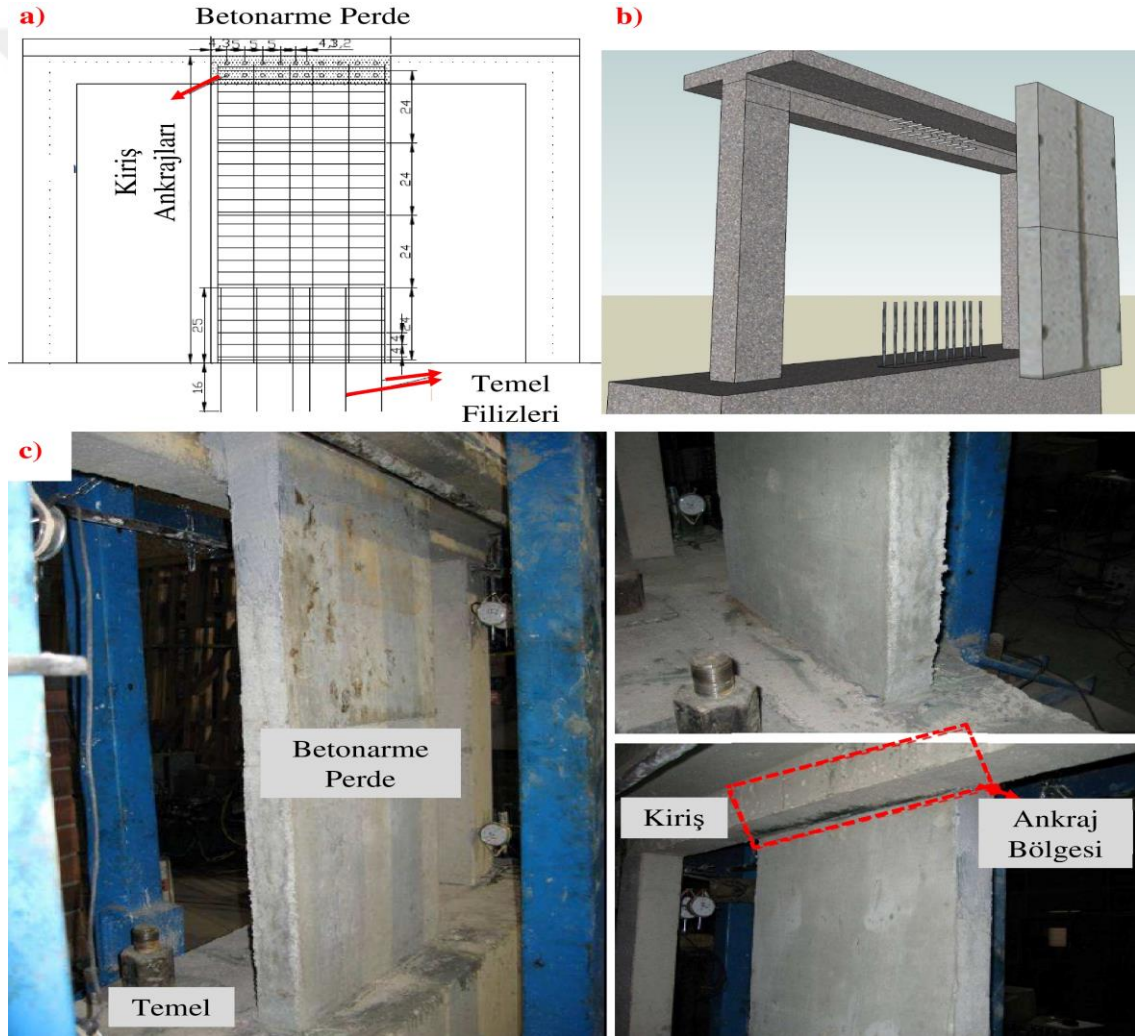
c)



Şekil 2.2. a) Tip-1 okul binasının genel görünüşü ve 1'inci kat planı (10 derslik); **b)** Tip-2 okul binasının genel görünüşü ve 1'inci kat planı (14 derslik); **c)** Tip-3 okul binasının genel görünüşü ve 1'inci kat planı (21 derslik) (Kaltakçı vd. 2008)

Özkök vd. (2009), Binici (2010) ve Özkök (2010) çalışmalarında mevcut kusurlu betonarme yapıların dışarıdan güçlendirme yöntemleri ile güçlendirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu yöntemlerden biri de dış betonarme perde duvar sistemidir. Bu sistemin kesit ve boy detay çizimleri Şekil 2.3a'da verilmiştir. Sistem, betonarme çerçeve ile temele ankrajlarla bağlanmış olup (Şekil 2.3b, c), yerinde beton dökümüyle gerçekleştirilmiştir. Beton dayanımı 50 MPa ve boyuna donatının akma kapasitesi 330 MPa'dır.

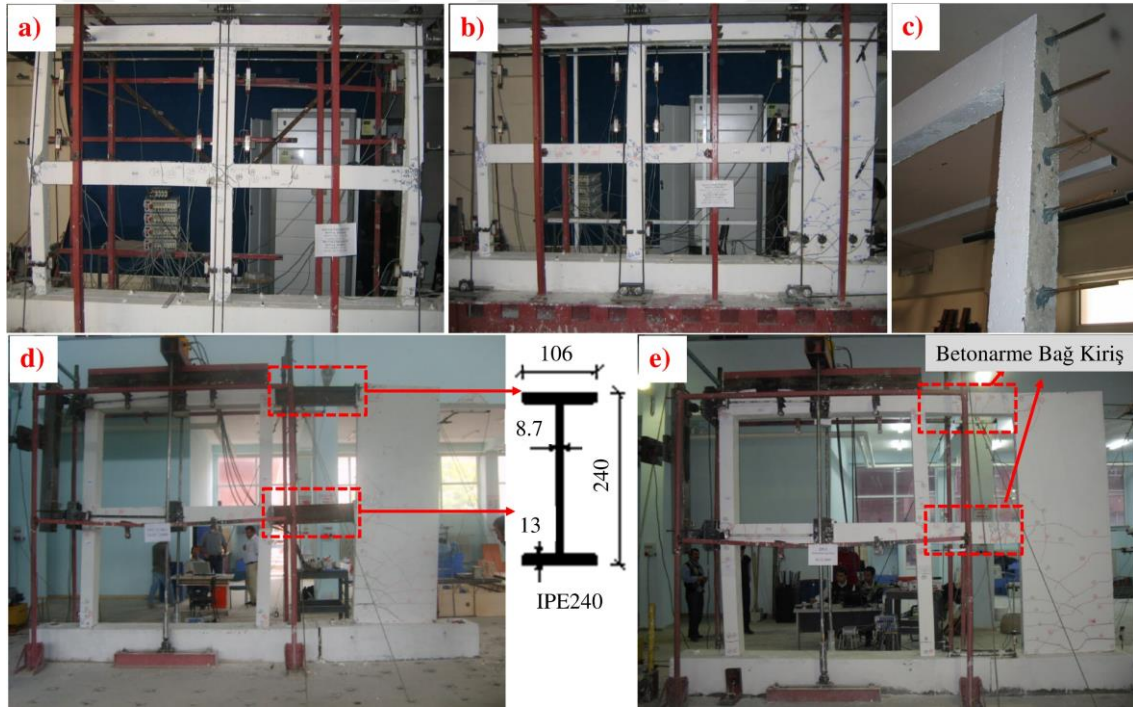
Tersinir yükleme altında gerçekleştirilen deney sonrası perdede çatlama, plastik mafsallaşma ve temel hasarı göçmeye sebep olmuştur (Şekil 2.4). Betonarme perdede %1 görelî kat öteleme oranı (GKÖÖ) sonrası eğilme çatlakları gözlemlenmiştir ve artan deformasyon istemlerinde, perde-kiriş bağlantısında pas payı betonunun koparak ankrajların ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 2.4). İleri derece temel zorlanmaları neticesinde, temel blok kopması sebebiyle %3 GKÖÖ sonrası kapasitede düşüş gerçekleşmiştir.



Şekil 2.3. Dış perde duvarla güçlendirme (Binici 2010; Özkök 2010)



Şekil 2.4. Dış perde duvarla güçlendirme deneyi sırasında oluşan hasarlar (Binici 2010)

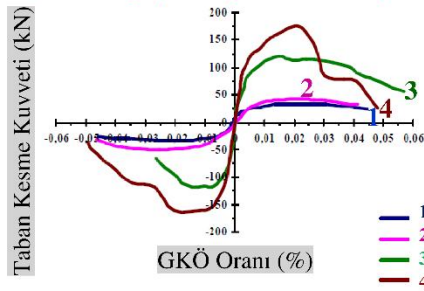


Şekil 2.5. Deneysel programdaki deney elemanları **a)** güçlendirilmemiş (boş) çerçeve; **b)** boş çerçeveye bitişik perde duvar ile güçlendirilmiş deney elemanı; **c)** boş çerçeveye bitişik perde duvar uygulamasında kullanılan ankraj çubukları; **d)** çelik bağ kirişli (IPE240) **e)** betonarme bağ kirişli (Öztürk 2010)

Kaltakçı vd. (2010) ve Öztürk (2010) çalışmalarında dış perde duvar uygulamasının performansını değerlendirmek için üretilen betonarme numuneleri test ederek dış perde duvar uygulamasının düzlem çerçeve sisteminin davranışları üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, farklı ölçekte tasarlanan ve farklı yükleme sistemleri altında test edilen betonarme numunelerin deprem yüküne karşı

davranışlarındaki değişimlerini gözlemlemişlerdir. Deneysel çalışmada iki farklı test grubu test edilmiştir. Birinci grupta depreme karşı kusurlara sahip 1/3 ölçekli iki açıklıklı, iki katlı dört adet özdeş betonarme çerçeve üretmişlerdir. Bu dört çerçeveden ikisini çerçeve sisteme bitişik dış perde uygulaması ile güçlendirirlerken (Şekil 2.5b), kalan iki çerçeve (Şekil 2.5a) için herhangi bir güçlendirme yapmamışlardır. Daha sonra tüm çerçeveleri deprem yüklerini simüle eden ters çevrimli yatay yükler altında test etmişlerdir. İkinci test grubunda farklı tipte bir perde duvar uygulamasını incelemişlerdir. Bu yöntemle güçlendirilen sistemlerin (bağ kirişi ile dış perde duvar uygulaması) deprem etkisi altındaki davranış analizini yapmak için, ters çevrimli yatay yük etkisi altında 1/2 ölçekli üç adet numuneyi test etmişlerdir. Bu üç numuneden birincisi güçlendirilmemiş, ikincisi ise çelik bağ kirişi ile betonarme çerçeveye bağlanmış bir dış perde duvar ile güçlendirilmiştir (Şekil 2.5d). Üçüncü testte ise, perde duvar betonarme bağ kirişi ile betonarme çerçeveye bağlanmıştır (Şekil 2.5e). Sonuç olarak güçlendirilmiş çerçevelerin elastik limit bölgesinde kaldığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.6).

a) Birinci grup deneylere ait sonuçlar:



1



2

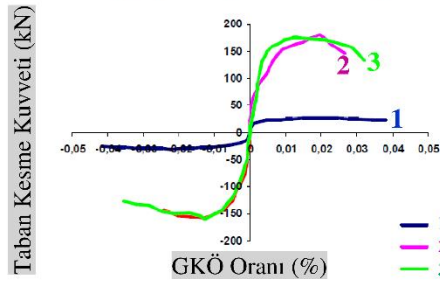


3



4

b) İkinci grup deneylere ait sonuçlar:



1



2



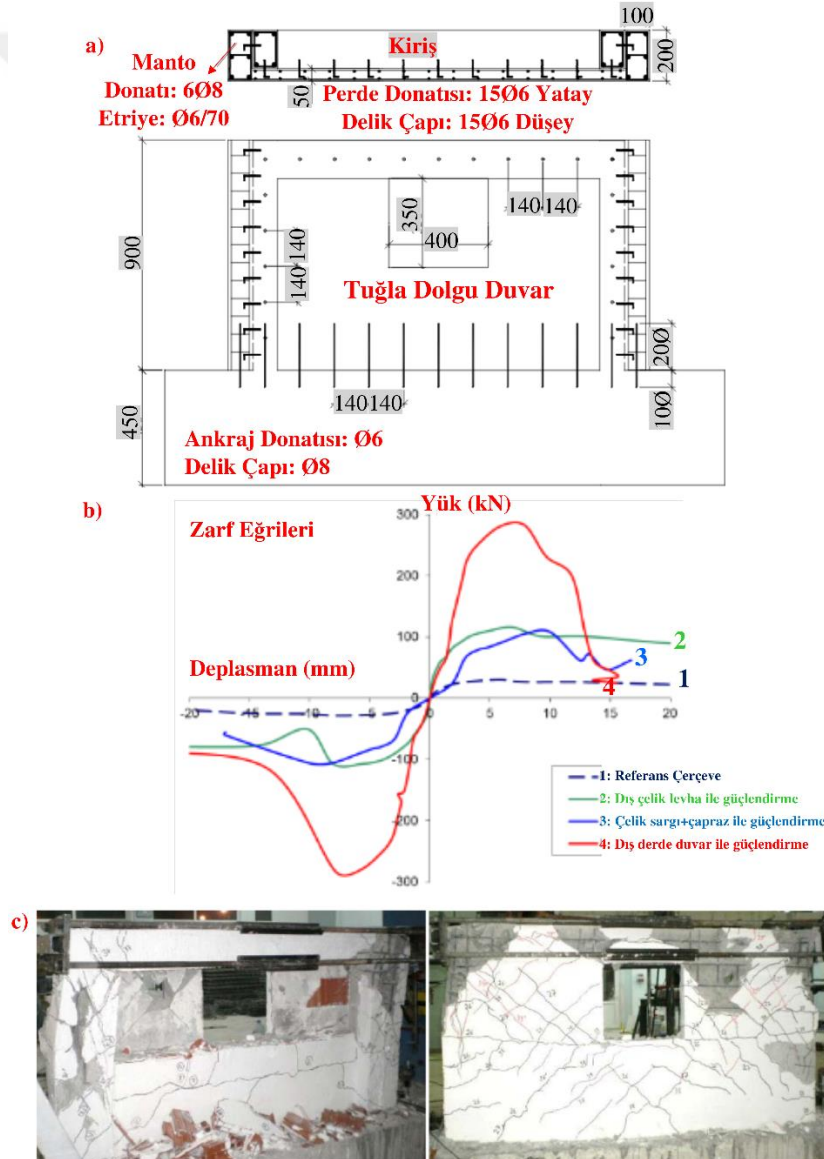
3

Şekil 2.6. Deneysel sonuçlar (Kaltakçı vd. 2010)

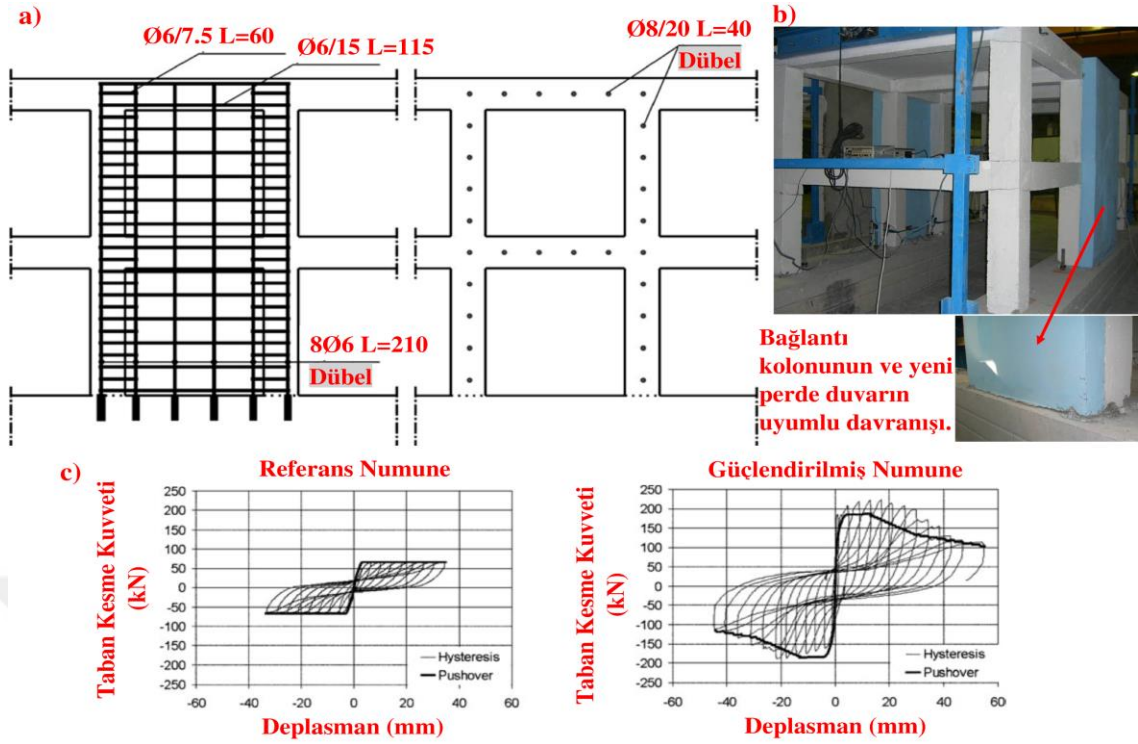
Kamanlı vd. (2011) yaptıkları çalışmada tek katlı tek açıklıklı 1/3 ölçekli ve depreme karşı çeşitli yetersizliklere sahip betonarme çerçeveler üretmişlerdir (Şekil 2.7a). Bu çerçeveler tuğla duvarlı ve 400x350 mm boyutunda pencere boşluğuna sahiptirler (Şekil 2.7a). Daha sonra bu numunelerde bazısını pencere boşluğu dikkate alınarak perde duvar ile dıştan güçlendirmişlerdir (Şekil 2.7a). Tersinir tekrarlanır yatay yüklemeler altında yaptıkları deney sonuçlarına göre dış perde duvar ile güçlendirilmiş numuneye ait yatay yük kapasitesinin, diğer güçlendirme metotlarıyla kıyaslandığında, önemli derecede arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.7b).

Deney sırasında ilk olarak pencere boşluğu alt hizasında ve duvar çerçeve birleşim bölgesinde çatlakların oluştuğunu ve sonraki yüklemelerde oluşan bu çatlakların duvarın temel-kolon birleşim yönünde ilerlediğini ve nihayet perde duvarda da çatlak oluşmaya başladığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.7c).

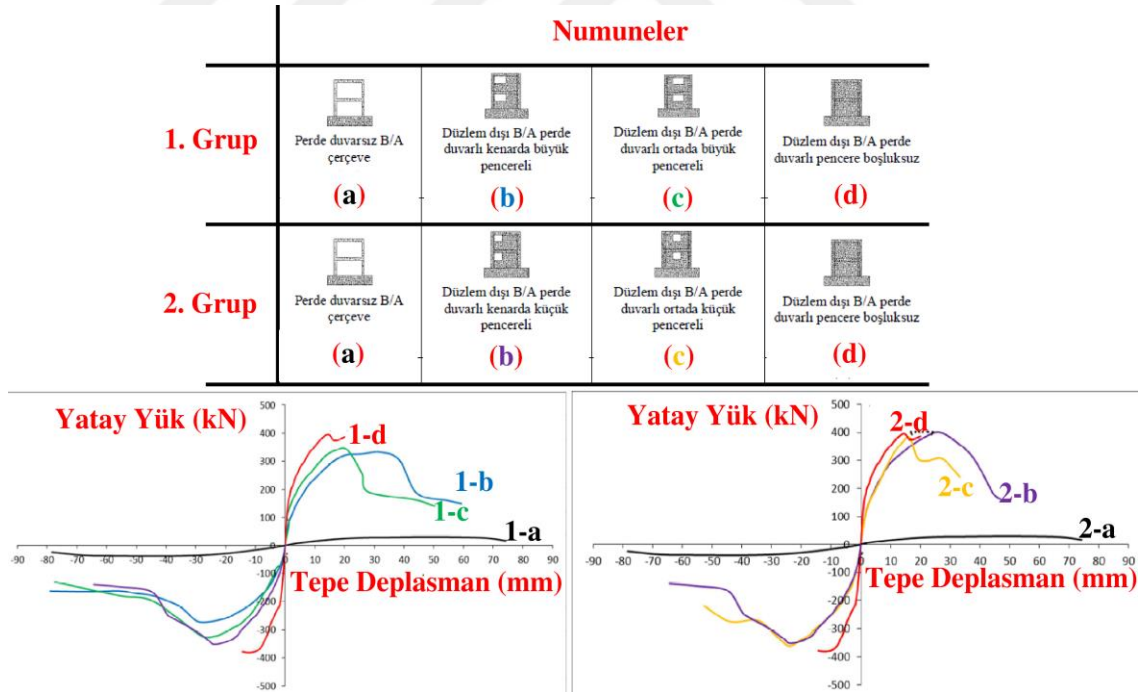
Kaplan vd. (2011) çalışmalarında, betonarme yapılar için yeni bir güçlendirme alternatifi olan dış perde duvarları, ters çevrimsel yükleme altında deneysel olarak test etmişlerdir. Böylelikle bina kullanıcılarını rahatsız etmeden veya yenileme sırasında binayı boşaltmadan yapıların güçlendirilmesini mümkün kılmayı hedeflemişlerdir. Bu teknikle perde duvarları binanın dış cephelerine paralel olarak döşemişlerdir (Şekil 2.8a, b). Dış perde duvar uygulamasının betonarme yapıların yatay yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır. Deneysel sonuçların da sayısal çözümlerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir (Şekil 2.8c). Direkt ekli dış perde duvarların, yapının monolitik bir üyesi gibi davrandığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.8b).



Şekil 2.7. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Kamanlı vd. 2011)



Şekil 2.8. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Kaplan vd. 2011)

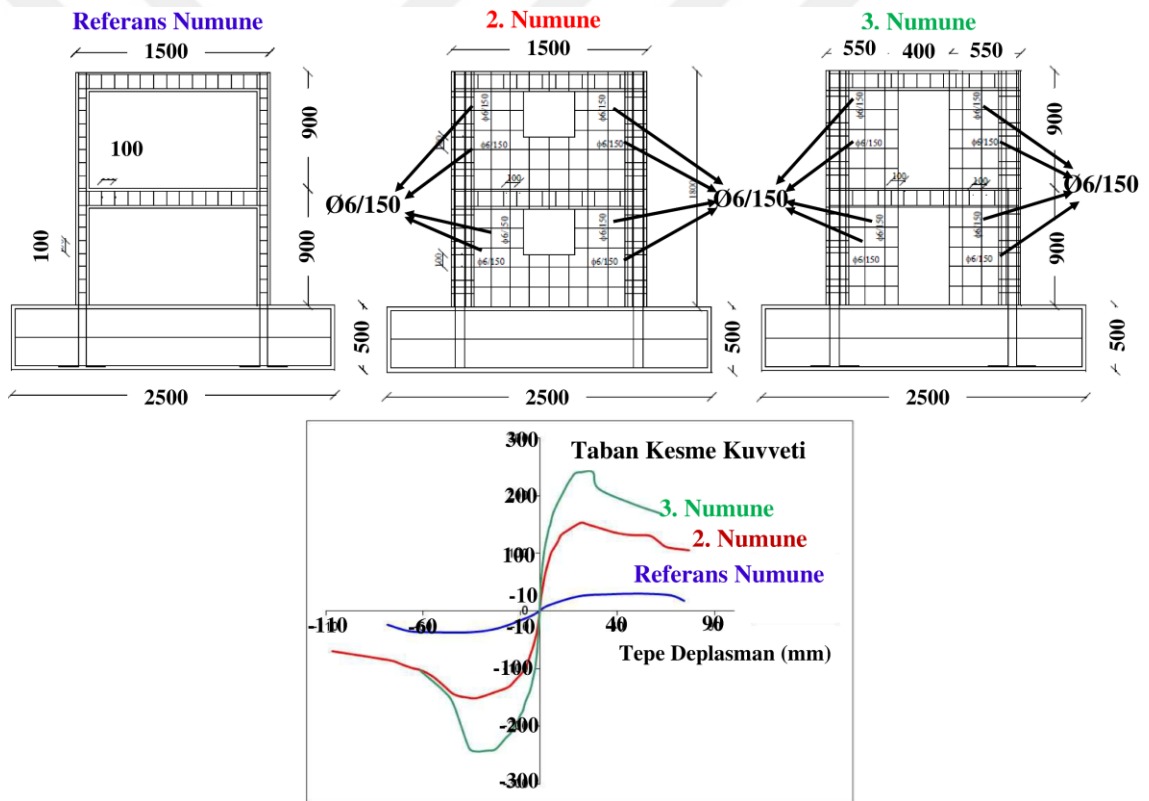


Şekil 2.9. Deneysel çalışma ile ilgili detaylar (Bahadır 2012)

Bahadır (2012) tez çalışmasında Türkiye'deki binalarda sıklıkla gözlenen kusurlara sahip 1/3 ölçekli, iki katlı ve tek açıklıklı altı adet betonarme çerçeveyi, tersinir tekrarlanır yatay yükler ve sabit düşey yükler altında test etmiştir. İlk numune, güçlendirilmemiş referans numunesidir. Diğer numuneler ise pencere boşluksuz düzlem

dışı tam betonarme perde duvarla ve pencere boşluğuna sahip düzlem dışı betonarme perde duvarla güçlendirilmiş numunelerdir. Çalışmada kullandığı parametreler, pencere boşluğunun boyutu ve konumudur. Güçlendirme uygulaması yapılan numunelerin kolonları betonarme manto ile sarılmıştır. Test edilen bu deney elemanlarına ait zarf eğrileri Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Test sonuçları dıştan perde duvarlarla güçlendirme yönteminin betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini, rijitliğini ve enerji tüketimini önemli oranlarda arttırdığını göstermiştir.

Ünal vd. (2013) çalışmalarında mevcut çerçevelerin dış perde duvar ile güçlendirilmesini önermişlerdir. 1/3 ölçekli numuneleri, sismik hareketi simüle eden ters çevrimsel yükleme altında test etmişlerdir. Numuneler, mevcut eski yapıları temsil etmek için çeşitli tasarım hatalarına sahiptir. Numunelerden biri güçlendirilmemiş referans numunesidir. Diğer numuneleri ise dış perde duvarla fakat farklı konfigürasyonlarla güçlendirmişlerdir. Bu numunelerden biri pencere açıklığı içeren bir numunedir. Diğer numunede ise perde duvarları iki parçaya ayırmışlardır. Yük-yer değiştirme zarf eğrileri Şekil 2.10’da gösterilmektedir.

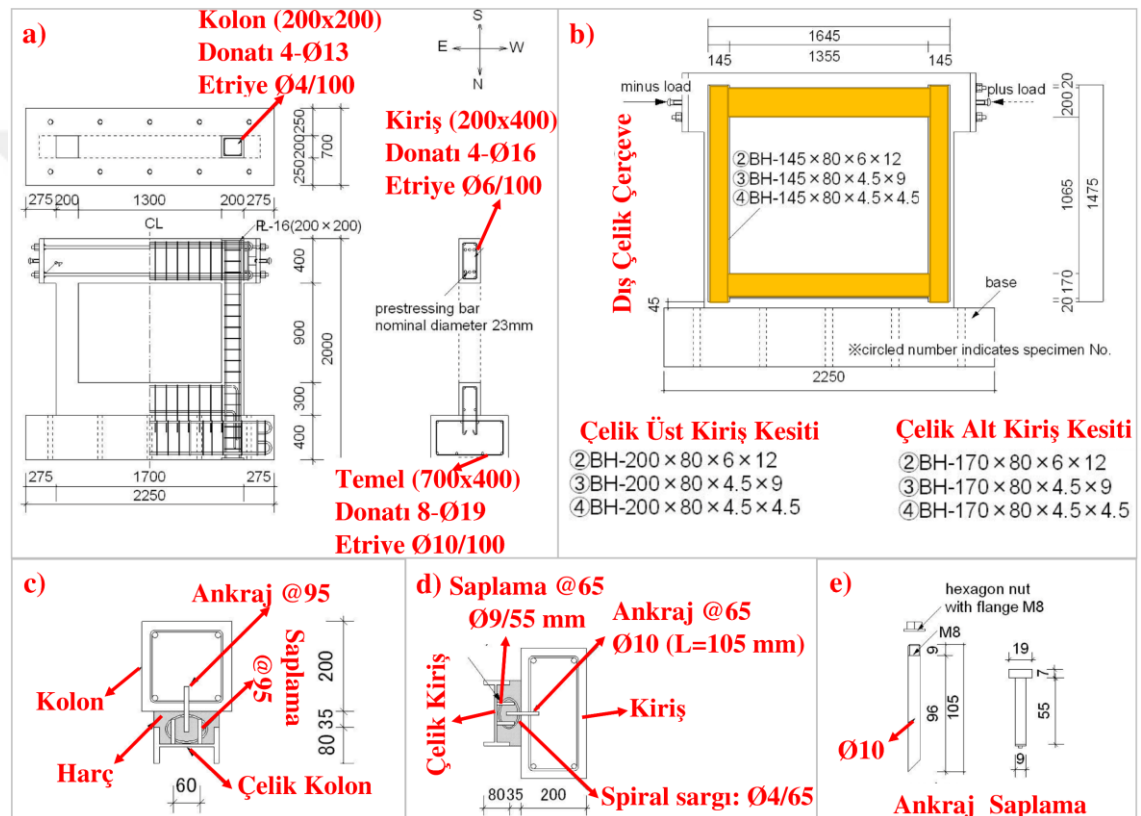


Şekil 2.10. Deneyel çalışma ile ilgili detaylar (Ünal vd. 2013)

2.2. Betonarme Sisteme Dışarıdan Yeni Çerçeve Eklenmesi

Betonarme yapıların güçlendirilmesi için kullanılan yeni bir yöntem olan betonarme yapıya yeni çerçeveler eklenmesi konusundaki çalışmalar betonarme çerçeve düzleminin içine ve dışına çerçeve eklenen çalışmalar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında çerçeve düzlemi dışına çerçeve eklenmesi ile ilgili çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

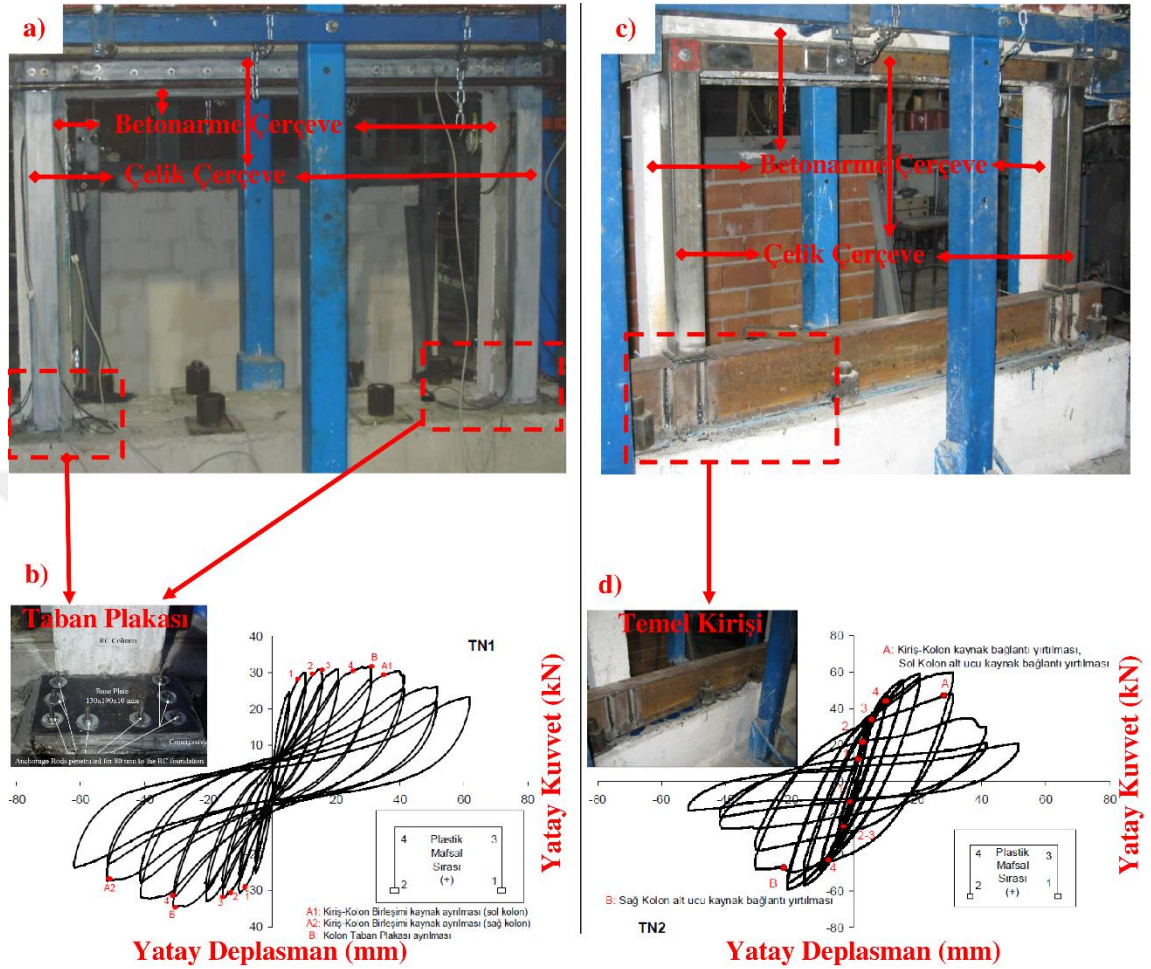
Furukawa vd. (2004) çelik portal çerçeveler (Şekil 2.11b) kullanarak yeni bir güçlendirme yöntemi sunmuşlardır. Bu çalışmaya, çeliğin elastisite modülünün betonunkinin yaklaşık 10 katı olduğuna odaklanarak başlamışlardır. Bu gerçeği kullanarak, betonarme çerçeveye kıyasla daha küçük kesitli çelik portal çerçeve ile zayıf betonarme çerçeveye (Şekil 2.11a) yeterli rijitlik ve mukavemet katabilmişlerdir. Portal çerçeveleri, rijitliği betonarme bölümlerinin rijitliğine eşit olacak şekilde ayarlanmış I profillerden oluşturmuşlardır. Çelik portal çerçeveleri, betonarme binaya dışarıdan bağlamışlardır. Bağlantı detayları ve kullanılan bağlantı elemanları Şekil 2.11c, d, e’de görüldüğü gibidir. Deneyisel yaklaşımla, Portal-Grid yöntemini kullanarak betonarme çerçevelerin dayanımının oldukça arttığını kanıtlamışlardır.



Şekil 2.11. Deney numunelerinin özellikleri (Furukawa vd. 2004)

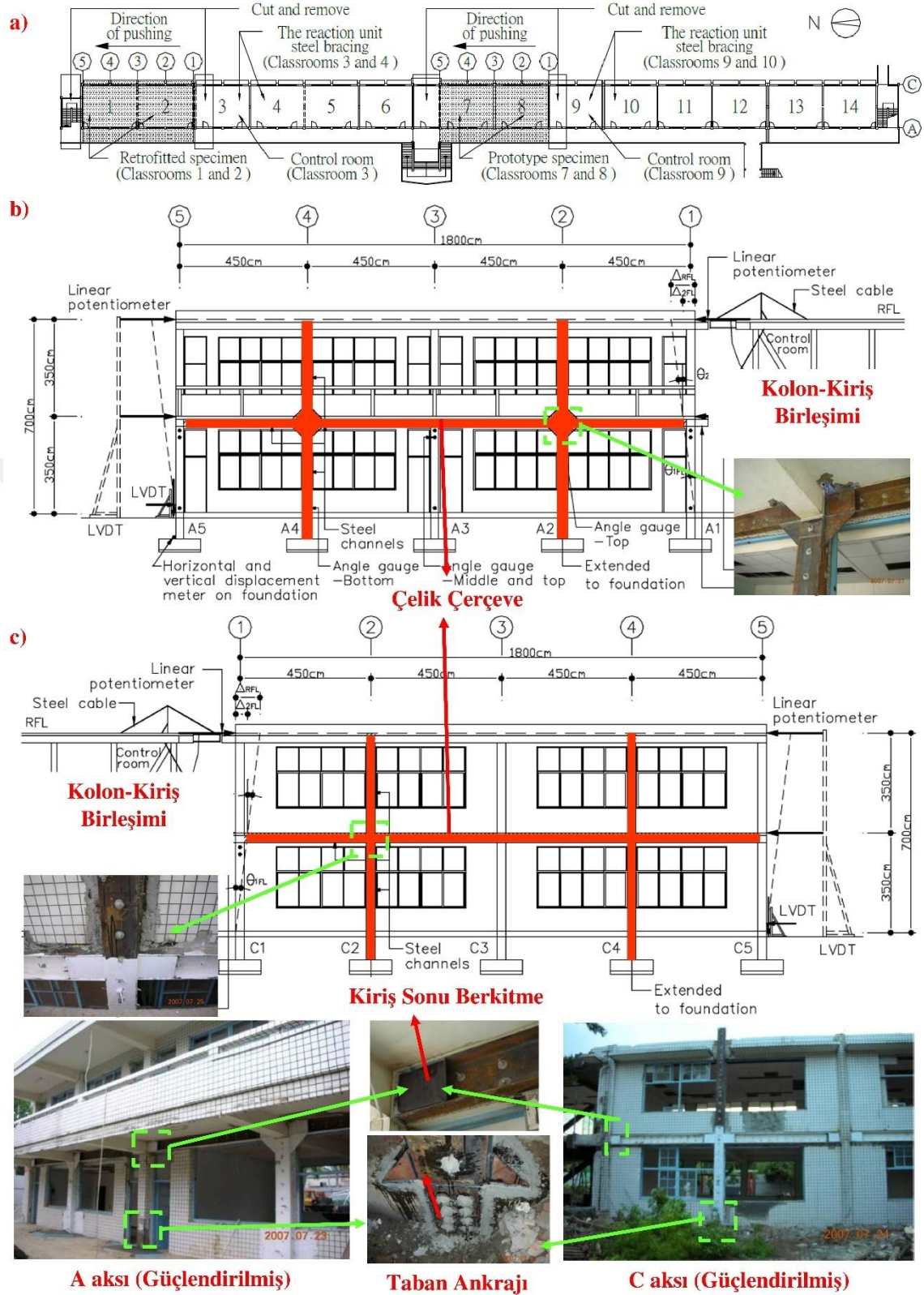
Özkök vd. (2009), Binici (2010) ve Özkök (2010) çalışmalarında dış güçlendirme yöntemi olarak dış çelik çerçeve sistemini uygulamışlardır. Bu kapsamda, toplamda iki adet güçlendirilmiş deney numunesini test etmişlerdir. Kare tipi kutu profil kullanarak kaynaklı birleşimlerle oluşturulan moment aktaran tek açıklıklı çelik çerçeveyi, kusurlu betonarme çerçeveye ve mevcut temele bağlamışlardır (Şekil 2.12). Deney numunelerin birinde çelik çerçeveyi çelik ankraj çubukları ile betonarme kirişe ve temele bağlamışlardır (Şekil 2.12a, b). Diğer deney numunesinde ise çelik çerçeveyi betonarme temel üzerine ankrajlanan temel kirişi olarak adlandırılan, rijit bir I profile (Şekil 2.12c, d) kaynaklamışlardır. Şekil 2.12a, b’de görüldüğü üzere temel kirişi aracılığıyla betonarme temele ankrajlanan çelik çerçeve ile güçlendirilmiş deney numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi, çelik ankraj çubukları ile temele bağlanan

çelik çerçeve ile güçlendirilmiş deney numunesinin yatay yük kapasitesinin yaklaşık iki katı kadar olarak tespit edilmiştir.



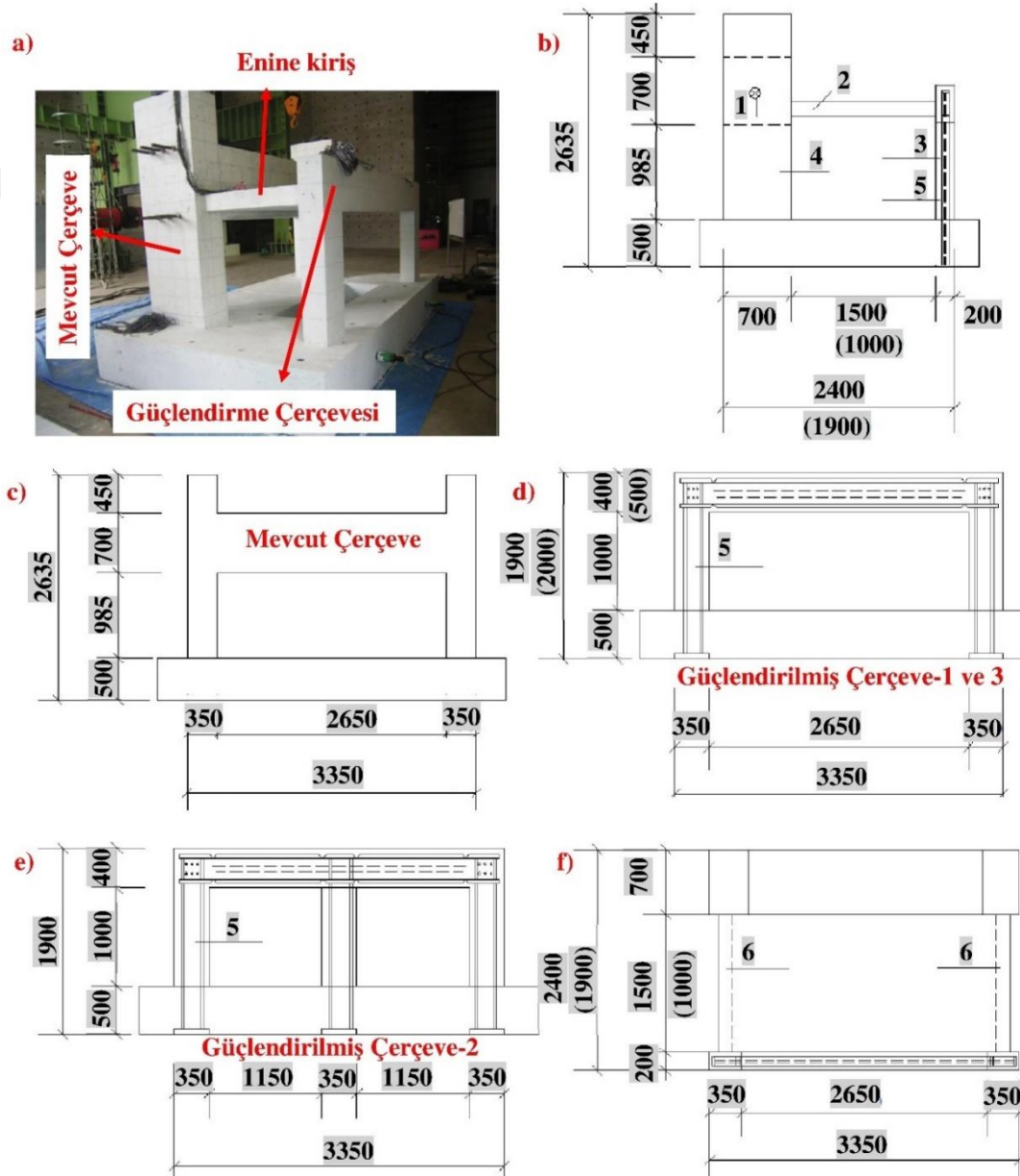
Şekil 2.12. Deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları (Özkök vd. 2009; Binici 2010; Özkök 2010)

Hsiao vd. (2013) ve Shih vd. (2015) Tayvan'ın Tainan şehrindeki Guan-miao İlköğretim Okulu binasının sismik performansını belirlemek için yerinde itme deneyleri ve analitik sismik performans değerlendirmeleri yapmışlardır. Okul binasına ait plan görünüş Şekil 2.13a'da verilmiştir. A ve C aksındaki betonarme çerçeveler Şekil 2.13b, c'de görüldüğü üzere çelik çerçeveler ile dıştan güçlendirilmişlerdir. A aksındaki çerçevedeki güçlendirme sisteminin, C aksındakinden farkı kolon kiriş birleşimlerinde üçgen berkitmelerin kullanılmasıdır (Şekil 2.13b, c). Deney sonuçları, önerilen güçlendirme sisteminin, taban kesme kapasitesini ve numunelerin sünekliğini etkili bir şekilde artırdığını, bunun betonarme okul binalarının güçlendirilmesi için uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.13. Deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları (Hsiao vd. 2013; Shih vd. 2015)

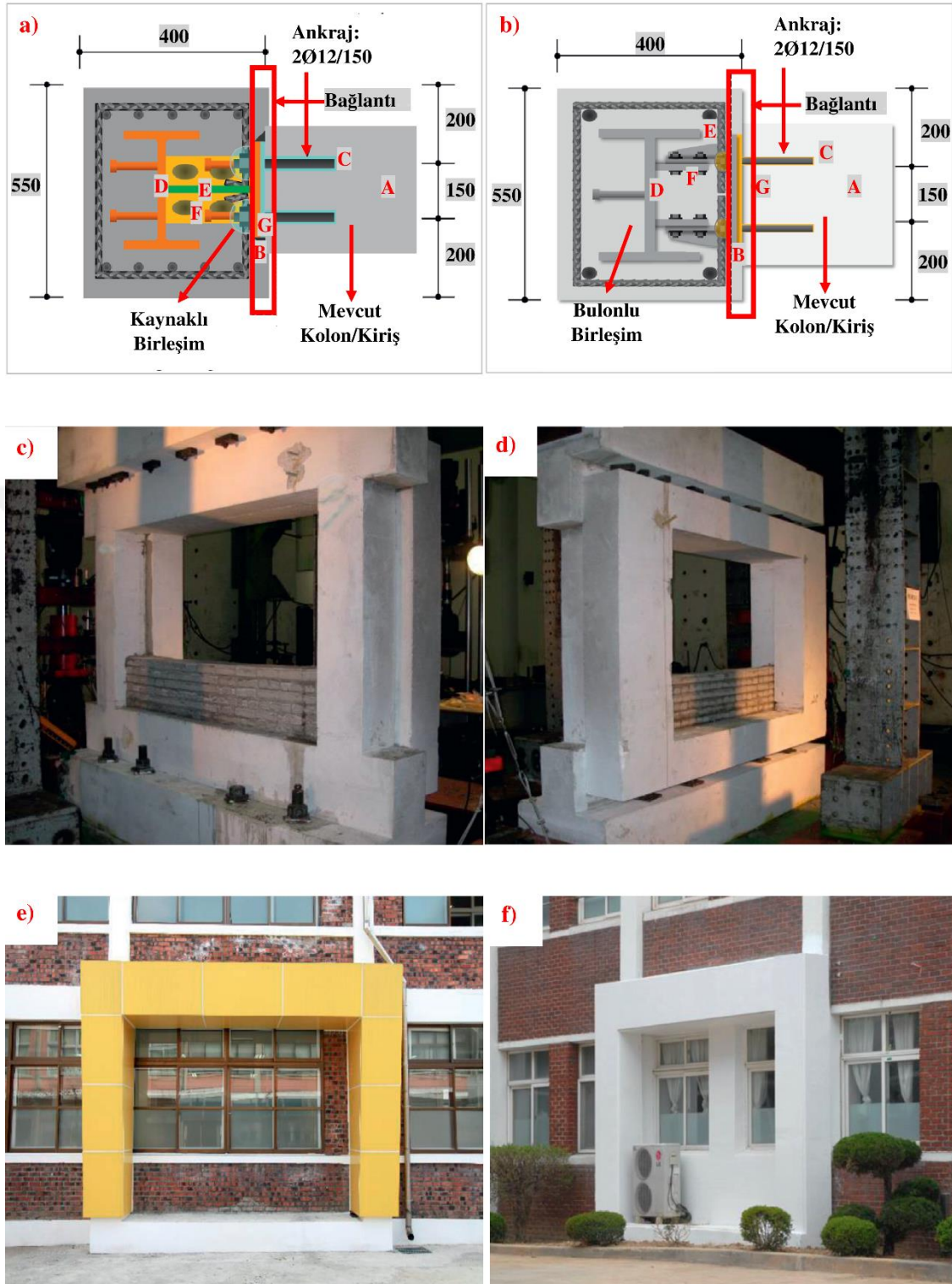
Liu vd. (2016) betonarme yapılar için yeni bir güçlendirme yöntemi olan yapılara dışarıdan güçlendirme çerçevesi eklenmesi metodunu önermişlerdir (Şekil 2.14a). Güçlendirme çerçevesini, fiber beton kaplı çelik çerçeve, bağlantı levhası ve enine kirişlerden oluşturmuşlardır. Güçlendirme çerçevesini, bir bağlantı levhası ve enine kirişler aracılığıyla mevcut çerçeveye (Şekil 2.14c) bağlamışlardır. Bir adet güçlendirilmemiş ve üç adet güçlendirilmiş numune olmak üzere toplamda dört adet numuneyi Pseudo-Statik testlere tabi tutmuşlardır (Şekil 2.14d, e). Sonuçlar, yatay yük taşıma kapasitesinin belirgin bir şekilde arttığını ve döşemenin genişletme uzunluğunun ve dış çerçevedeki kolon sayısının mevcut yapının performansı üzerinde etkileri olduğunu göstermiştir.



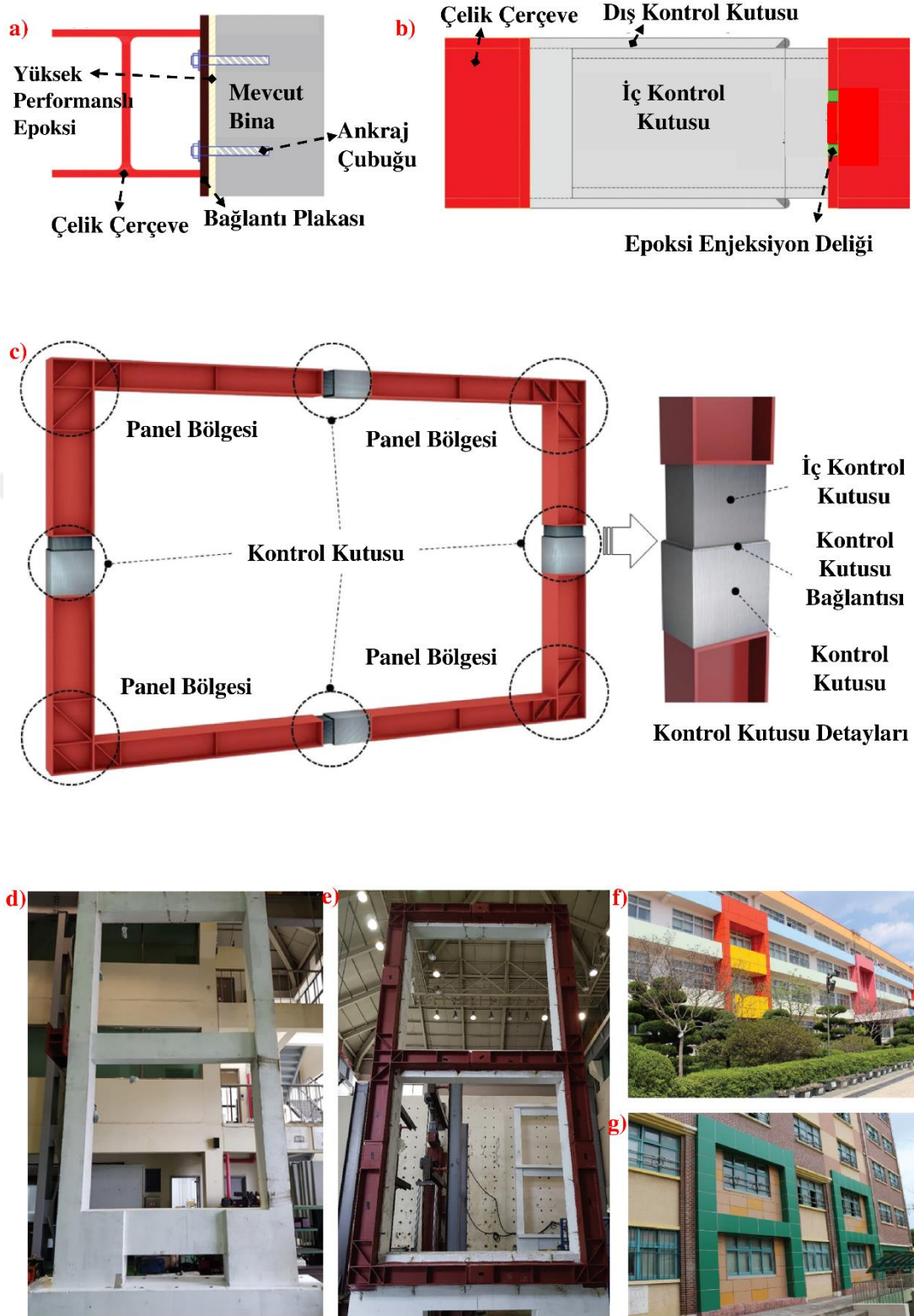
Şekil 2.14. Deney numunelerinin özellikleri **a)** genel görünüm; **b)** yan görünüş; **c)** güçlendirilmemiş çerçeve (ön görünüş); **d); e)** güçlendirilmiş çerçeveler (ön görünüş) **f)** güçlendirilmiş çerçeveler (plan görünüş) (Liu vd. 2016)

Jung ve Lee (2020) orta ve az katlı betonarme binaların güçlendirilmesi için kompozit (çelik profil + beton) çerçeve sistemi ile dışarıdan güçlendirme yöntemi geliştirmişlerdir. Mevcut betonarme çerçeve ve güçlendirme elemanlarının birleşimi için iki farklı metot (bulonlu birleşim ve kaynaklı birleşim) geliştirmişlerdir (Şekil 2.15a, b). Güçlendirilmemiş test numunelerini Kore’de depreme karşı kusurlu mevcut bir betonarme binayı temel alarak tasarlamışlar ve ardından dış çerçeve sistemi ile güçlendirmişlerdir (Şekil 2.15c, d). Sismik güçlendirmenin etkinliğini doğrulamak için deney numunelerini dinamik benzeri ve döngüsel yüklemeler altında test etmişlerdir. Döngüsel yükleme testi için bir adet (güçlendirilmemiş kontrol numunesi), dinamik benzeri testler içinse; bir adet güçlendirilmemiş kontrol numunesi, kaynaklı ve bulonlu birleşim yöntemiyle güçlendirilmek için birer adet numune olmak üzere toplamda dört adet betonarme çerçeve hazırlamışlardır. Test sonuçları mevcut betonarme çerçeveyi güçlendirme çerçevesine bağlamak için kullanılan hem bulonlu hem de kaynaklı birleşim yöntemlerinin nihai yatay yük taşıma kapasitesini etkili bir şekilde arttırdığını ve büyük ölçekli depremlerde yapının deplasmanını azalttığını göstermiştir. Geliştirdikleri bu yöntemi sahada da uygulamışlardır (Şekil 2.15e, f).

Jung vd. (2021) orta ve az katlı betonarme binaların güçlendirilmesi için dışarıdan çelik çerçeve (Şekil 2.16c) ekleme yoluyla sismik güçlendirme için yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Çelik çerçevenin betonarme binaya montajı için kullanılan birleşim detayı Şekil 2.16a’daki gibidir. Geliştirdikleri bu teknik, bina sakinleri bina içinde yaşamaya devam ederken uygulanabilir bir yöntemdir. Ayrıca çelik çerçevenin montajında yaşanabilecek sıkıntılarla başa çıkmak için uzunluk ayar cihazı olarak kullanılabilecek bir kontrol kutusu tasarımı geliştirmişlerdir (Şekil 2.16b, c). Kore’de bulunan mevcut kusurlu yapılara sahip iki adet tam ölçekli iki katlı betonarme çerçeveden birini kontrol numunesi olarak test etmişler (Şekil 2.16d) diğerini ise çelik çerçeve ile dışarıdan güçlendirmişlerdir (Şekil 2.16e). Dinamik benzeri testler sonucunda geliştirdikleri güçlendirme yönteminin nihai yatay yük taşıma kapasitesini etkili bir şekilde arttırdığını ve deplasmanları azalttığını ortaya koymuşlardır. Yaptıkları analizlerle test sonuçları örtüşmüştür. Ayrıca geliştirdikleri bu yöntemi sahada da uygulamışlardır (Şekil 2.16f, g).



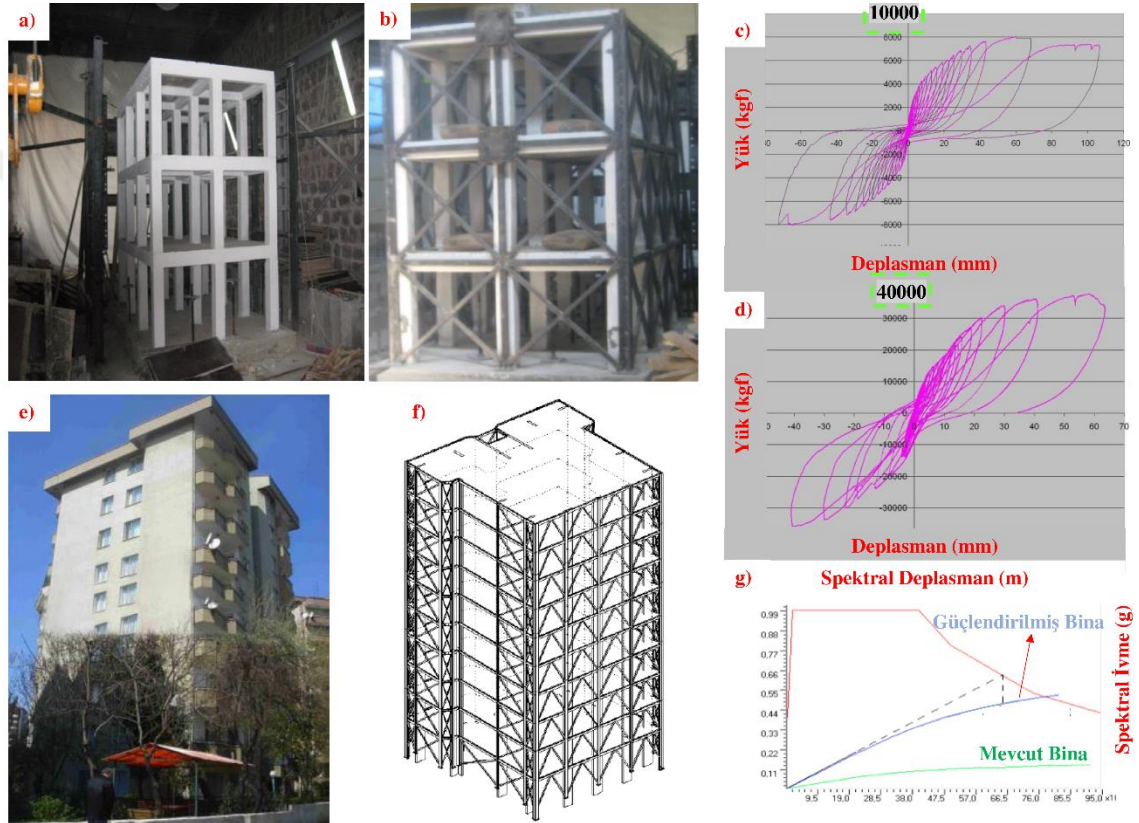
Şekil 2.15. Deney numunelerinin özellikleri **a)** kaynaklı birleşim yöntemi; **b)** bulonlu birleşim yöntemi; **c); d)** güçlendirilmiş çerçevenin ön ve arka izometrik görünüşü ve **e); f)** güçlendirilme yönteminin saha uygulamaları (Jung ve Lee 2020)



Şekil 2.16. Deney numunelerinin özellikleri **a)** birleşim yöntemi; **b)** kontrol kutusu; **c)** çelik çerçeve detayları; **d)** güçlendirilmemiş çerçeve; **e)** güçlendirilmiş çerçeve; **f)**; **g)** güçlendirilme yönteminin saha uygulamaları (Jung vd. 2021)

2.3. Betonarme Sistemin Mantolanması

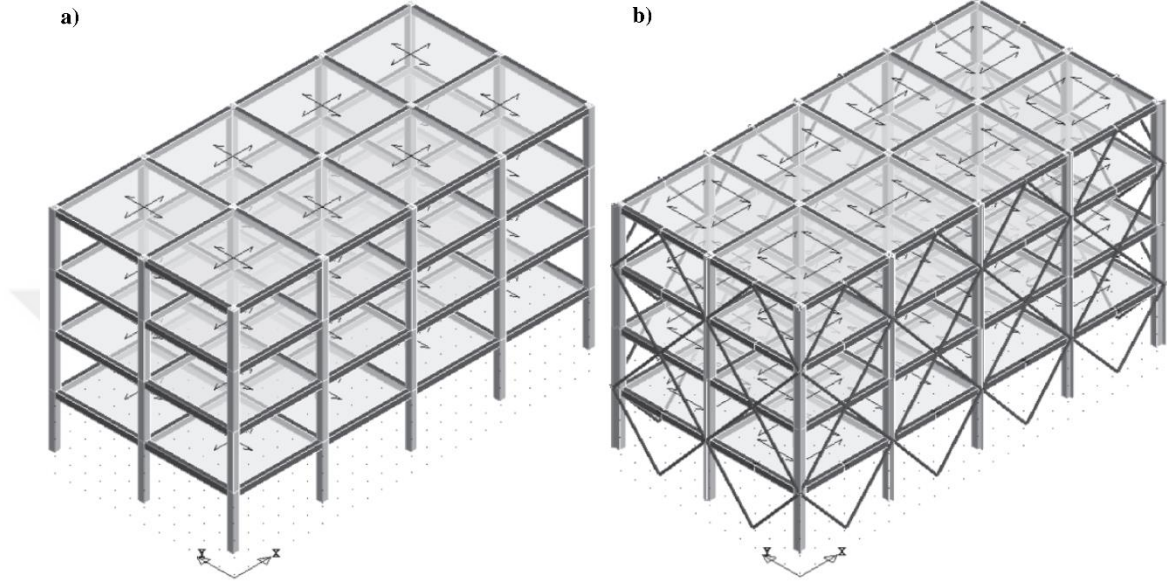
Balkaya (2017) betonarme yapıların güçlendirilmesi için yeni bir teknik olan, betonarme çerçeveye (Şekil 2.17a) ankrajlarla bağlanan çelik çaprazların kullanıldığı, tüm yapının dışına uygulanan mantolama sistemini (Şekil 2.17b) statik döngüsel itme yüklemesi altında test etmiştir. Modelleri doğrulamak için deneysel ve analitik sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuçlar, mantolama sistemi ile güçlendirilen yapıların sismik kapasitelerinin güçlendirilmemiş yapılara göre dört kat arttığını göstermiştir (Şekil 2.17c, d). Bu sistemi on katlı bir konuta uygulamış ve sonuç olarak bu güçlendirme yönteminin betonarme yapıların sismik performansını etkin bir biçimde arttırdığını ortaya koymuştur (Şekil 2.17e, f, g).



Şekil 2.17. Deney numunelerinin özellikleri **a)** güçlendirilmemiş model; **b)** güçlendirilmiş model; **c)** güçlendirilmemiş modele ait test sonucu; **d)** güçlendirilmiş modele ait test sonucu; **e)** güçlendirilmemiş bina; **f)** güçlendirilmiş bina modeli; **g)** binaya ait analiz sonuçları (Balkaya 2017)

Reggio vd. (2019) yapısal kontrol sistemi olarak dış iskelet yapıların araştırılmasına odaklanmışlardır. Dış iskelet yapıyı, kütlesi, rijitliği ve sönümlenme özelliği değişebilen ve muhtemelen birincil yapının tepkisini kontrol etmek amacıyla tasarlanmış dinamik bir sistem olarak modellemişlerdir (Şekil 2.18). Birincil yapı ile dış iskelet yapı arasında enerji tüketmeyen rijit bir bağlantı olduğunu varsaymışlardır. Birleştirilmiş sistemin dinamik davranışına ilişkin ilk veriyi frekans olarak elde etmişlerdir. Dinamik dengeyi boyutsuz biçimde ayarlamışlar ve harmonik zemin hareketine tepkiyi, değişen sistem parametreleri kullanarak analiz etmişlerdir. Karmaşık değerli frekans tepkisi fonksiyonlarını, göreceli yer değiştirme, mutlak ivme ve iletilen

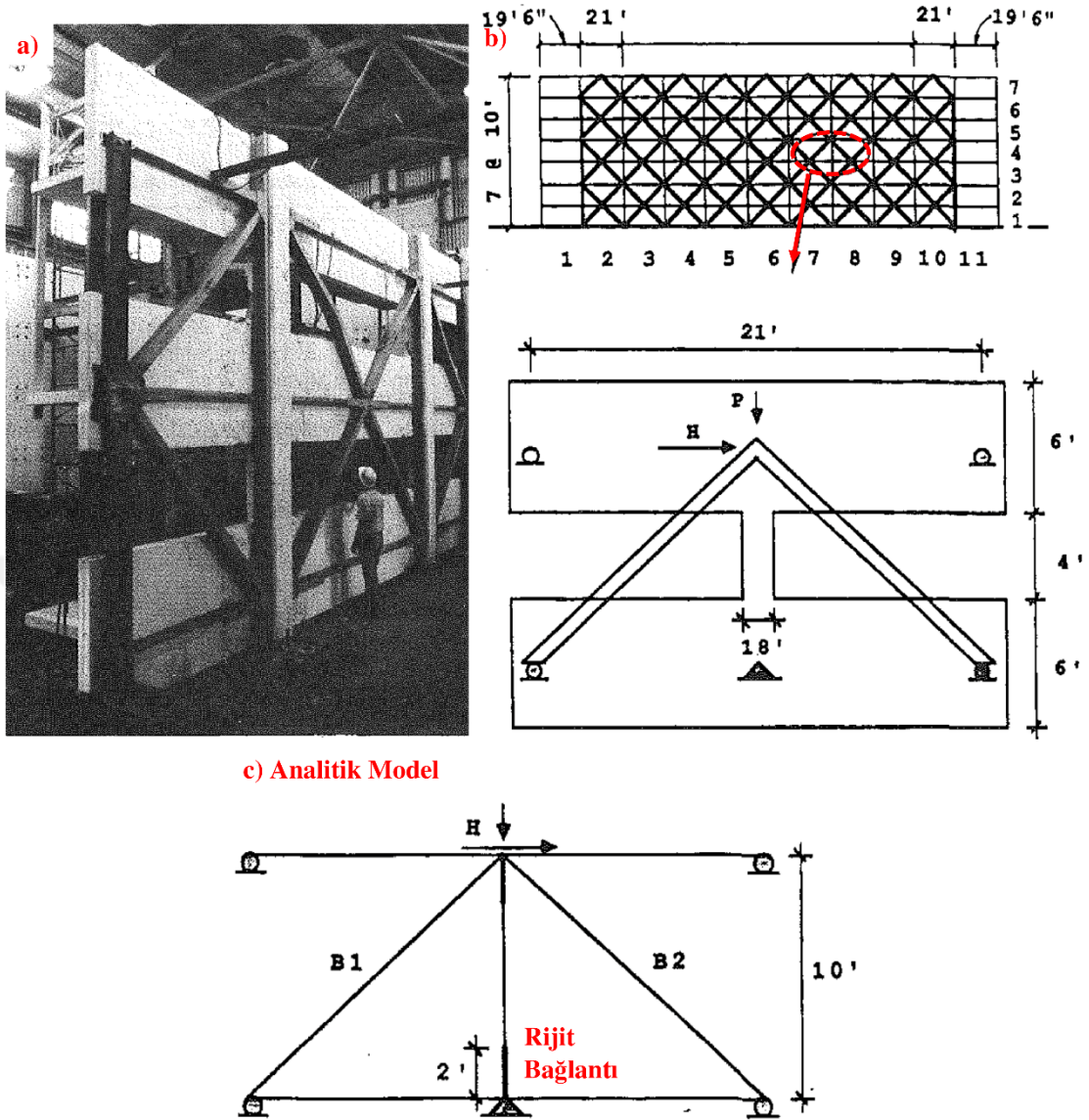
kuvvet açısından performans değerlendiriciler olarak kullanmışlardır. Daha sonra, çelik dia-grid benzeri kafes dış iskelet yapıyla birleştirilmiş, sünek olmayan davranışla tasarlanmış orta yükseklikteki bir betonarme çerçevenin sismik tepkisini ele alan bir vaka çalışmasını tartışmışlardır. Sismik analiz sonuçları, dış iskelet yapıya rijit bağlantının, birincil yapıda yer değiştirme ve deformasyon kontrolü sağlamasının yanı sıra taban kesme kuvvetleri açısından iç kuvvetlerde önemli ölçüde azalma sağladığını göstermiştir.



Şekil 2.18. Sonlu elemanlar modelleri **a)** güçlendirilmemiş model; **b)** güçlendirilmiş model (Reggio 2019)

2.4. Çelik Çaprazlar ile Dışarıdan Güçlendirme

Badoux ve Jirsa (1990) depreme karşı kusurlu betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi için çelik çaprazların kullanımını araştırmışlardır. Diyagonal konfigürasyondaki çelik çaprazla güçlendirmenin mevcut binaların güçlendirilmesi için mükemmel bir yaklaşım olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada derin kirişler ve zayıf kısa kolonları ele almışlardır. Çelik çaprazları, betonarme çerçevenin dışına yerleştirmişlerdir. Özellikle kısa kolon etkisini görmek için çelik çaprazlı çerçevelerin yatay döngüsel yükleme altında analitik olarak incelemişlerdir (Şekil 2.19a). Şekil 2.19b, c’de çalışmalarında kullanılan alt grubu ve analitik model görülmektedir. Çalışmanın sonunda şu sonuçlara varmışlardır: a) güçlendirme planının temel amacı yapının rijitliğini artırmak ise, çelik çaprazlama uygun bir çözümdür, b) sismik tasarım için çaprazlar elastik aralıkta çalışan elemanlar olarak seçilmelidir. Ayrıca çapraz bağlantısının yeterli olması durumunda, çaprazın akması ve burkulması önemli ölçüde enerjinin sönmülmesini sağlayabilir, c) çaprazın narinliğinin azaltılması elastik olmayan davranışı artırır, dolayısıyla çaprazın sünekliğini azaltır. d) çelik çaprazların elastik olmayan burkulması, çelik çaprazlı çerçevenin de elastik olmayan döngüsel davranış sergilemesine sebep olur.

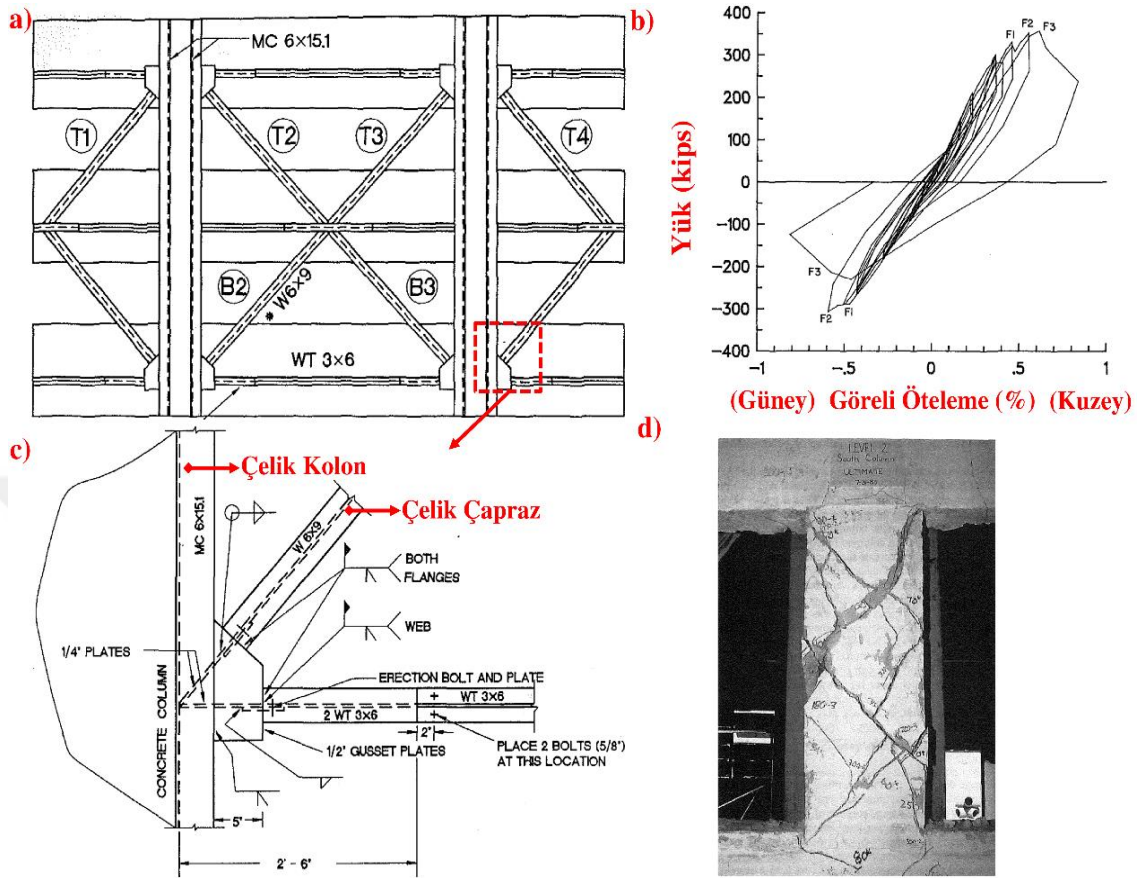


c) Analitik Model

Şekil 2.19. Deney numunelerinin özellikleri **a)** deney numunesi; **b)** analitik çalışmada kullanılan alt grup; **c)** alt grubun analitik modeli (Badoux ve Jirsa 1990)

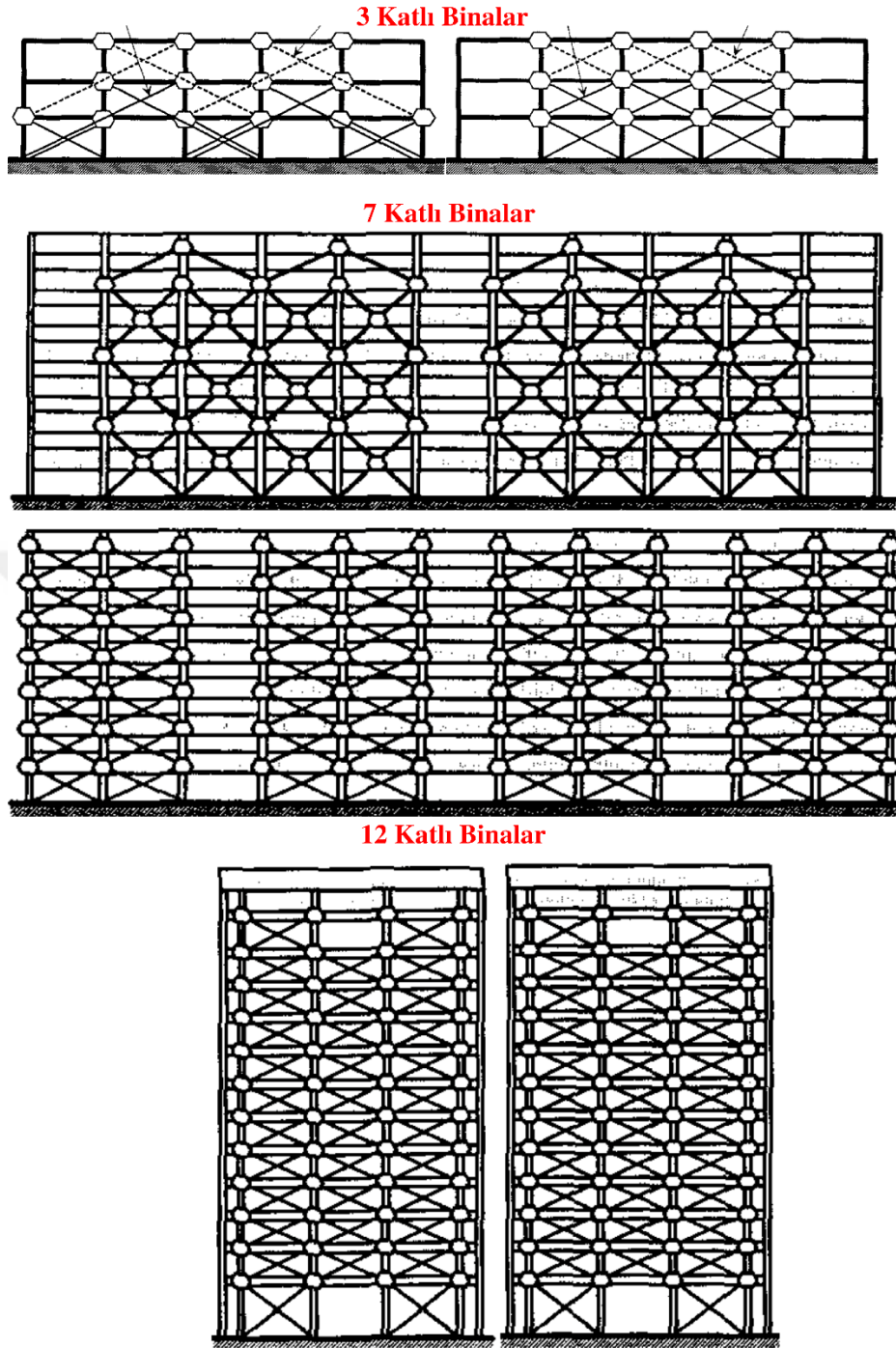
Bush vd. (1991) 1/3 ölçekli iki açıklıklı üç katlı sünek olmayan betonarme çerçeveye dışarıdan ankrajlarla çelik çaprazlı bir sistem bağlayarak güçlendirip, güçlendirilmiş çerçeveyi test etmişlerdir (Şekil 2.20a, c). Test çerçevesinin, derin rijit kirişler ve kısa esnek kolonlar içerdiği, betonarme çerçevenin beton dayanımının 21 MPa ve kolonların kesme kırılmasına karşı dayanıksız olduklarını rapor etmişlerdir. Güçlendirme şeması olarak çelik X çapraz tekniğini kullanmışlardır. Çelik çaprazları betonarme çerçeveye dışarıdan bağlamışlardır. Betonarme çerçeve ile çelik elemanlar arasındaki bağlantıyı epoksi yardımıyla dişli dübelleri kullanarak sağlamışlardır. Test sonuçları, çelik çaprazlamanın yatay yük taşıma kapasitesini ve rijitliği önemli ölçüde arttırdığını ve çelik çaprazların güçlendirilmiş betonarme çerçevenin döngüsel davranışını belirlediğini göstermiştir. Ayrıca çapraz burkulmasından sonra yanal mukavemetin aniden düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 2.20b). Beklendiği gibi betonarme

kolonda kesme kırılması gözlenmiştir (Şekil 2.20d). Testler sırasında ankraj bağlantıları iyi performans göstermiştir.



Şekil 2.20. Deney numunelerinin özellikleri **a)** deney numunesi; **b)** deney sonucu; **c)** çelik çapraz bağlantı detayı; **d)** kolondaki kesme kırılması (Bush vd. 1991)

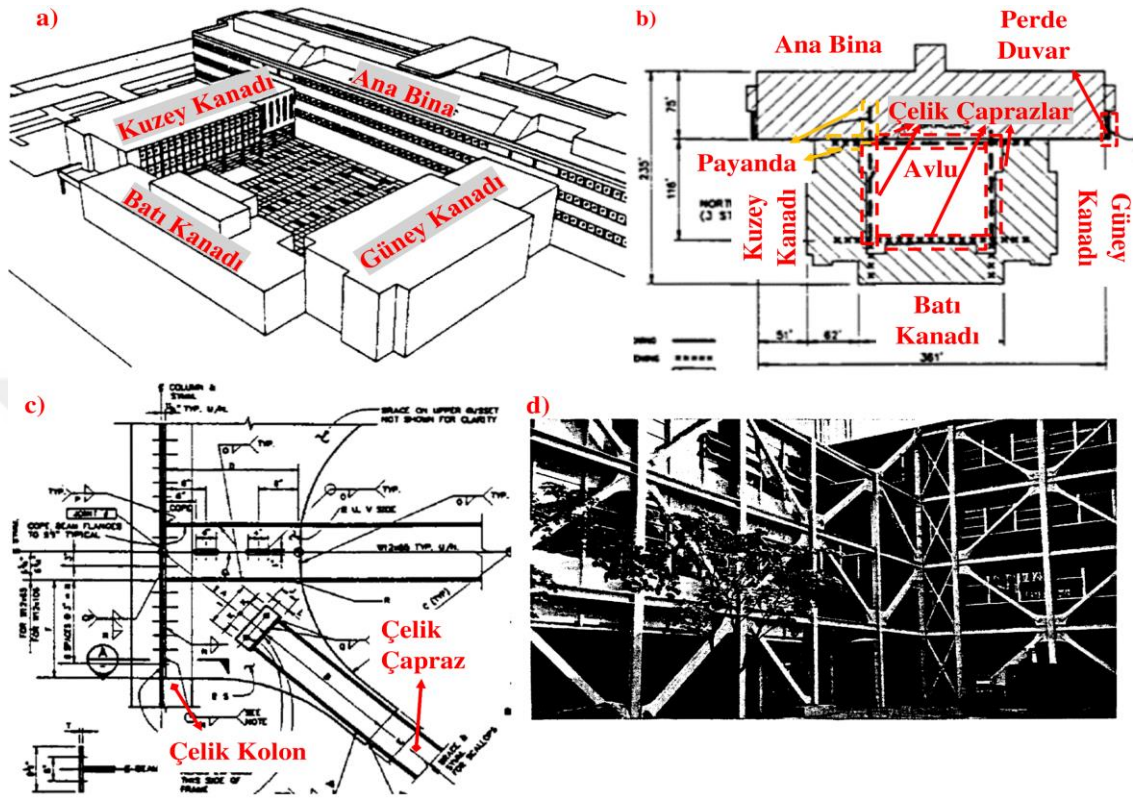
Pincheria ve Jirsa (1995) betonarme binaların sismik güçlendirmesi üzerine farklı güçlendirme teknikleri ile analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan güçlendirme teknikleri art-germeli çaprazlama ve yapısal çelik çaprazlamadır. Analitik çalışmalarında, beş farklı yer hareketi ve üç, yedi ve on iki katlı üç farklı bina kullanarak doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler yapmışlardır (Şekil 2.21). Üç, on iki ve yedi katlı binaların beton dayanımları sırasıyla 21, 35 ve 21 MPa'dır. Üç katlı binaların başlıca kusurları, statik yük tasarımı, yetersiz enine donatı, yetersiz kolon bindirme boyu, kiriş-kolon birleşim yerlerinde etriye olmaması ve kısa kolonlardır. On iki katlı binada yumuşak kat ve çatıda büyük bir korkuluk vardır. Analiz sonuçları, tüm güçlendirme tekniklerinin, binaların hem yatay yük taşıma kapasitesini hem de rijitliğini arttırdığını göstermiştir. Üç katlı bina gibi az katlı yapılar için, tüm güçlendirme planları tatmin edici bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çapraz elemanlar, betonarme kolonlara ek eksenel yük uygulamıştır. Çelik çaprazlarla güçlendirilmiş çerçevelere ait betonarme kolonların ve çapraz kullanılan akslardaki kirişlerin güçlendirilmesinin çok önemli olduğu önerilmiştir. Sonuç olarak, güçlendirilmiş binaların üstün performansının, kat ötelemelerinin sınırlarına ve mevcut ölü yük taşıyan elemanların hasarına bağlı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.21. Güçlendirilmiş binalar (Pincheria ve Jirsa 1995)

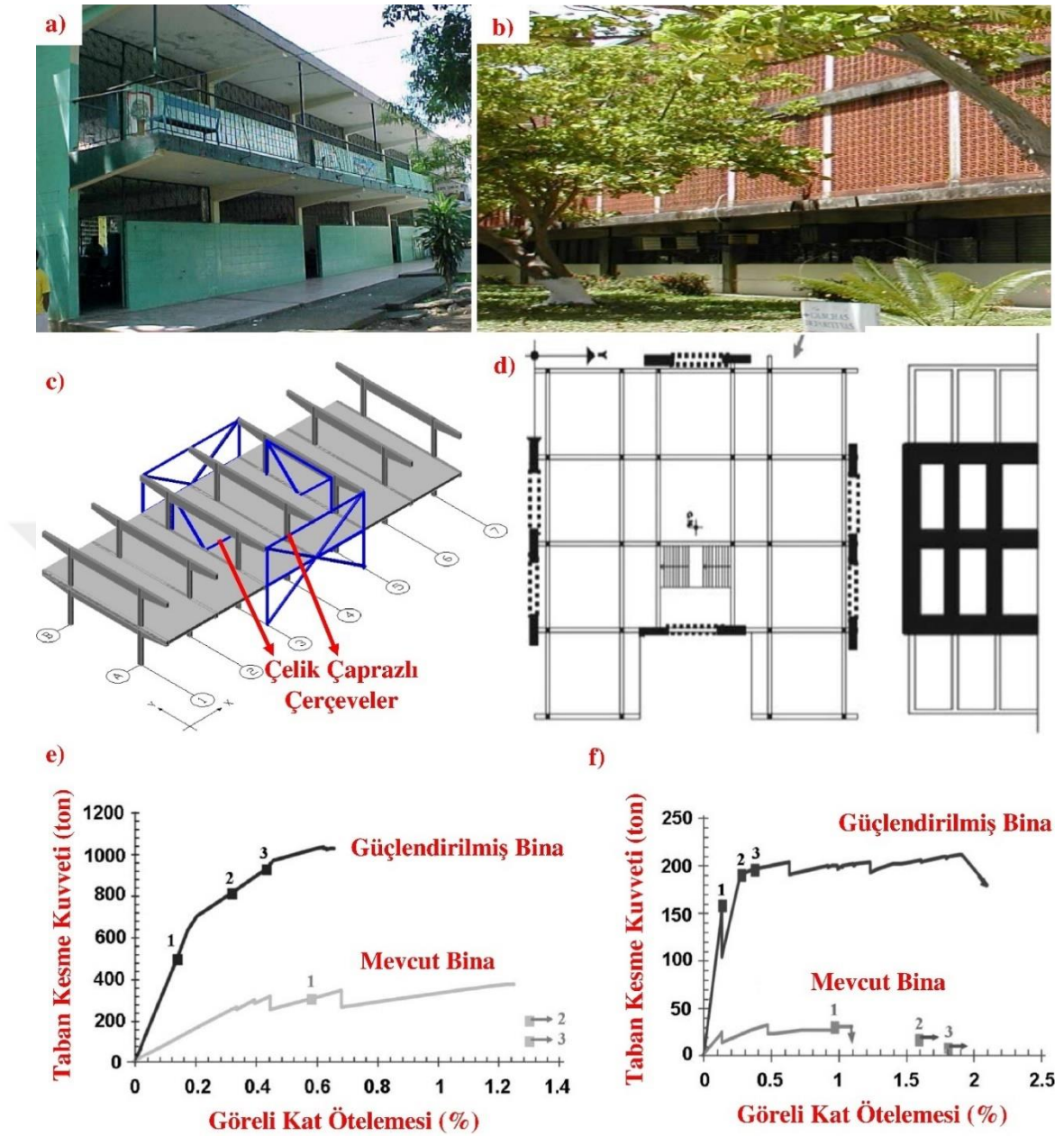
Timler ve Sherstobotoff (1995) Birtish Columbia Teknoloji Enstitüsü ana binasını binaya dışarıdan bağlanan çaprazlı çelik çerçeve ile güçlendirmişlerdir (Şekil 2.22b, c, d). Yapının depreme karşı kusurlu olması sebebiyle, güçlendirme sistemini tasarlariken sünek bir davranış sağlamak için yapıda sehim sınırlaması yapmışlardır. Ana yapı, merkezi bir avlu oluşturan dikdörtgen şeklinde inşa edilmiş dört tane bloktan oluşmaktadır (Şekil 2.22a, b). Bu yapıların güçlendirilmesi için avluyu kullanmışlardır (Şekil 2.22b). Pencereleleri mümkün mertebe kapatmamaya özen göstermişler ve görsel olarak estetik ve uygulanabilir bir güçlendirme sistemi tasarlamışlardır. Ayrıca çelik

çerçeveler için optimum temel tasarımı yapmışlardır. Sonuç olarak kullanılan güçlendirme metodunun mevcut yapının sünekliğini ve yatay yük taşıma kapasitesini arttırdığını ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.22. Güçlendirilen binanın detayları (Timler ve Sherstobotoff 1995)

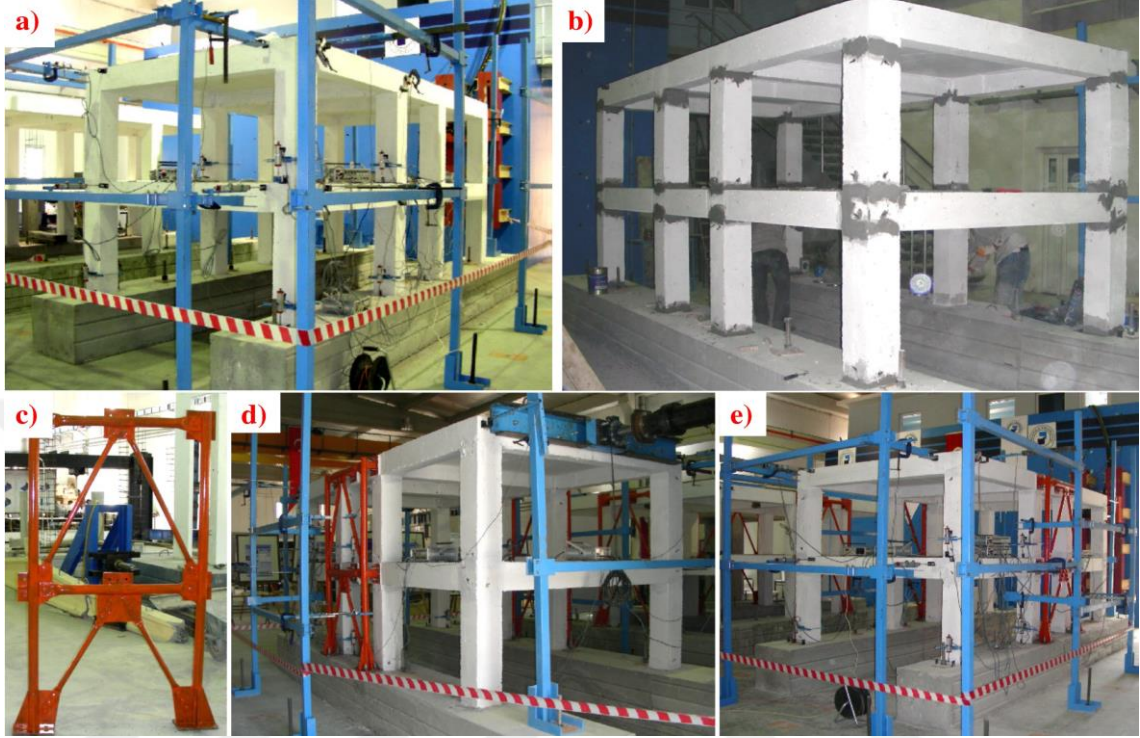
López vd. (2006) ve López vd. (2007) Venezuela'nın Cariaco kentinde meydana gelen depremde çöken dört okul binasının çökme nedenlerini belirlemek, ülke çapında benzer binaların hasar seviyelerini ölçmek ve bu hasarlı binaları mevcut standartlardaki koşullara uygun hale getirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda Venezuela'da bulunan kısa kolonlar içeren iki tip (eski tip (Şekil 2.23a) ve kutu tipi (Şekil 2.23b)) binayı modellemişler ve doğrusal olmayan itme analizleriyle yatay yük taşıma kapasitelerini belirlemişlerdir. Elde ettikleri performans seviyelerine göre eski ve kutu tipi okul binaları için güçlendirme seçenekleri sunmuşlardır. Birinci seçenekte kolonların güçlendirilmesini ve gerektiğinde yeni kirişlerin eklenmesini önermişlerdir. İkinci seçenekte iç diyagonal çelik çaprazların eklenmesini önermişlerdir. Fakat bu iki seçenek uygulandığı takdirde mevcut temellerin güçlendirilmesi gerektiği için başka seçenekler sunmuşlardır. Üçüncü seçenek olarak binaya dışarıdan betonarme duvar eklenmesini önermişlerdir. Dördüncü seçenek ise binaya dışarıdan eklenen merkezi çelik çaprazlı çerçevelerdir. Dördüncü seçenek kullanılarak güçlendirilen binalar Şekil 2.23c ve Şekil 2.23d'de görülmektedir. Güçlendirilmiş yapının rijitliği ve taban kesme kapasitesindeki artış Şekil 2.23e, f'de gösterilen itme analizi sonuçlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.23. a) Eski tip bina; **b)** kutu tipi bina; **c)** güçlendirilmiş eski tip bina; **d)** güçlendirilmiş kutu tipi bina; **e)** eski tip binaya ait analiz sonuçları; **f)** kutu tip binaya ait analiz sonuçları (López vd. 2006; López vd. 2007)

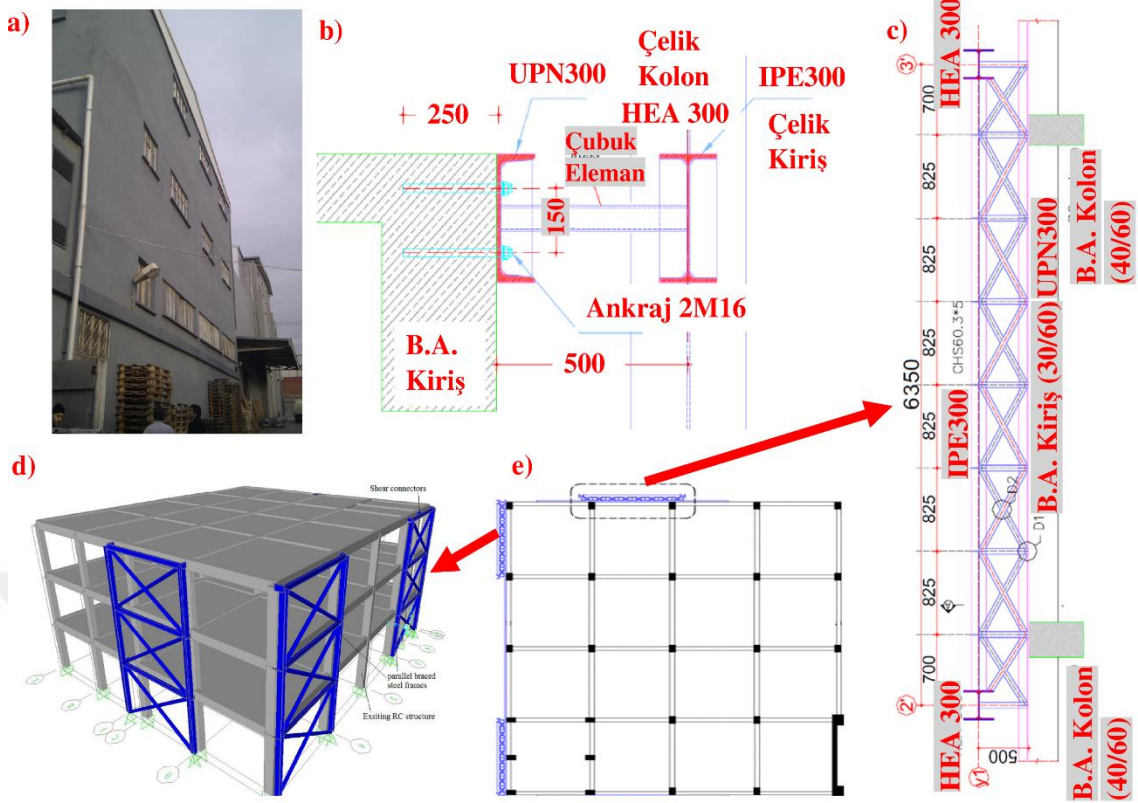
Görgülü (2008) ve Görgülü vd. (2012) çalışmalarında mevcut betonarme yapıların çelik çaprazlı çerçevelerle (Şekil 2.24c) dıştan güçlendirilmesini incelemiştir. Bu teknikte güçlendirme maliyetini azaltmayı, süre ve uygulama açısından daha hızlı ve etkili çözüme ulaşabilmeyi hedeflemiştir. Sayısal analiz ve deneylerden oluşan çalışma kapsamında betonarme yapıyı 1/3 ölçekli üç boyutlu bir yönde bir, diğer yönde üç açıklıklı ve iki katlı olarak tasarlamış ve inşa etmiştir. Betonarme yapının hazırlanmasında ülkemizdeki betonarme yapılarda sıkça rastlanan yetersizliklerden bazılarını dikkate almışlardır. Önerilen güçlendirme sisteminin etkinliğinin ortaya konulmasında temel alınan referans yapıyı (Şekil 2.24a) tersinir tekrarlı yatay yükler altında test etmişlerdir. Hasarlı (Şekil 2.24d) ve hasarsız (Şekil

2.24e) iken güçlendirilen yapıları ise artımsal yatay yük altında test etmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, geliştirilen güçlendirme yöntemi ile depreme karşı kusurlu mevcut betonarme yapıların hızlı bir şekilde güçlendirilebileceğini, yatay yük kapasitelerinin ve rijitliklerinin önemli miktarda arttırılabileceğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.24. a) Referans yapı; **b)** onarılmış hasarlı yapı; **c)** güçlendirme çerçevesi; **d)** güçlendirilmiş ve onarılmış hasarlı yapı; **e)** güçlendirilmiş hasarsız yapı; **f)** kutu tipi binaya ait analiz sonuçları (Görgülü 2008; Görgülü vd. 2012)

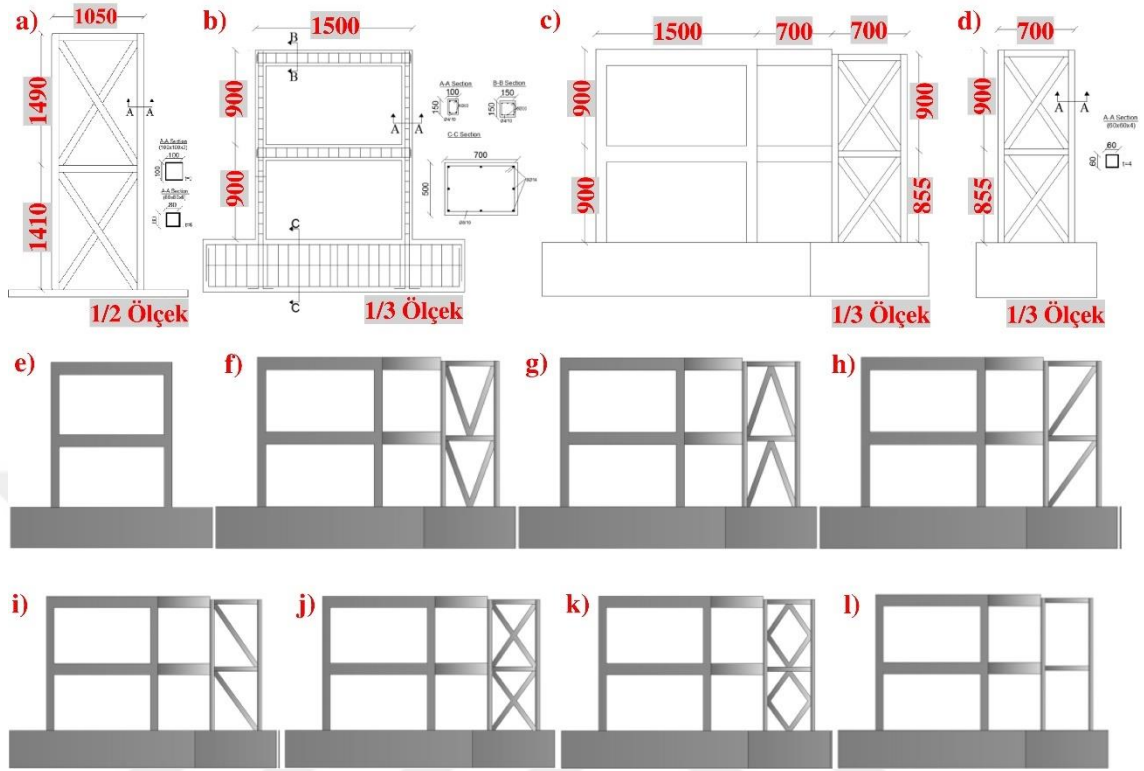
Mowrtage (2013) çalışmasında, tüm inşaat işlerinin bina dışından uygulandığı ve bina işlevini etkilemeyen az veya orta katlı betonarme yapıların güçlendirilmesi için paralel çaprazlı çelik çerçeve güçlendirme tekniğini önermiştir (Şekil 2.25). Bu tekniğin temel özellikleri, güçlendirme çalışmaları yapıldıktan sonra pencerelerden görüş, havalandırma ve güneş ışığının sağlanmasıdır. Ayrıca bu çalışmada inşaat çeliği elemanları kullanılarak, yapım süresinin kısaltılması, kalitenin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi amaçlanmıştır (Şekil 2.25b, c). Bu tekniğin asıl hedefi, sünek olmayan mevcut betonarme yapılarındaki yer değiştirme talebini, bina katlarına bağlanan çelik çerçeveler aracılığıyla azaltmaktır. Bu çerçeveleri, binanın taşıyıcı sistemine paralel ve temelleri mevcut binanın temeline bağlı olacak şekilde tasarlamıştır (Şekil 2.25d, e). Bunu yaparken, bir deprem sırasında binanın katlar arası ötelemelerinin yarı yarıya azalmasını ve binanın çökmesinin önlemesini hedeflemiştir. Paralel çelik çerçevelerin, Federal Acil Durum Yönetim Teşkilatı standardı (FEMA 273 1997) veya Türk deprem yönetmeliğindeki (TDY 2007) performans dayalı tasarım yöntemi kullanılarak istenilen sınır durumlarında tasarlanabilir olduğunu göstermek adına Türkiye’deki bir fabrika binası örneğini sunmuştur (Şekil 2.25a). Binanın güçlendirme öncesi ve sonrası sismik performansını Türk deprem yönetmeliği (TDY 2007)’ye göre değerlendirmiştir. Analiz sonuçları, önerilen tekniğin etkinliğini göstermiştir.



Şekil 2.25. a) Örnek fabrika binası; **b); c)** güçlendirme çerçevesi ve betonarme bina arası bağlantı detayı; **d)** güçlendirilmiş bina 3-boyutlu modeli; **e)** güçlendirilmiş binaya ait plan görünüş (Mowrtage 2013)

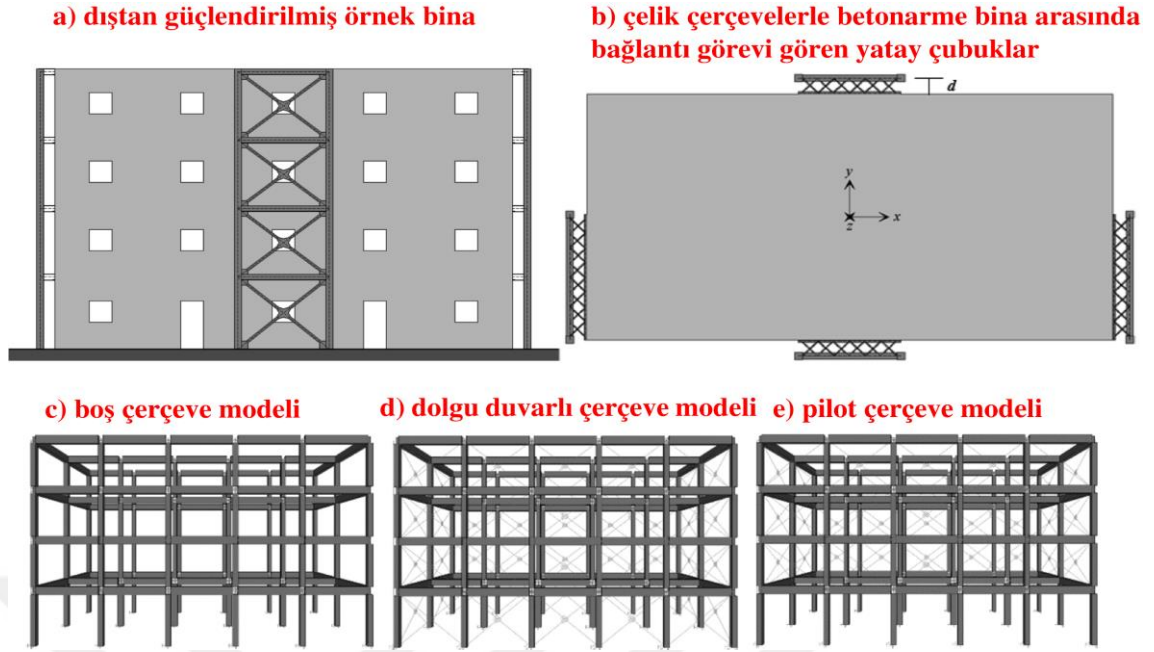
Ünal ve Kaltakçı (2016) depreme karşı kusurlu betonarme çerçevelerin dışarıdan güçlendirilmesi (Şekil 2.26b, c) ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla betonarme çerçeveyi güçlendirmek için kullanılacak olan Türk deprem yönetmeliğinde (TDY 2007) tanımlanan “Eşmerkezli Çelik Çaprazlı Çerçeve” (EÇÇÇ) tiplerinin yatay yükler altındaki davranışlarını değerlendirmek için farklı ölçek ve boyutlarda tasarlanan EÇÇÇ’lerin boyutsal analizini yapmış, sonuçları Türk deprem yönetmeliğine (TDY 2007) göre kontrol etmişlerdir. Statik itme analizlerini yaptıktan sonra, EÇÇÇ’lerin davranışını, yatay yük taşıma kapasitesini ve EÇÇÇ’leri oluşturan elemanların mafsallaşma sırasını test etmişlerdir. Analitik olarak test ettikleri EÇÇÇ’leri iki katlı ve tek açıklıklı, 1/2 ve 1/3 ölçekli iki grup halinde oluşturmuşlardır. Çalışmada Türk deprem yönetmeliğinde (TDY 2007) tanımlanan V çaprazlı (Şekil 2.26f), Δ çaprazlı (Şekil 2.26g), / çaprazlı (Şekil 2.26h), \ çaprazlı (Şekil 2.26i), X çaprazlı (Şekil 2.26j), K çaprazlı (Şekil 2.26k) ve çaprazsız (boş) (Şekil 2.26l) olmak üzere toplam yedi tipte çelik çerçeve tasarlamışlardır. Ayrıca, yaptıkları analitik çalışmaların sonucunu doğrulamak amacıyla, kutu profillerden oluşan 1/2 ölçekli eşmerkezli çelik X çaprazlı çerçeve test elemanını ve deprem dayanımı yetersiz 1/3 ölçekli betonarme çerçeveyi (Şekil 2.26a, b, c ve d), yatay yükler altında tek tek test etmiş ve test sonuçlarını, analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hem deneysel çalışmalardan hem de itme analizlerinden benzer sonuçlar elde etmişlerdir. İtme analizi sonuçlarına göre, 1/3 ölçekli betonarme çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitesi, güçlendirme sonrası güçlendirilmemiş numuneye göre 7.01 kat artmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, yetersiz sismik kapasiteye sahip betonarme binaların bu yöntemle

taahhiye edilmeden hızlı, kolay ve ekonomik bir şekilde güçlendirilebileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.26. Deney numuneleri: **a)** 1/2 ölçekli EÇÇÇ **b)** 1/3 ölçekli B/A çerçeve; **c)** EÇÇÇ ile güçlendirilmiş 1/3 ölçekli B/A çerçeve; **d)** 1/3 ölçekli EÇÇÇ; İtme analizi SAP2000 programı ile yapılmış güçlendirilmiş numuneler: **e)** B/A boş çerçeve; **f)** V çaprazlı; **g)** ters V çaprazlı; **h)** diyagonal çaprazlı; **i)** Ters diyagonal çaprazlı; **j)** X çaprazlı; **k)** K çaprazlı; **l)** boş çerçeve (Ünal ve Kaltakçı 2016)

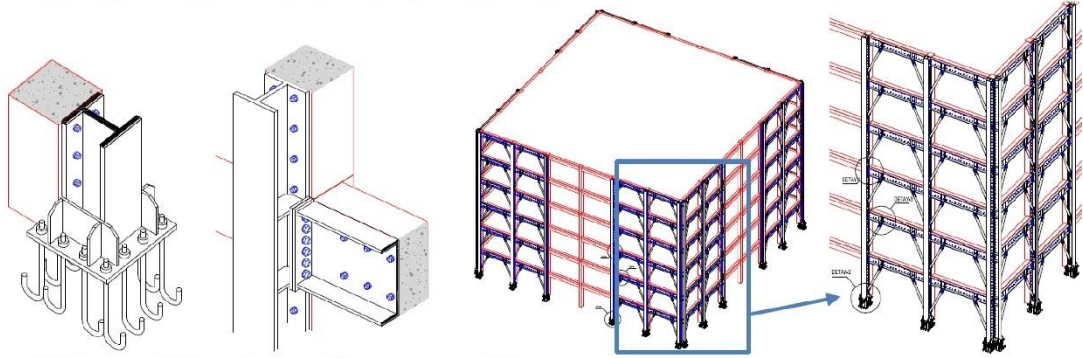
Formisano vd. (2020) ağırlıklı olarak 70'ler ve 80'ler arasında inşa edilen İtalyan yapı stokunu temsil eden, yalnızca düşey yükler için tasarlanmış betonarme binaların sismik davranışını ve sismik performanslarını iyileştirmek için dışarıdan eşmerkezli çelik çapraz (EÇÇ) sistemlerin kullanımını araştırmışlardır. Bunun için örnek bir bina seçilmiş ve tasarlanmıştır (Şekil 2.27a, b). Sismik performansı, dolgu duvar düzenlemesinin rolünü vurgulamak için binanın üç farklı modeline (boş çerçeve (Şekil 2.27c), tamamıyla dolgu duvarlı çerçeve (Şekil 2.27d) ve pilot çerçeve (Şekil 2.27e)) göre değerlendirmişlerdir. Üç model, rasyonel bir metodoloji ile tasarlanan harici EÇÇ sistemleri ile güçlendirmişlerdir. EÇÇ sistemlerin dış düzeneğini, hem mevcut bina üzerindeki etkiyi en aza indirmek hem de betonarme yapı elemanları ile EÇÇ'ler arasındaki yerel etkileşimi ve ayrıca mevcut temeller üzerindeki ek yükleri önlemek için seçmişlerdir. Sonuçlar, mevcut binanın yapısal davranışında dolgu duvarların rolünü ve güçlendirme tekniği olarak dış EÇÇ sistemlerinin etkinliğini göstermiştir.



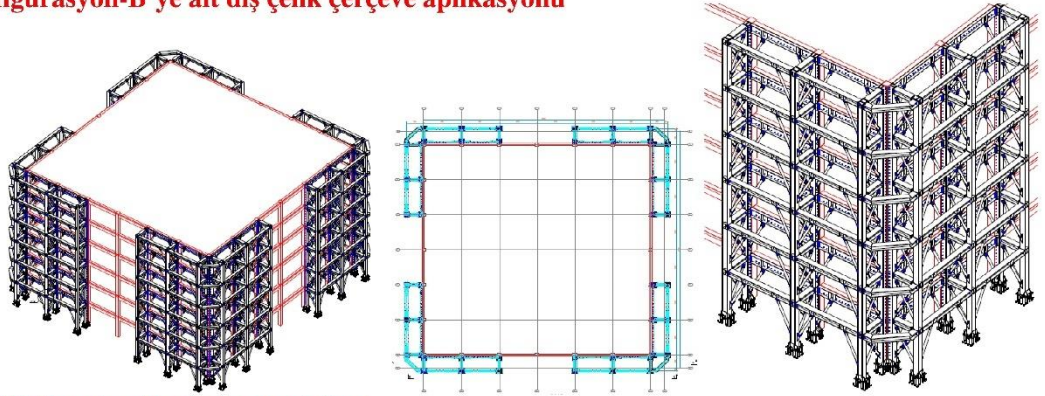
Şekil 2.27. Bina modelleri (Formisano vd. 2020)

Ecemis vd. (2021) mevcut betonarme yapıların sismik performansını iyileştirmek için, kullanıcı dostu bir güçlendirme yöntemi olarak köşe çelik çerçeve konfigürasyonlarının çeşitli dış bağlantısını ele almışlardır (Şekil 2.28). Dış çelik çerçeveyi, mevcut betonarme yapının yatay rijitliğine ve yatay yük taşıma kapasitesine katkıda bulunmak üzere tasarlamışlardır. Bu amaçla altı katlı bir binayı dikkate almışlardır. Binayı güçlendirmek için dört adet farklı dış köşe çelik çerçeve konfigürasyonu önermişlerdir (Şekil 2.28). Önerilen güçlendirme tekniği ile güçlendirilmiş binanın 3-boyutlu modellerini, katı sonlu elemanlar kullanarak ABAQUS ortamında modellemiş (Şekil 2.28c) ve yatay yükler altında doğrusal olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Binanın genel performansını belirlemek için tepe deplasmana karşı yatay yük eğrilerini elde etmişlerdir. Çelik ve betonarme çerçevelerin taşıyan yüklere katkılarını ayrı ayrı hesaplamışlardır. Zemin kat kolonları için yük/kapasite oranlarını sunmuşlardır. Güçlendirme yapılan bina cephesini görsel olarak daha iyi şekilde sunmak için 3D render görüntülerini oluşturmuşlardır (Şekil 2.28d). Analiz sonuçları, önerilen dış çelik çerçeve güçlendirme konfigürasyonlarının yanal yük taşıma kapasitesini ve yanal rijitliği arttırdığını ve betonarme binaların sismik performansını iyileştirmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

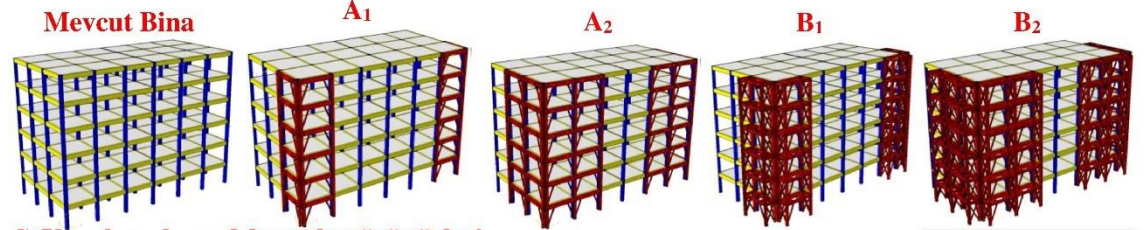
a) Konfigürasyon-A'ya ait dış çelik çerçeve uygulaması



b) Konfigürasyon-B'ye ait dış çelik çerçeve uygulaması



c) ABAQUS sonlu elemanlar modelleri



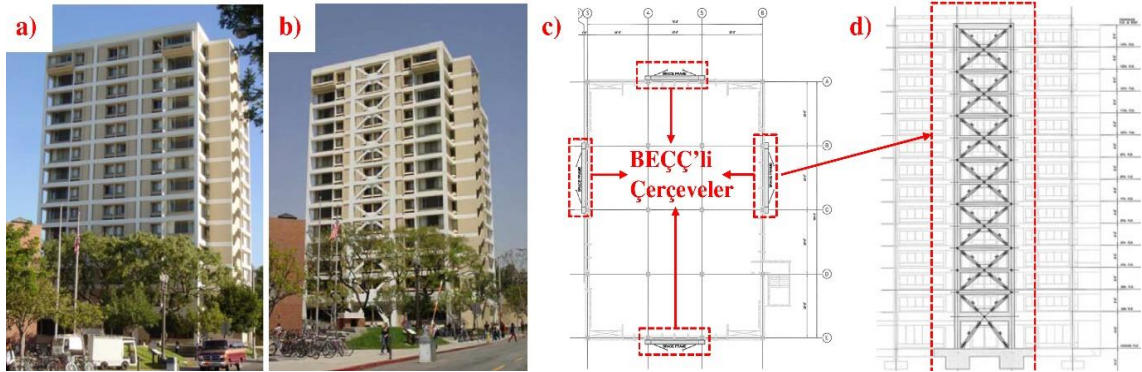
d) Uygulamaların 3-boyutlu görünüşleri



Şekil 2.28. Bina modelleri (Ecemis vd. 2021)

2.5. Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ'ler) ile Dışarıdan Güçlendirme

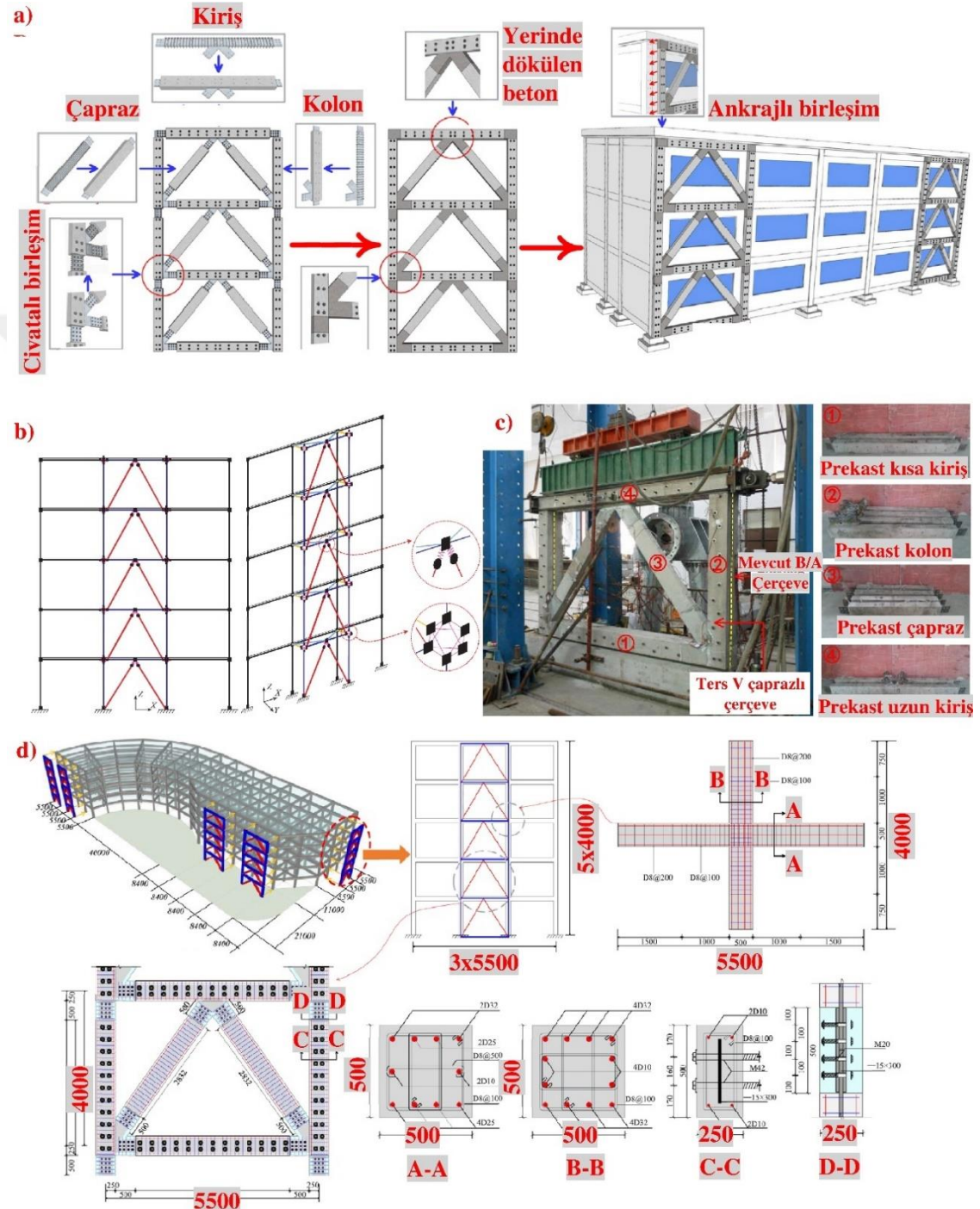
Islam vd. (2006) Los Angeles'taki Güney Kaliforniya Üniversitesi kampüsünde bulunan Webb Kulesi'ni yenilikçi bir sismik güçlendirme metodu ile güçlendirmişlerdir. Mevcut 14 katlı konut binası (Şekil 2.29a), 1972 dolaylarında hafif beton kullanılarak inşa edilmiştir. Bina sistemi, sünek olmayan moment aktaran çerçevelerden oluşmaktadır. Binanın ön değerlendirmesi, çeşitli sismik eksiklikleri ortaya çıkarmıştır: (1) sünek olmayan detaylandırma, (2) aşırı bina sehim ve (3) kolon kiriş birleşimlerinde aşırı kesme gerilmesi. Birkaç alternatif güçlendirme planını göz önünde bulundurduktan sonra, binanın her iki tarafına birer betonarme kiriş-kolon çerçevesine bağlı BEÇÇ'ler kullanılacak şekilde tasarlanmış benzersiz bir güçlendirme yöntemi geliştirmişlerdir (Şekil 2.29b, c, d). Tasarımda deprem azaltma katsayısı (R) değerini çeşitli şartnamelerde BEÇÇ'li çerçeve sistemleri için önerdiği gibi 8.0 almışlardır. Bu sistemin seçimi, bu proje için diğer güçlendirme planlarına göre çeşitli avantajlar sağlamıştır: (1) mevcut pencerelerden kısmi görünüm sağlamaktadır, (2) bir iç güçlendirme yöntemine göre önemli ölçüde daha az yıkım gerektirmektedir, (3) iç güçlendirme yöntemlerine göre daha az maliyetlidir. (4) sünek olmayan moment çerçeveler üzerindeki talepleri ve görel kat ötelemelerini azaltmaktadır ve (5) BEÇÇ'ler, mukavemet kaybı göstermemektedir ve estetik olarak kabul edilemeyecek burkulma sonrası deformasyonlar sergilememektedirler. BEÇÇ'lerin, mevcut beton kirişlerin ve kolonların ardgerme etkisi dikkate alınarak doğrusal olmayan davranışlarını ve yeni beton kiriş ve kolonların doğrusal olmayan davranışını yakalayabilmek için üç boyutlu doğrusal olmayan bir bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. Güçlendirilmiş binanın sismik performansını, yedi takım yer hareketi kaydı kullanarak zaman tanım alanında analizler ile araştırmışlardır. Sonuçlar sundukları güçlendirme yönteminin etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.29. a) Mevcut bina; b) güçlendirilmiş bina c) kat planı; d) güçlendirilmiş bina ön görünüş (Islam vd. 2006)

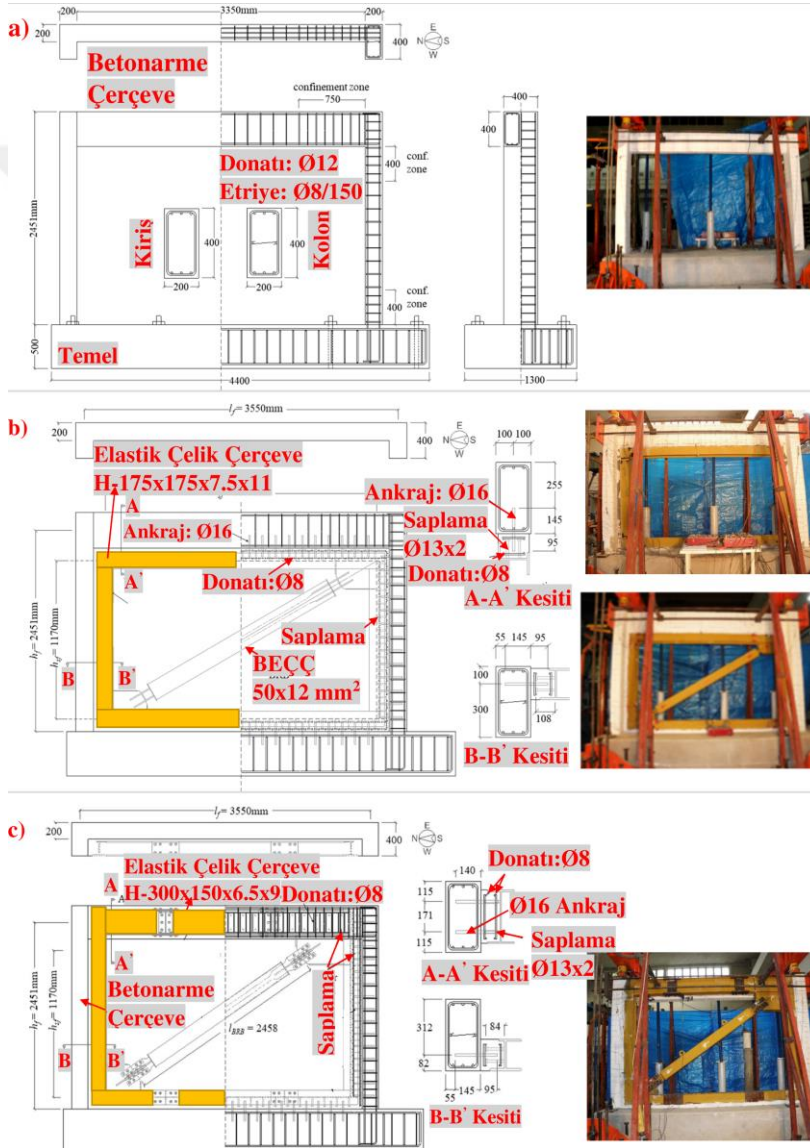
Cao vd. (2019) mevcut çerçeveleri dışarıdan güçlendirmek için ön-üretimli betonarme çerçevelere bağlı çaprazları kullanarak yeni bir güçlendirme yöntemi sunmuşlardır (Şekil 2.30a). Çalışma prensiplerini, sayısal yöntemleri ve tasarım prosedürlerini sunmuş ve vaka çalışmaları yapmışlardır. OPENSEES programı (Şekil 2.30b) ile gerçekleştirdikleri analiz sonuçları, önceki deney (Şekil 2.30c) sonuçlarıyla tutarlı çıkmış ve böylelikle sayısal modelin etkinliği kanıtlanmıştır. Önerilen tasarıma ve sayısal modele dayalı bir vaka çalışması yapmışlardır. Vaka çalışmasına (Şekil

2.30d) ait analizler, yapısal taleplerin net bir şekilde azaldığını ve güçlendirme sonrasında mevcut binadan dış güçlendirme sistemine iç kuvvet aktarıldığını göstermiştir. Yapılan bu çalışmanın sonuçları, güçlendirme sonrası binanın yatay yük taşıma kapasitesinde artış olduğunu ve yeni güçlendirme yöntemiyle daha az yapısal hasar oluştuğunu göstermiştir.



Şekil 2.30. a) Dış güçlendirme yapım aşamaları; b) OPENSEES modeli; c) deney elemanı örneği; d) vaka çalışmasına ait bina ve detayları (Cao vd. 2019)

Sütçü vd. (2020) performans değerlendirmesi için çelik çerçevelere bağlı BEÇÇ'ler ile güçlendirilmiş neredeyse tam ölçekli betonarme çerçeveleri ters çevrimli yükler altında test etmişlerdir (Şekil 2.31). Bu çalışmadaki deneysel program dört adet tek açıklıklı numuneden oluşmuştur: boş betonarme çerçeve (Şekil 2.30a), iç çelik çerçeveli betonarme çerçeve (Şekil 2.31b), iç çelik çerçeve + BEÇÇ'li betonarme çerçeve (Şekil 2.31b) ve dış/eksantrik çelik çerçeve + BEÇÇ'li betonarme çerçeve (Şekil 2.31c). Test sonuçları önerilen sistemin uygulanabilir olduğunu ve betonarme çerçeveleri hem dayanım hem süneklik hem de sönümlleme kapasitesi açısından yeterli sismik performans seviyesine yükselttiğini göstermiştir. Betonarme ve çelik çerçeveden oluşan kompozit davranış için basitleştirilmiş bir bileşik etkileşim modeli önermişlerdir ve geliştirilen modelden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle uyum göstermiştir.



Şekil 2.31. a) Boş çerçeve; b) iç çelik çerçeve+BEÇÇ ile güçlendirilmiş çerçeve; c) dış çelik çerçeve+BEÇÇ ile güçlendirilmiş çerçeve (Sütçü vd. 2020)

duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında, düşük dayanımlı betona (5-12 MPa) yetersiz boyuna donatı ve sargıya sahip güçlü kiriş-zayıf kolon uygulaması olan kolon-kiriş birleşim bölgesinde sargı olmayan ve yetersiz bindirme boyu kullanılmış $\frac{1}{2}$ ölçekli üç boyutlu iki katlı betonarme yapılar inşa edilmiştir. BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile güçlendirilmiş ve ters çevrimli statik yükleme altında test edilmiştir.

Çizelge 2.1. BEÇÇ'ler ile dış güçlendirme yöntemleri kullanılarak güçlendirme yapılan çalışmalara ait yapıların özellikleri

Çalışma	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Kolon Kiriş Birleşiminde Etriye Miktarı
Islam vd. (2006)	35	Ø15 / 50 mm
Cao vd. (2019)	30	Ø8 / 100 mm
Sütçü vd. (2020)	20	Ø8 / 150 mm
Cao vd. (2021)	30	Ø8 / 100 mm

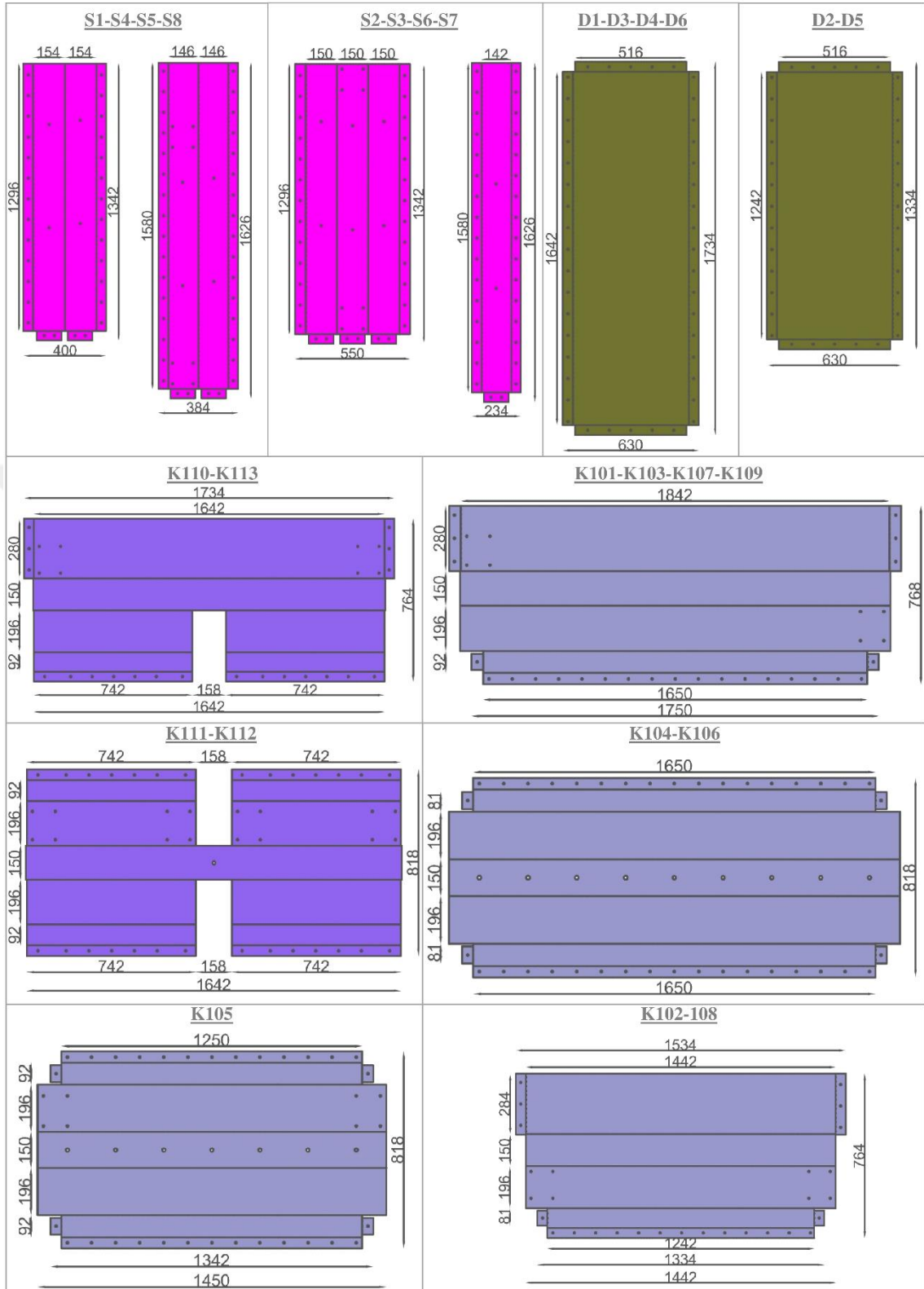
3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında depreme karşı kusurlu binaların yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik gibi özelliklerini iyileştirmek için yeni bir güçlendirme yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle biri güçlendirilmemiş (referans), diğer üçü ise güçlendirilmiş olmak üzere toplamda dört adet deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanları, ülkemizde mevcut kusurlu yapıları temsil edebilmek adına, düşük dayanımlı betona (5-12 MPa), sargı donatısı yetersiz kolon ve kirişlere, sargısız kolon-kiriş birleşimine, 90 derece bükülmüş etriyelere, düz boyuna donatı ve güçlü kiriş zayıf kolon uygulaması ve yetersiz bindirme boyuna sahip olacak şekilde üretilmişlerdir.

3.1. Deneyel Çalışmalar

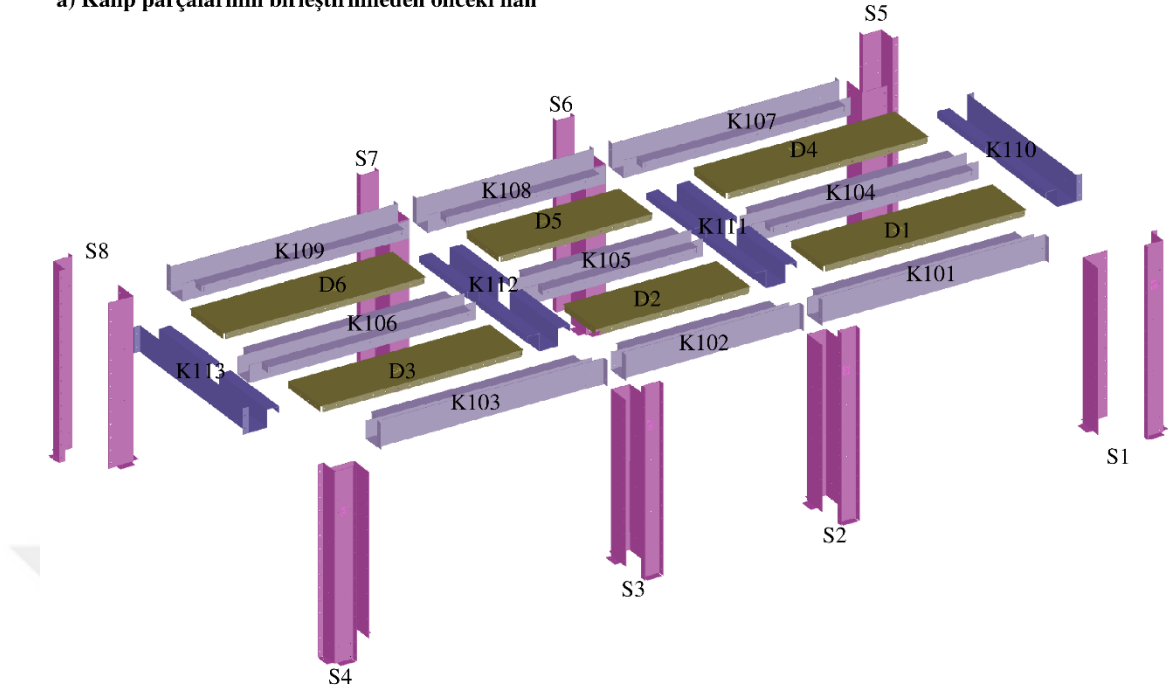
Betonarme deney elemanlarının hazırlanmasında kullanılmak üzere 3 mm sac levhalardan kalıplar üretilmiştir (Şekil 3.1, 3.2). Çerçeve elemanlarının boyutlarının tam olarak üretilmesi için sacların bükümlerinde et kalınlıkları hesaba katılmıştır (Şekil 3.1). Kalıpların kurulum ve söküm işlemlerini kolaylaştırmak adına bağlantıları somun ve cıvatalarla sağlanmıştır. Bütün deney elemanları için aynı kalıplar kullanıldığından kolon-kiriş kesitleri ile kolon aks açıklıkları ve kat yükseklikleri bütün deney elemanlarında aynıdır.

Bu tez çalışması kapsamında test edilen betonarme deney elemanlarının aks açıklıkları ve kat yükseklikleri laboratuvar imkânları da dikkate alınarak belirlenmiştir. Söz konusu betonarme deney elemanı Şekil 3.3'te görüldüğü gibi ½ ölçekli, üç boyutlu ve iki katlıdır. Güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini kıyaslamak adına öncelikle güçlendirilmemiş deney elemanı test edilmiştir. Diğer üç deneyde, betonarme deney elemanları, betonarme çerçevelerin orta aksına dışarıdan BEÇÇ'li çelik çerçeveler ankrajlar yardımıyla bağlanarak güçlendirilmişlerdir. Güçlendirilmiş deney elemanlarının ilkinde orta akstaki sürekli temeller güçlendirilmemiştir (Şekil 3.3). İlk güçlendirilmiş deney elemanının test sonuçlarına göre orta akstaki temellerin güçlendirilmesinin gerekli olduğu görülmüştür. Böylelikle ikinci güçlendirilmiş deney elemanında söz konusu temeller de güçlendirilmiştir. İlk iki güçlendirilmiş deney elemanlarında BEÇÇ'li çelik çerçeveler betonarme çerçevelere hem kiriş hem de kolon seviyesinde ankrajlarla bağlanmışlardır. Son güçlendirilmiş deney elemanında ise BEÇÇ'li çelik çerçeveler betonarme çerçevelere sadece kiriş seviyesinde ankrajlarla bağlanmışlardır. Deney elemanları hakkındaki detaylı bilgiye ilerleyen sayfalarda sırasıyla yer verilmiştir.

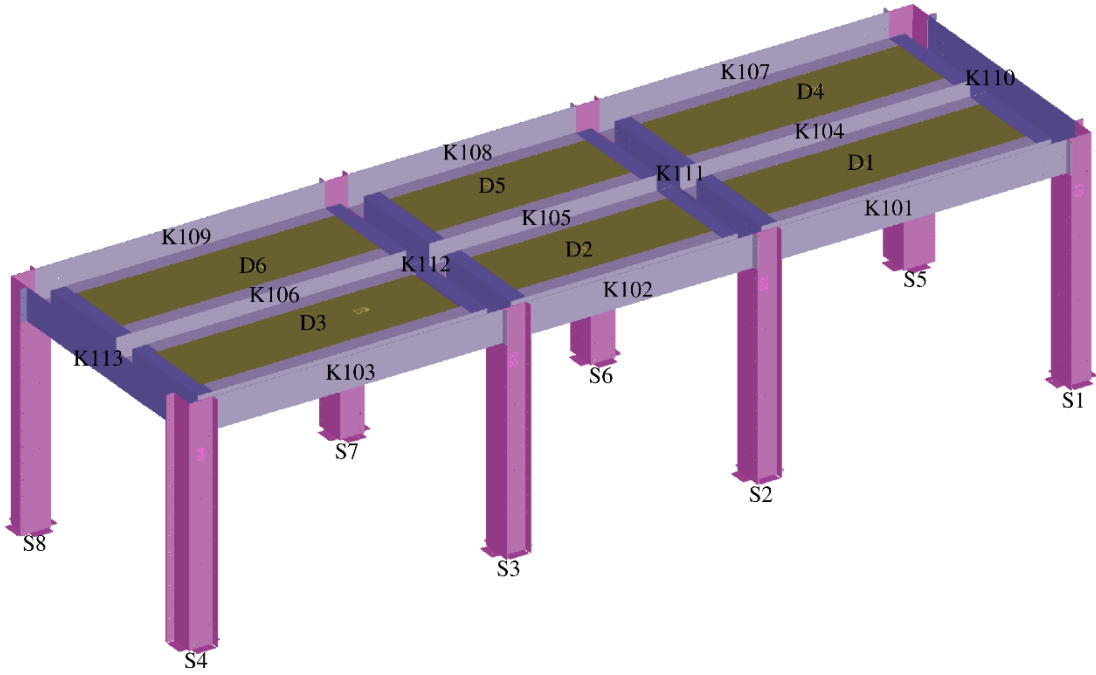


Şekil 3.1. Kalıpların bükülmemiş halleri

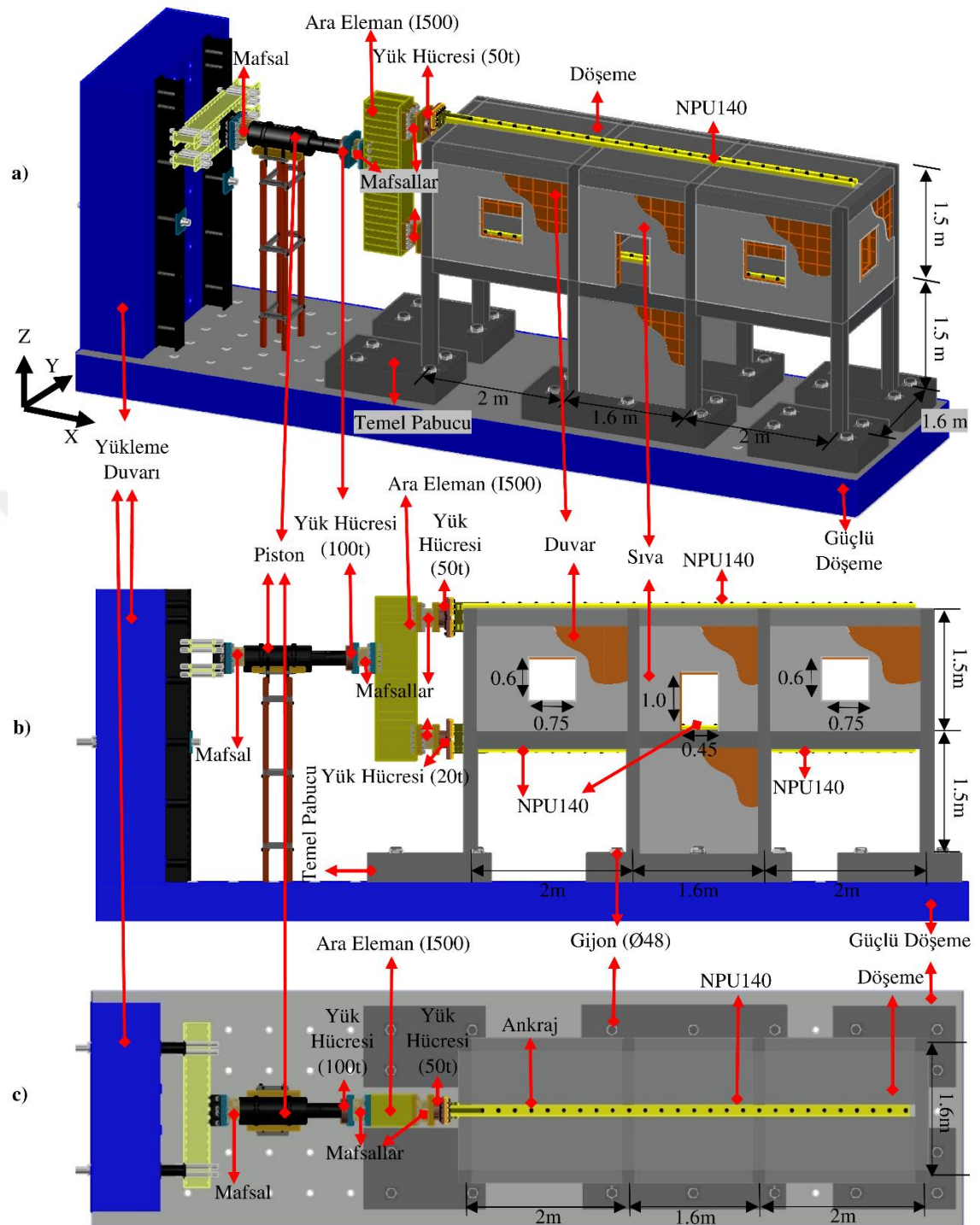
a) Kalıp parçalarının birleştirilmeden önceki hali



b) Kalıp parçalarının birleştirildikten sonraki hali



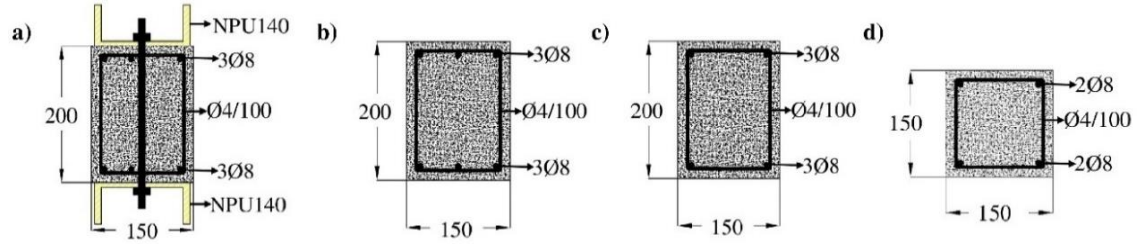
Şekil 3.2. Kalıpların üretilmesi **a)** kalıp parçalarının birleştirilmeden önceki hali; **b)** kalıp parçalarının birleştirildikten sonraki hali



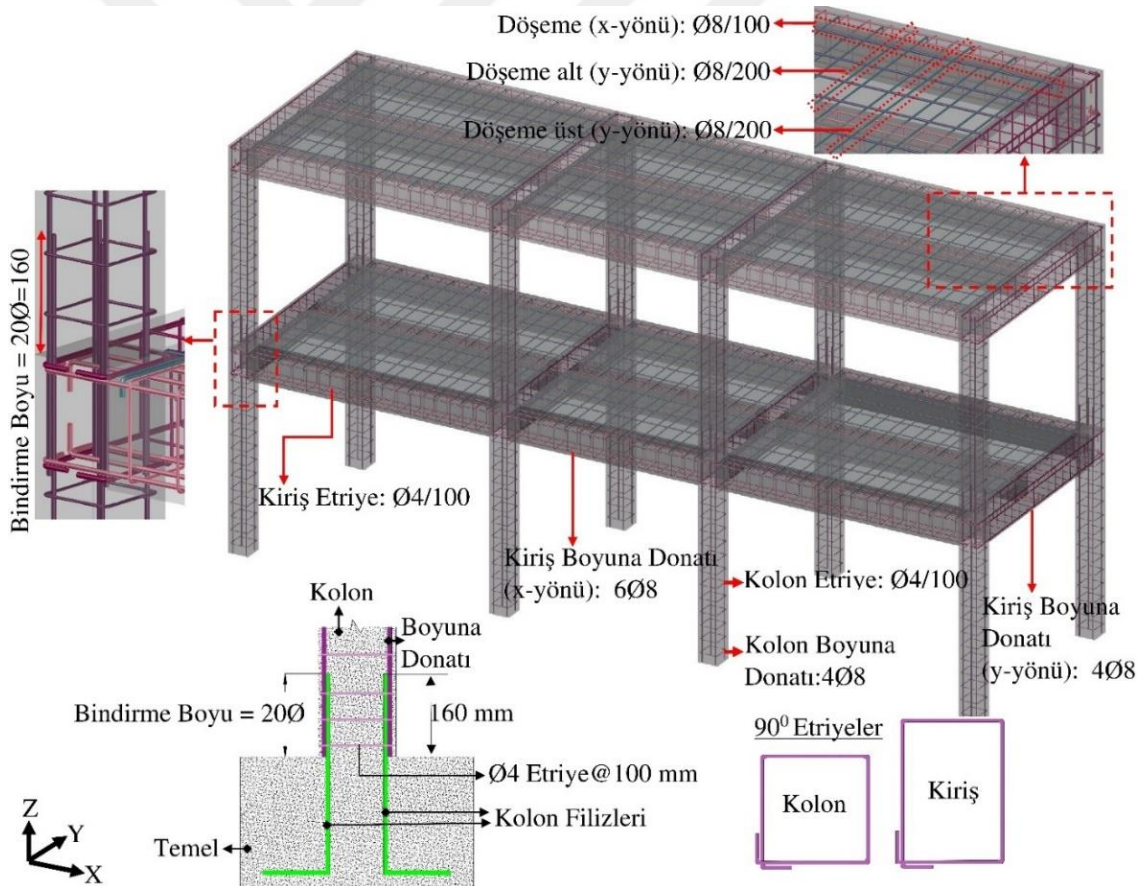
Şekil 3.3. Referans deney elemanı ve yükleme sistemi **a)** üç boyutlu görünüş; **b)** ön görünüş; **c)** plan görünüş

3.1.1. Referans deney elemanı (RDE)

Güçlendirilmemiş deney elemanı olan RDE ve yükleme sisteminin üç boyutlu, ön ve plan görünüşleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi dış akslardaki kolonlar için tekil, orta akslardaki kolonlar için ise sürekli temeller üretilmiştir. Birinci katta sadece orta aksa tuğla duvar örülürken ikinci katın bütün dış açıklıklarına tuğla duvar örülmüştür



Şekil 3.4. Kolon kiriş detayları **a)** yükleme yönüne paralel orta kirişler (yatay yük uygulaması için); **b)** yükleme yönüne paralel kirişler **c)** yükleme yönüne dik kirişler; **d)** kolonlar (Boyutlar mm cinsindendir)



Şekil 3.5. Betonarme eleman donatıları

Kolon ve kiriş kesitleri sırasıyla 150 mm x 150 mm ve 150 mm x 200 mm'dir (Şekil 3.4). Kolonlarda ve yükleme yönüne dik kirişlerde 4Ø8, yükleme yönüne paralel

kirişlerde ise 6Ø8 düz donatı kullanılmıştır (Şekil 3.4, 3.5). Bu donatı kullanımı ile kolon boyuna donatı oranı yaklaşık %0.9 civarında olmaktadır. Boyuna donatı detayı ile güçlü kiriş-zayıf kolon uygulaması yapılmıştır. Kolonlar ve kirişler için kullanılan etriye 4 mm çapında düz donatıdan imal edilmiştir ve etriye aralıkları kolon ve kirişler için 100 mm'dir (Şekil 3.4, 3.5). Etriye bacakları 90 derece bükülmüştür (Şekil 3.4, 3.5). Kolon-kiriş birleşiminde etriye konulmamıştır (Şekil 3.5). Beton pas payı boyuna donatısının merkezinden beton yüzeyine kadar olan mesafe yaklaşık 15 mm alınmıştır. Detaylı çizimler EK-1'de verilmiştir (Şekil 8.1).

RDE'nin yapım aşamaları sırasıyla şu şekilde özetlenebilir; temellerin oluşturulması, donatıların hazırlanması ve birinci kat kalıplarının kurulması, birinci kat beton dökümü, birinci kat kalıpların sökülmesi, ikinci kat donatı ve kalıpların kurulumu, ikinci kat beton dökümü, ikinci kat kalıpların sökülmesi, U-profillerin yerleştirilmesi (yatay yük uygulaması için), kum torbalarının döşemelere yerleştirilmesi (düşey yük uygulaması için), tuğla duvar örme, sıva ve badana işlemleri (Şekil 3.6).



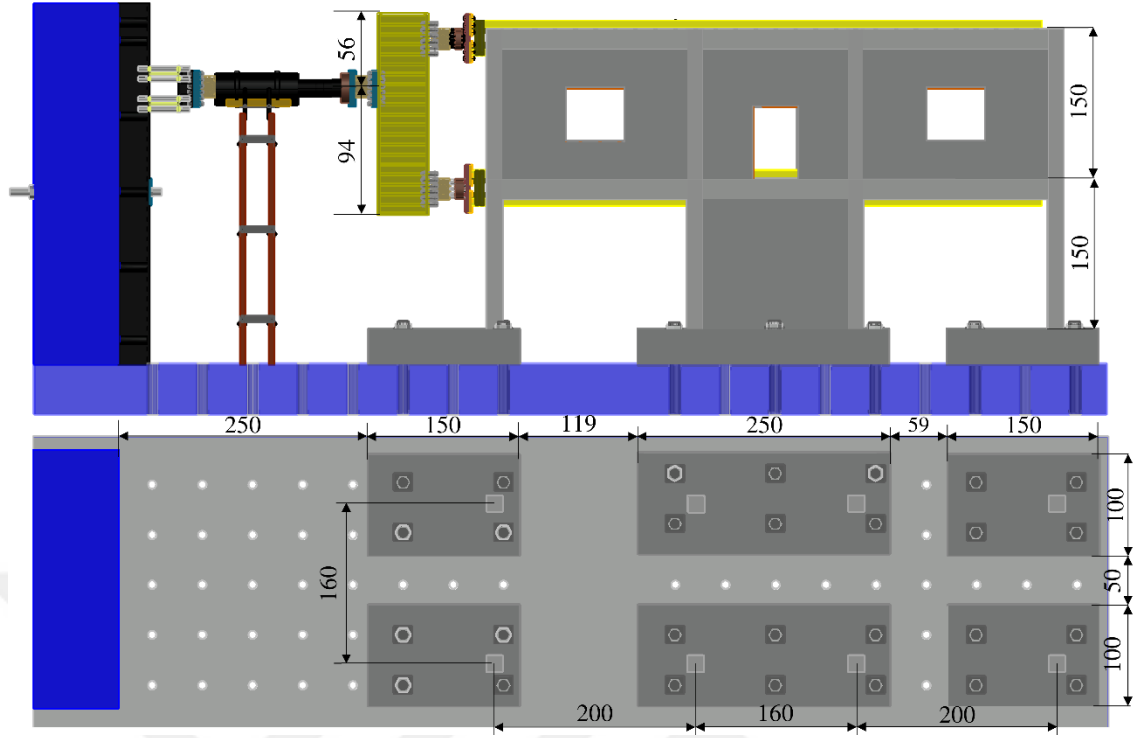
Şekil 3.6. RDE yapım aşamaları özeti **a)** kalıp sökülmesi sonrası; **b)** kum torbalarının yerleşimi sonrası; **c)** tuğla duvar örme işlemi sonrası; **d)** sıva işlemi sonrası; **e)** badana sonrası

3.1.1.1. Temellerin oluşturulması

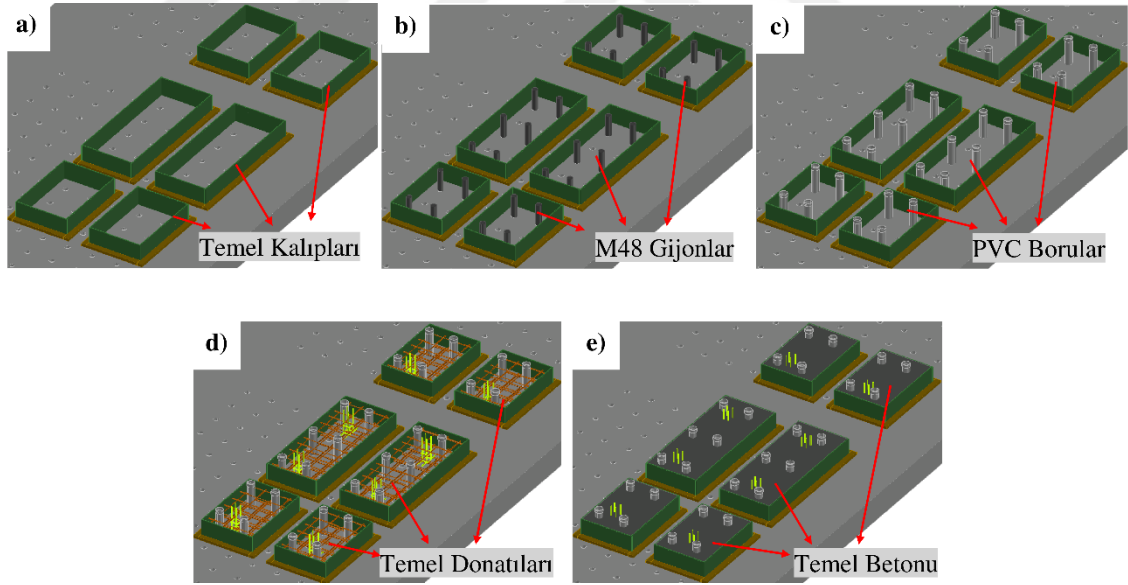
Yukarıda özetlenen deney elemanının inşası için ilk olarak temeller oluşturulmuştur. Şekil 3.7'de görüldüğü üzere üç açıklıklı sistemde ilk ve son açıklıklar tekil temel, orta açıklıklar ise sürekli temel olarak hazırlanmıştır.

Temel için ahşap kalıp (Şekil 3.8a, 3.9a) kullanılmış ve temeller laboratuvar zeminine M48'lik gijonlar ile bağlanmıştır (Şekil 3.8b, 3.9c). Gijonlar için temel içinde PVC borular ile boşluk oluşturulmuştur (Şekil 3.8c, 3.9c). Temel donatıları ile kolon boyuna donatı filizleri kalıplara yerleştirildikten (Şekil 3.8d, 3.9a) sonra temel betonu dökülmüştür (Şekil 3.8e, 3.9b).

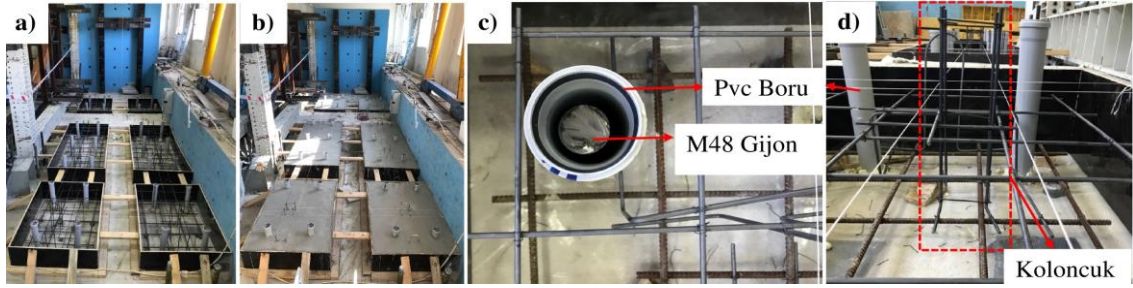
Kolon boyuna donatı bindirme boyu miktarı 20Ø olarak alınmış olup bu değer 16 cm'dir (Şekil 3.5, 3.9d). Ancak düz donatılarda bilindiği gibi kolon bindirme boyu en az 40Ø'dir (TS 500, 2000).



Şekil 3.7. Temellerin yerleşimi (boyutlar cm cinsindendir)



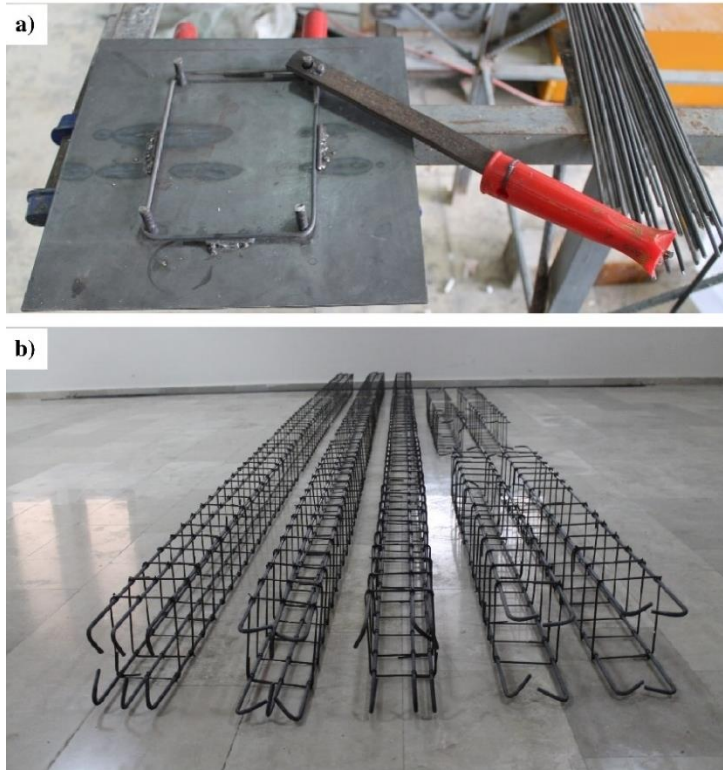
Şekil 3.8. Temellerin oluşturulma aşamaları a) temel kalıplarının yerleştirilmesi; b) temel gijonlarının deliklere yerleştirilmesi; c) PVC borularının gijonlara sarılması; d) temel donatılarının yerleştirilmesi; e) temel betonunun dökülmesi



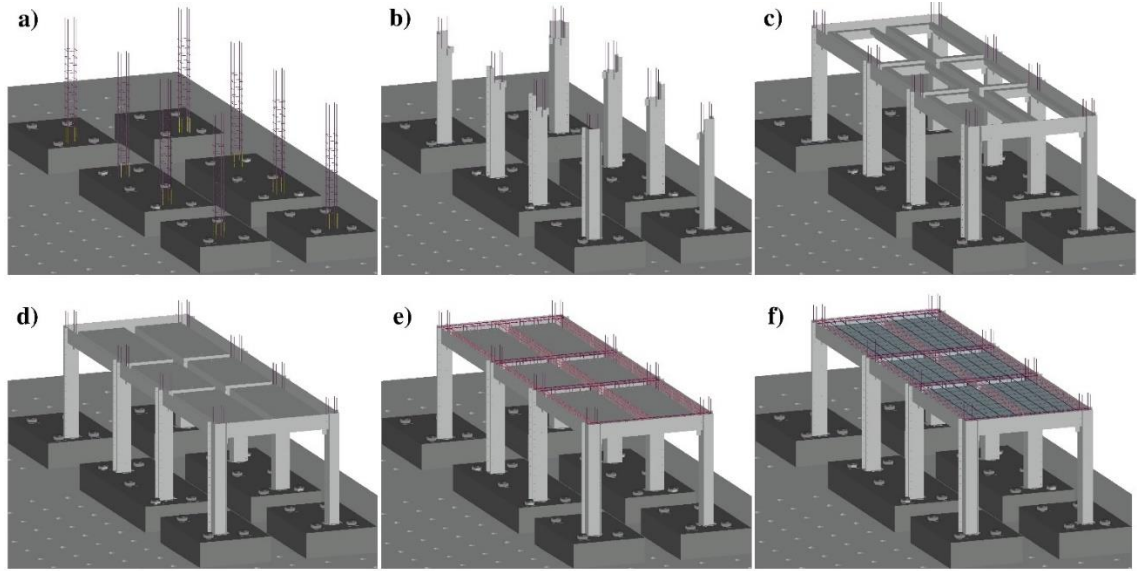
Şekil 3.9. Temellerin oluşturulması **a)** temel gijonları ve pvc boruların, kalıpların ve donatıların yerleşimi sonrası; **b)** beton dökümü sonrası; **c)** pvc boru ve gijon detayı; **d)** kolon filizleri

3.1.1.2. Donatıların hazırlanması, birinci kat kalıpların kurulması

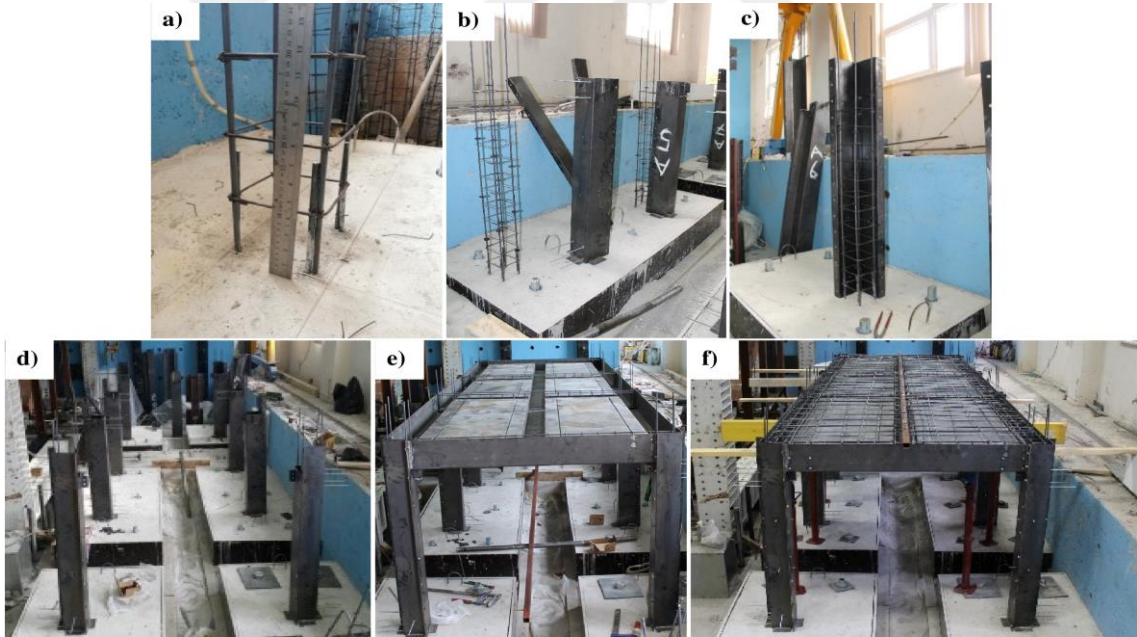
Birinci kat kalıp kurulumuna başlamadan önce kolon ve kiriş donatıları hazır hale getirilmiştir. Etriyeler daha önce de bahsedildiği gibi 90 derece bükülmüştür (Şekil 3.10a). Kolon ve kiriş boyuna donatılarına etriyeler bağlanarak hazır hale getirilmişlerdir (Şekil 3.10b) İlk olarak birinci kata ait kolon donatıları, daha önceden temellerde bırakılmış olan kolon filizlerine bağlanmışlardır (Şekil 3.11a, 3.12a). Sonrasında her biri iki parçadan oluşan kolon kalıpları, donatıları saracak şekilde bağlanmıştır (Şekil 3.11b, 3.12b). Sonra sırasıyla kiriş ve döşeme kalıpları kurulmuştur (Şekil 3.11c, d, 3.12e). Kalıp kurulumu tamamlandıktan sonra kalıp içine kiriş ve döşemelere ait donatılar yerleştirilmiştir (Şekil 3.11e, f, 3.12f).



Şekil 3.10. Donatıların hazırlanması **a)** kirişlere ait etriye hazırlama plakası; **b)** kolon ve kirişlere ait donatılar



Şekil 3.11. Birinci kat kalıp kurulumu ve donatı yerleşimi aşamaları **a)** kolon donatılarının filizlere bağlanması; **b)** kolon kalıp yerleşimi; **c)** kiriş kalıp yerleşimi; **d)** döşeme kalıp yerleşimi; **e)** kiriş donatılarının yerleşimi; **f)** döşeme donatılarının yerleşimi



Şekil 3.12. Birinci kat kalıp kurulumu ve donatıların yerleştirilmesi **a)** kolon filiz detayları; **b)** kolon donatısının filizlere bağlanması; **c)** ve **d)** kolon kalıp yerleşimi; **e)** kiriş ve döşeme kalıplarının ve kiriş donatılarının yerleşimi; **f)** döşeme donatılarının yerleşimi

3.1.1.3. Birinci kat beton dökümü

Çizelge 3.1’de verilen karışım oranında hazırlanan ve hedef basınç dayanımı 8 MPa olan beton kalıplara dökülmüştür. Şekil 3.13’te de görüldüğü gibi beton karışım

işlemi laboratuvarında bulunan beton mikseri ile hazırlanmış ve dökülmüştür. Birinci kat betonu yeterli dayanıma eriştiğinde kalıplar sökülüştür.

Çizelge 3.1. Beton karışımı (C10 kalitede beton için)

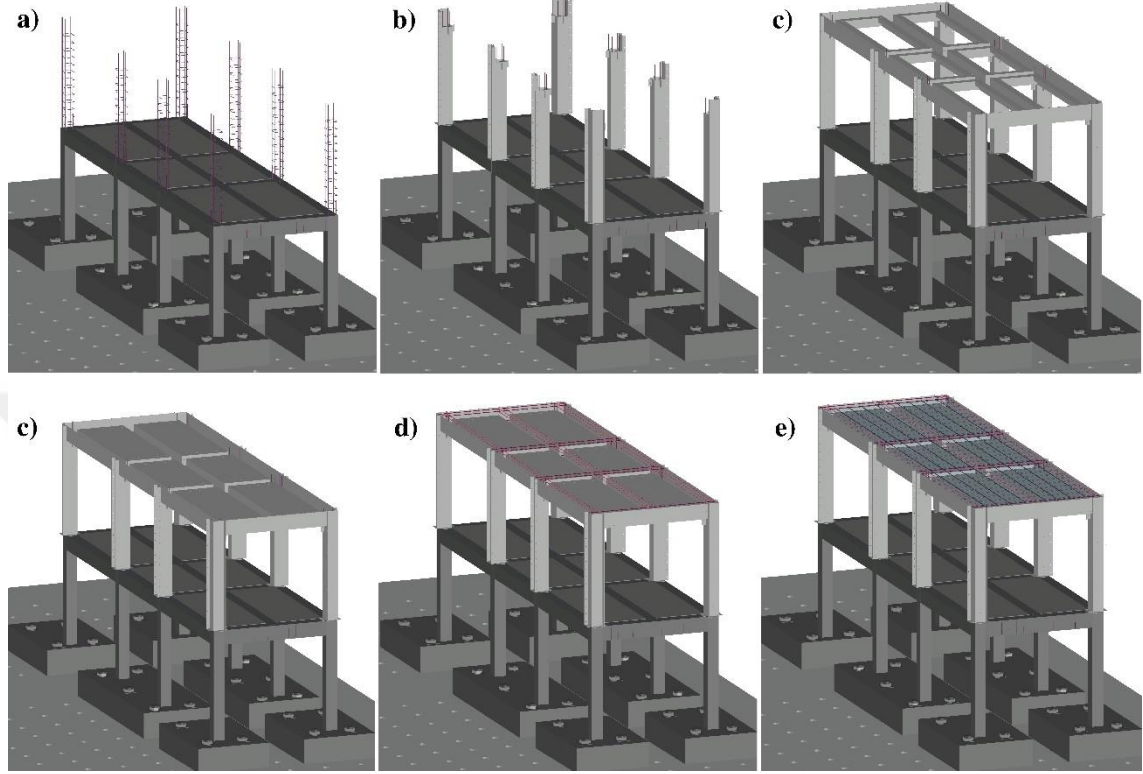
Karışım	Ağırlık (kg)	Oran (%)
Çimento	50	10.9
Su	50	10.9
0-3 mm agregası	140	30.4
3-7 mm agregası	220	47.8



Şekil 3.13. Birinci kat beton dökümü

3.1.1.4 İkinci kat kalıpların kurulması

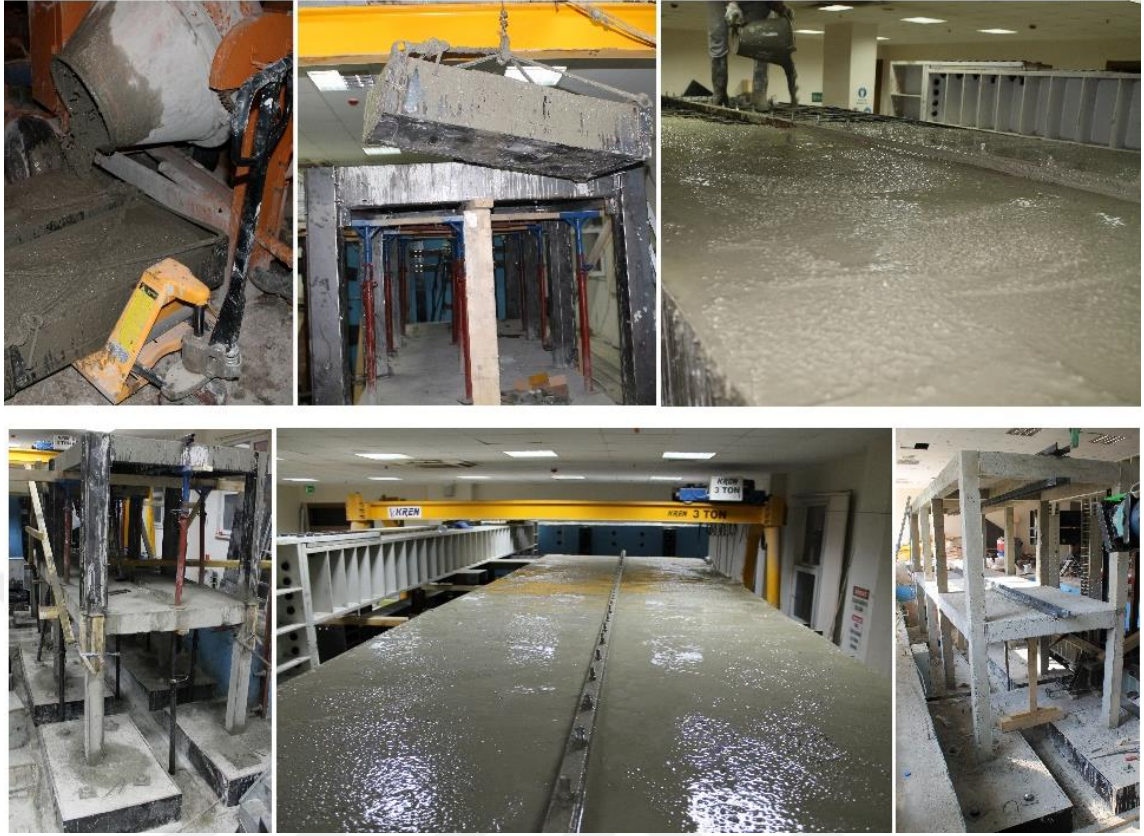
Birinci kattaki işlem sırası ikinci kat kalıp kurulumu için de takip edilmiştir (Şekil 3.14, 3.15).



Şekil 3.14. İkinci kat kalıp kurulumu ve donatıların yerleştirilmesi **a)** kolon donatılarının filizlere bağlanması; **b)** kolon kalıplarının yerleşimi; **c)** kiriş kalıplarının yerleşimi; **d)** döşeme kalıplarının yerleşimi; **e)** kiriş donatılarının yerleşimi; **f)** döşeme donatılarının yerleşimi



Şekil 3.15. İkinci kat kalıp kurulumu ve donatıların yerleştirilmesi



Şekil 3.16. İkinci kat beton dökümü ve kalıp sökümü sonrası

3.1.1.5. İkinci kat beton dökümü

İkinci kat betonu da yine Çizelge 3.1'deki karışım oranında hazırlanarak ikinci kat kalıplarına dökülmüştür (Şekil 3.16). RDE'ye ait malzemelerin mekanik özellikleri EK-7.1'deki Çizelge 8.4 ve 8.5'te verilmiştir.

3.1.1.6. U-Profillerin yerleştirilmesi

Birinci ve ikinci kat beton dökümü yapıldıktan ve kalıplar söküldükten sonra yatay yük uygulaması için döşeme alt ve üst kotlarına Şekil 3.3, 3.6a ve 3.16'da görüldüğü gibi U-profiller (NPU140) yerleştirilmiştir.

3.1.1.7. Kum torbalarının yerleştirilmesi

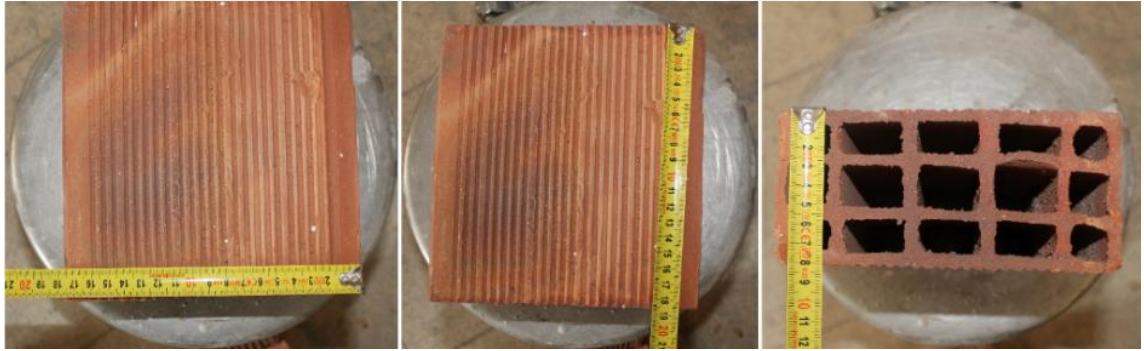
Düşey yükleme için yapı döşemesine her biri yaklaşık 25 kg ağırlığında olan kum torbaları yerleştirilmiştir (Şekil 3.17). Her kata 7.5 ton olmak üzere toplam 15 ton kum yapı döşemelerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Yapıya düşey yükleme için kum torbalarının yüklenmesi **a); b)** kumun çuvallara doldurulması (her bir çuval 25 kg olacak şekilde); **c); d); e)** kum torbaları katlara yerleştirildikten sonra

3.1.1.8. Tuğla duvarların örülmesi, sıva ve badana işlemleri

Yapı kum torbaları ile düşeyde yüklendikten sonra tuğla duvar örme işlemi başlamıştır. Şekil 3.18’de gösterilen 8.5 cm’lik tuğlalar yapı akslarına örülmüştür. Şekil 3.3 ve 3.20’de görüldüğü üzere birinci katta sadece dış orta akslara, ikinci katta ise yapının bütün dış akslarına tuğla duvar örülmüştür. Birinci katta sadece orta aksa tuğla örülmesinin amacı zayıf kat davranışı elde edebilmektir.



Şekil 3.18. Tuğla boyutları



Şekil 3.19. Kapı pencere lentolarının hazırlanması



Şekil 3.20. Tuğla duvar örme işlemi

Ayrıca ikinci katta tuğla duvarlarda pencere ve kapı boşlukları konulmuştur. Bu işlem için ilk olarak kapı ve pencere boşluklarına lento üretilmiş ve yerleştirilmiştir (Şekil 3.19). Bu yapısal olmayan eleman uygulaması ile mevcut kusurlu yapıların durumu oluşturulmak istenmiştir. Tuğla işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.21’de görüldüğü gibi tuğla duvarlar sıvanmıştır. Sıva işlemi tamamlandıktan sonra deney esnasında meydana gelen çatlamları daha iyi belirleyebilmek için bütün yapı kireç ile boyanmıştır (Şekil 3. 22).



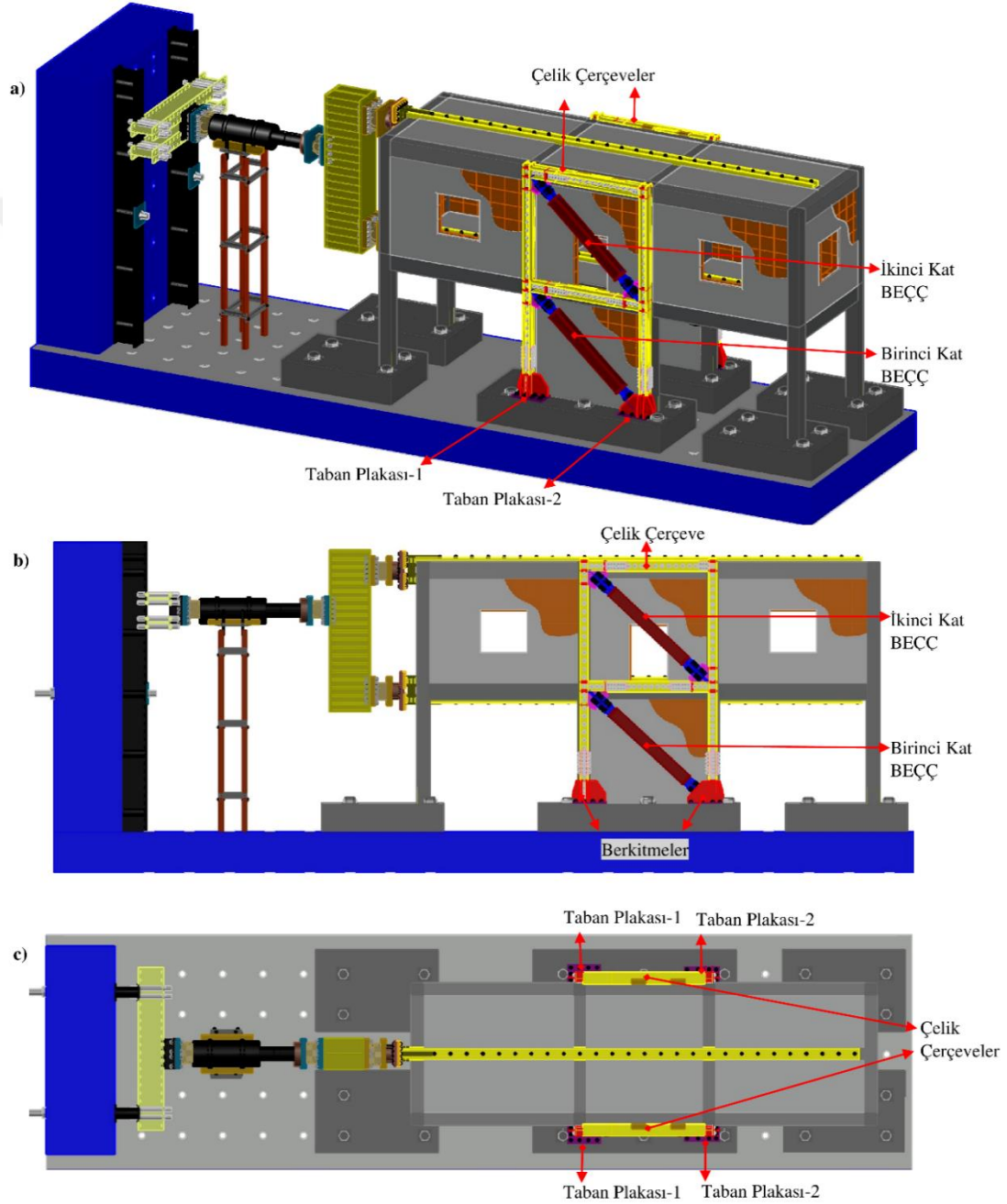
Şekil 3.21. Sıva işlemi



Şekil 3.22. Badana sonrası yapının durumu

3.1.2. Güçlendirilmiş deney elemanları (GDE'ler)

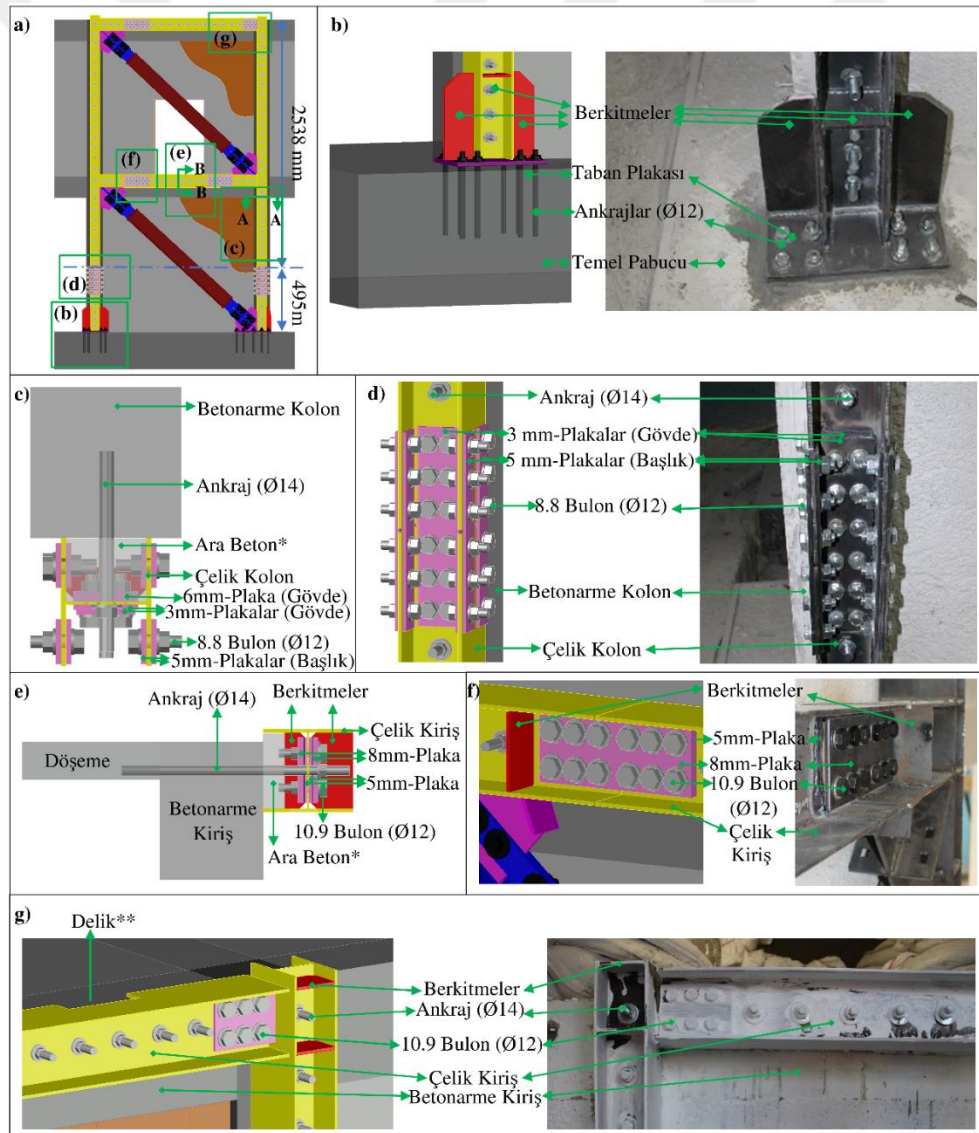
Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda dış güçlendirme metodu kullanılarak BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile güçlendirilecek olan her bir betonarme deney elemanı, RDE ile aynı yapısal kusurlara sahip olacak şekilde, yeniden inşa edilmiştir. Şekil 3.23'te GDE'lere ait üç boyutlu, ön ve plan görüşleri verilmiştir. Betonarme yapının yapım aşamaları RDE'nin yapım aşamaları ile aynıdır. İnşa edilen bu kusurlu betonarme yapılar, orta açıklıklarına BEÇÇ'li çelik çerçeveler dışarıdan ankrajlar yardımıyla bağlanarak güçlendirilmişlerdir (Şekil 3.23).



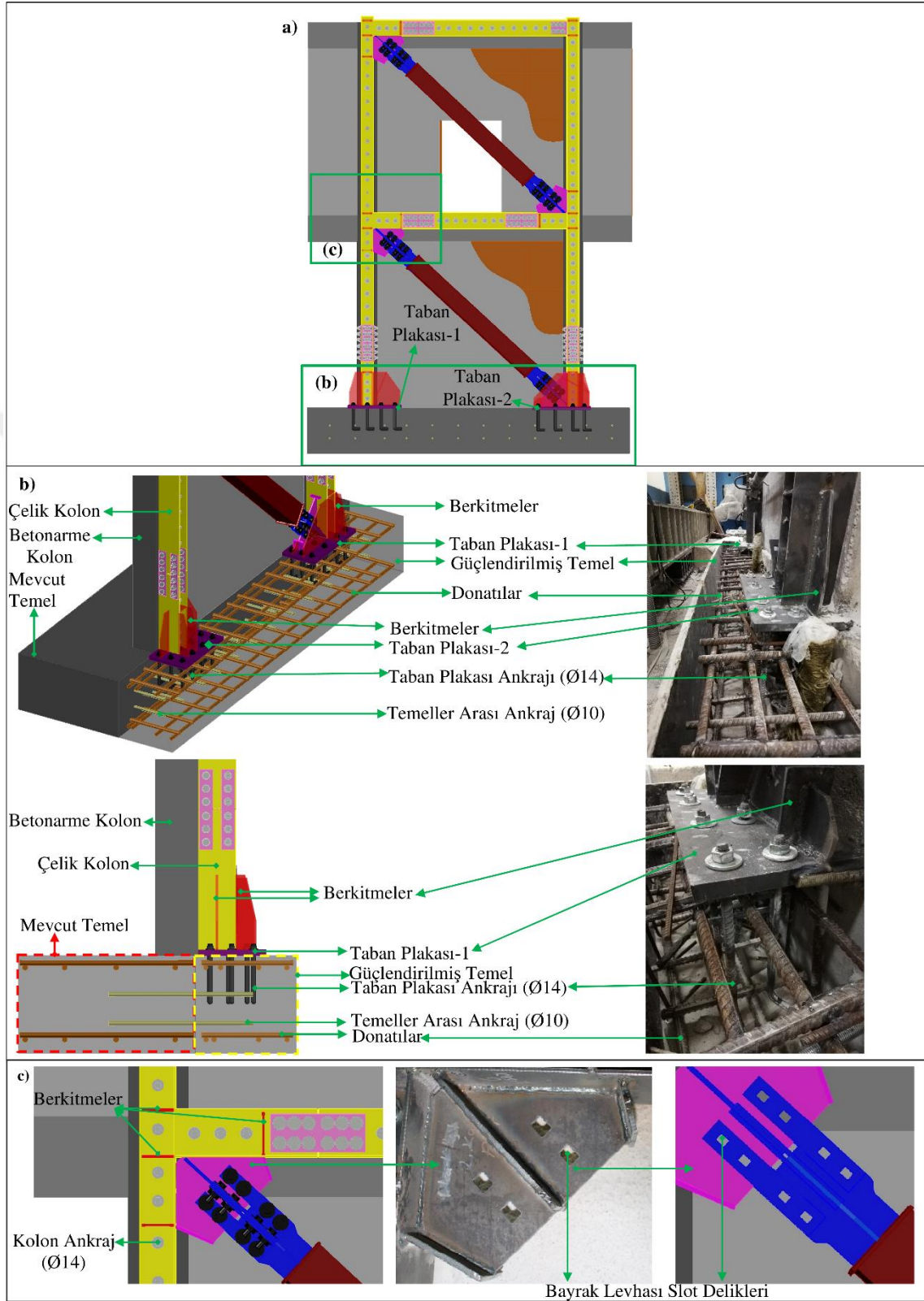
Şekil 3.23. GDE'lerin genel görünümü **a)** üç boyutlu görünüş; **b)** yan görünüş; **c)** plan görünüş

Güçlendirme amaçlı kullanılacak olan BEÇÇ'li çelik çerçeveye ait tasarım yaklaşımı Bölüm 3.1.4'te verilmiş olup detaylı hesaplamalar EK-2, EK-3, EK-4, EK-5 ve EK-6'da mevcuttur. Söz konusu tasarım sadece bu çalışmadaki betonarme deney elemanının güçlendirilmesi için yapılmıştır. Mevcut yapılar için tasarımın nasıl olması gerektiği tez içeriğinde ayrıca verilmiştir.

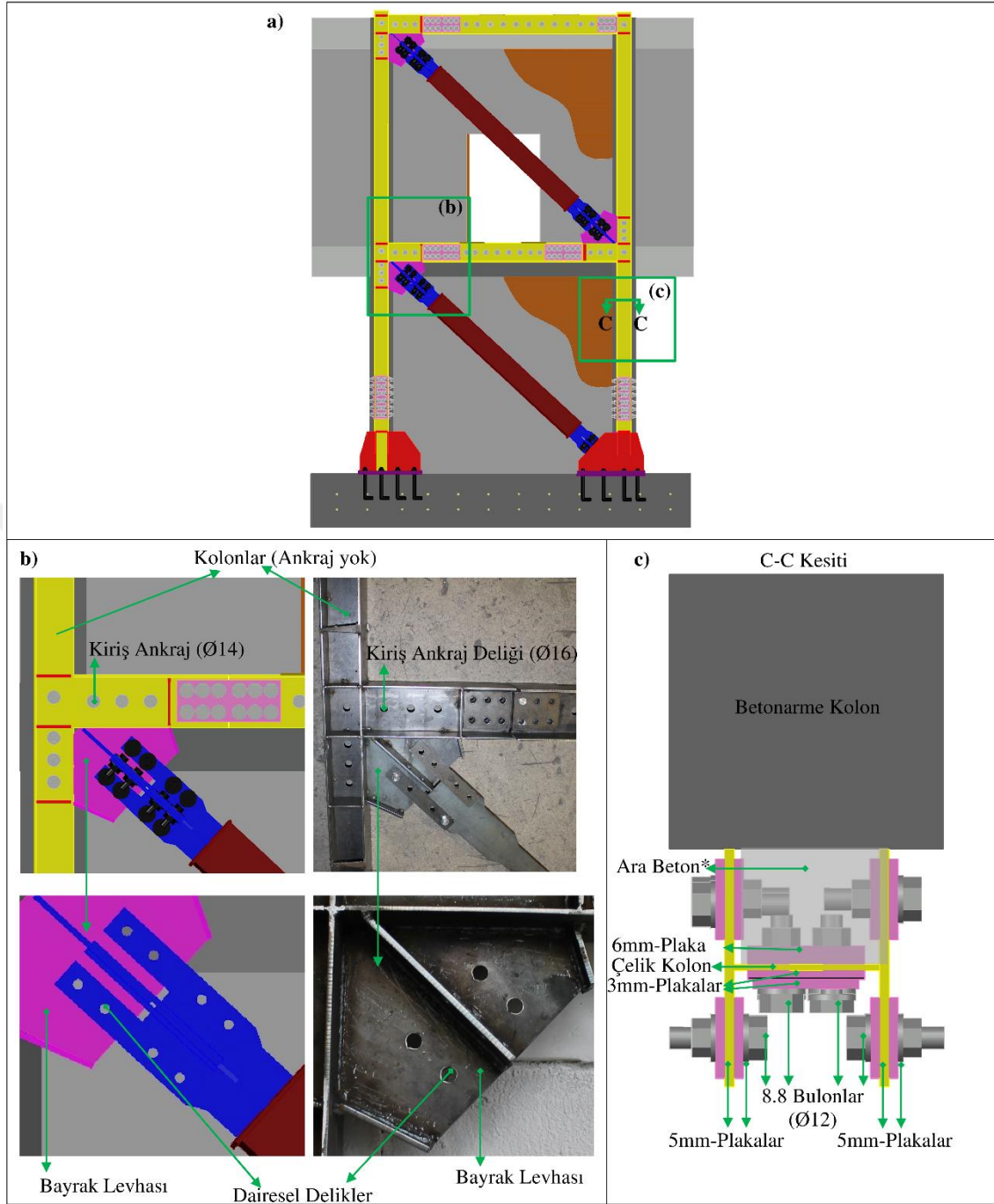
Bilindiği gibi deney elemanına eklenecek BEÇÇ'li çelik çerçevedeki BEÇÇ'ye ait ÇE'nin enkesit alanı ne kadar büyük olursa güçlendirilen yapının yatay yük taşıma kapasitesi o kadar çok artacaktır. Dolayısı ile deney elemanı için ÇE'nin enkesiti belirlenmelidir. Mevcut yapılar için ise bu ÇE enkesitinin belirlenmesinde yatay istemler dikkate alınarak yapılacaktır. Bu çalışmada kullanılan BEÇÇ detayları ve ÇE'nin enkesit hesabı Bölüm 3.1.4 ve EK-3'te verilmiştir. Daha önce de değinildiği gibi bu çalışma kapsamında üç adet GDE test edilmiştir. Bu üç GDE arasındaki farklar Şekil 3.24, 3.25 ve 3.26'da görülmekte olup bu farklara ilerleyen bölümlerde sırasıyla detaylıca yer verilecektir.



Şekil 3.24. GDE-1'e ait detaylar



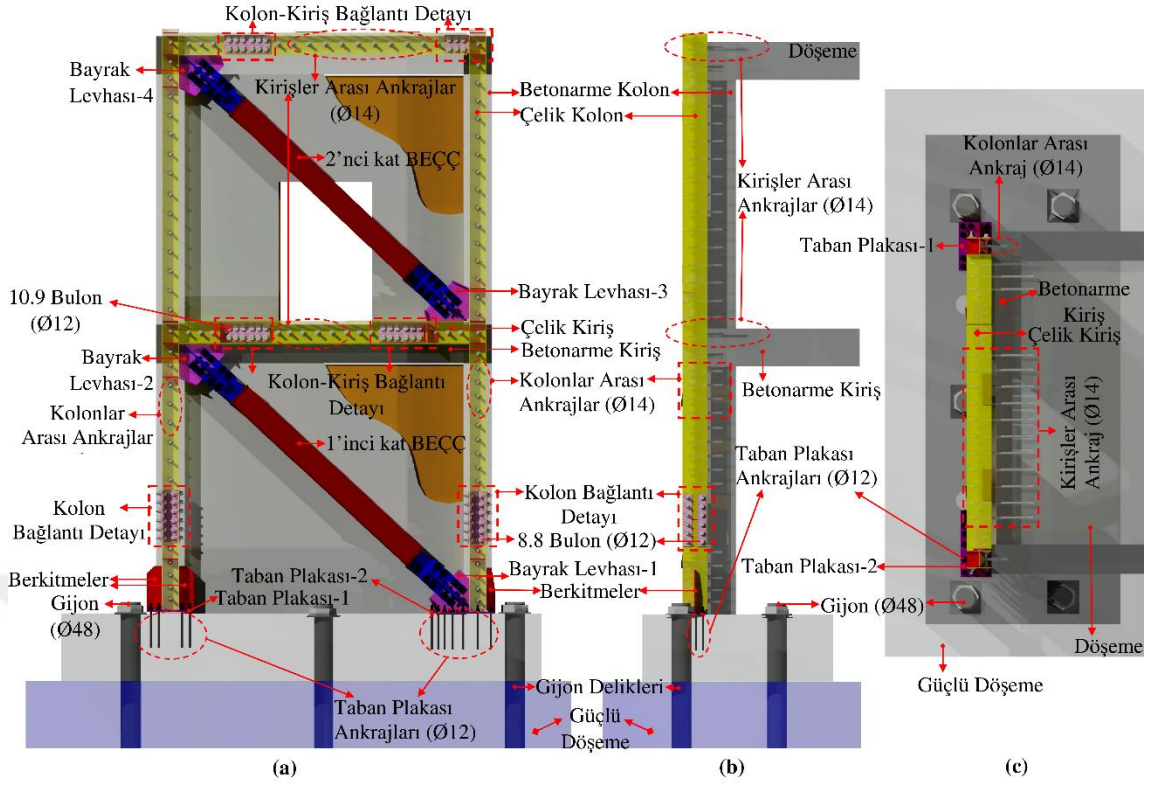
Şekil 3.25. GDE-2'ye ait detaylar



Şekil 3.26. GDE-3'e ait detaylar

3.1.2.1. Güçlendirilmiş deney elemanı-1 (GDE-1)

BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile dışarıdan güçlendirilmiş ilk deney elemanı olan GDE-1'in yapım aşamaları sırasıyla şu şekildedir: 1) kusurlu betonarme binanın inşası 2) çelik çerçevelerin ve BEÇÇ'lerin tasarımı 3) çelik çerçevelerin ve BEÇÇ'lerin imalatı ve montajı.



Şekil 3.27. GDE-1'e ait çelik çerçeve ve BEÇÇ detayları

BEÇÇ'li çelik çerçevelerin tasarımı için bir ön çalışma yapılmıştır. Söz konusu ön çalışmada i) kolon ve kirişlerin tamamı HEA120 profil, ii) kolonlar 120x120x3 kutu profil, kirişler ise HEA120 profil, iii) kolon ve kirişlerin tamamı 120x120x3 kutu profilden oluşacak şekilde üç farklı çerçeve modeli tasarlanmıştır (EK-2, Şekil 8.2, 8.3). HEA120 ve 120x120x3 kutu profil kesitleri EK-2'deki Şekil 8.4'te verilmiştir. Her bir çerçeve modeli, OPENSEES programı kullanılarak moment aktaran ve moment aktarmayan boş çerçeve, diyagonal çaprazlı ve ters V çaprazlı çerçeve olarak modellenmiş ve itme analizleri yapılmıştır. BEÇÇ'lere ait ÇE alanları yaklaşık olarak hesaplanıp modellenmiştir. Çerçeve ağırlıkları ve itme analizlerinden elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri dikkate alınarak optimum tasarım yapılmıştır. EK-2'deki Çizelge 8.1'de verilen ön çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, güçlendirme işlemi için bütün kolon ve kirişlerin I profilden oluştuğu moment aktarmayan diyagonal çaprazlı çerçevenin kullanılmasına karar verilmiştir (EK-2, Şekil 8.3). BEÇÇ'li çelik çerçevelerin diyagonal çapraz konfigürasyonunda tasarlanmasının, BEÇÇ ve çelik çerçeve arasındaki bağlantı sayısının ters V çelik çapraz konfigürasyonuna göre daha az olması sebebiyle daha avantajlı olacağı düşünülmüştür. Mevcut betonarme binadan dolayı çelik çerçevelerin saha imalatında istenilen kalitede işçilik sağlanamama ihtimalinden dolayı çelik çerçevelerin moment aktarmayan çerçeveler olarak tasarlanmasının da uygulama açısından avantaj sağlayacağı öngörülmüştür. Ön tasarıma ait şekil ve çizelgeler EK-2'de verilmiştir.

BEÇÇ’li çelik çerçeveler betonarme çerçevelere temel (Şekil 3.24b, 3.27), kolon (Şekil 3.24c, 3.27) ve kiriş (Şekil 3.24e, 3.27) seviyelerinde ankraj çubukları ile bağlanmışlardır. RDE’nin deney sonuçları (Bölüm 4.1.1) incelendiğinde tuğla duvarda meydana gelen hasar ile yatay kapasitenin düştüğü görülmüştür. GDE-1 için kullanılacak olan BEÇÇ’lerin minimum ÇE enkesit alanı hesaplanırken tuğla duvarların hasar görmesiyle oluşan yatay yük kapasitesindeki düşüşün BEÇÇ’ler tarafından karşılanabileceği varsayımı dikkate alınmıştır. Tuğla duvarın efektif alan hesabı Amerikan Standardına (ASCE/SEI41-06, 2007) göre hesaplanmış olup EK-3’te detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu durumda birinci kattaki tuğla duvarların eksenel olarak taşıyabileceği yük kapasitesi

$$P_{\text{tuğladuvar}} = f_{dc} \times A_{\text{duvar}} \quad (3.1)$$

$$P_{\text{tuğladuvar}} = 3764 \times 0.026 = 97.864 \text{ kN}$$

olarak hesaplanmıştır. Buna göre birinci kattaki BEÇÇ’ler için ÇE en kesit alanı bu yüke göre hesaplanırsa,

$$A_{\text{ÇE}} = \frac{P_{\text{tuğladuvar}}}{f_y} \quad (3.2)$$

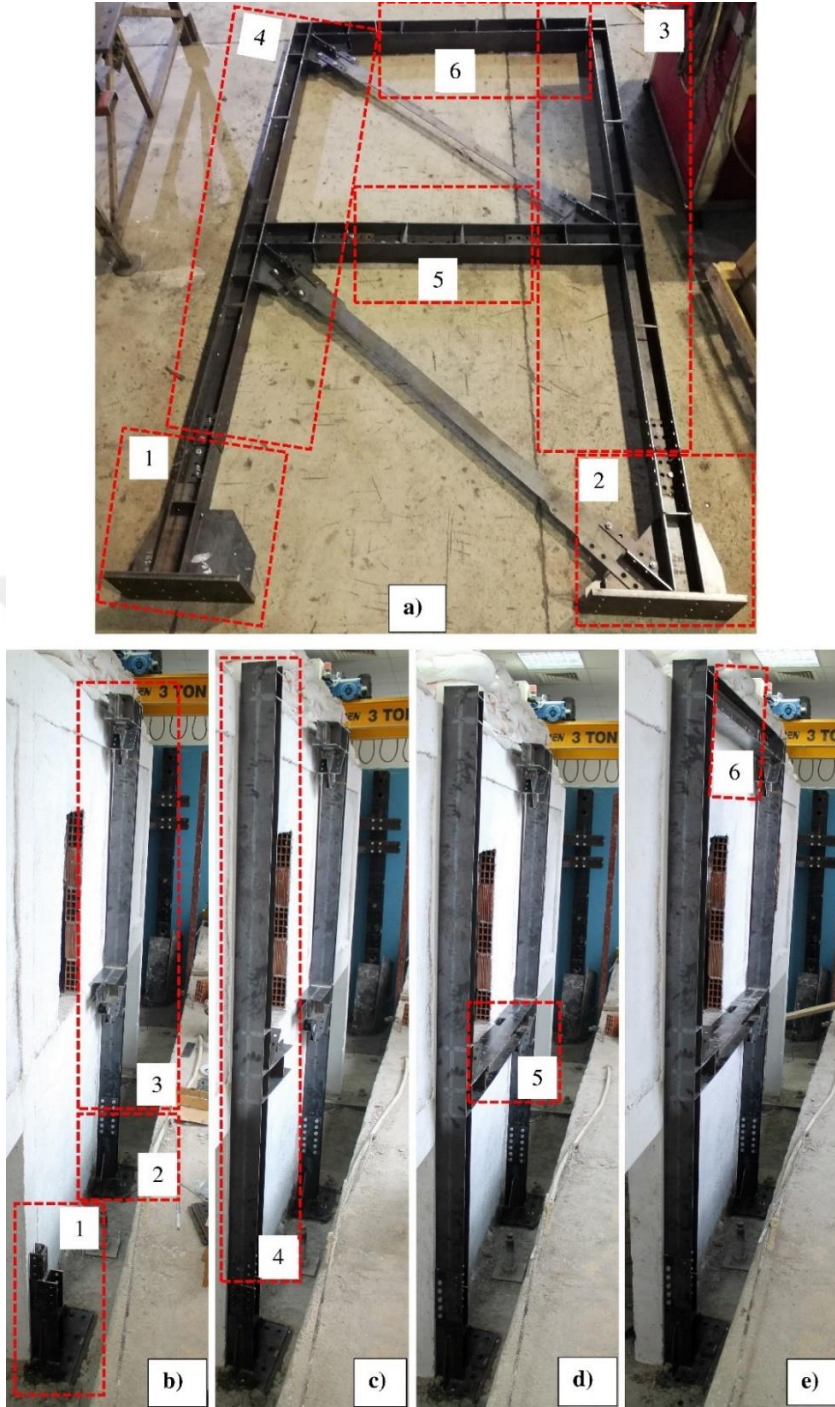
$$A_{\text{ÇE}} = \frac{97.864}{235000} = 0.000416 \text{ m}^2 = 420 \text{ mm}^2$$

olarak bulunur. Söz konusu ÇE en kesit alanı ile BEÇÇ ile güçlendirilen betonarme yapının yatay yük taşıma kapasitesi ve rijitliğinin artması beklenen bir davranış türü olup söz konusu enkesit alanı artırılarak yatay kapasite ve rijitlik artırılabilir. Ancak bu proje kapsamında 420 mm²’lik enkesit alanının kullanılması uygun görülmüştür. Kiriş ve kolonların nihai kesitlerinin tayin edilebilmesi için SAP2000 programıyla yapılan elastik analizlerinden elde edilen kuvvet dağılımından (EK-4, Şekil 8.5) yararlanılmıştır. BEÇÇ’li çelik çerçevenin ve bağlantılarının hesaplanabilmesi için BEÇÇ eksenel yük kapasitesi nominal değerinden artırılarak hesaplarda EK-5’teki Denklem E5.6’dan elde edilen değer (138.18 kN) kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen maksimum eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve moment değerleri dikkate alınarak çelik çerçevelerin tasarımı yapılmıştır. Kolon kirişlere ait nihai kesitler EK-4’te verilen Şekil 8.6’daki gibi belirlenmiştir. Birleşim hesapları eleman kapasitelerine göre yapılmıştır. Tasarımda kullanılan hesaplamalar EK-4’te verilmiştir. Bayrak levhalarının boyutları Eşdeğer Kuvvet Metoduna (uniform force method) (AISC, 1994) göre belirlenmiş olup EK-5’te verilmiştir. Bayrak levhalarının boyutları ve serbest cisim diyagramları EK-5’teki Şekil 8.7, 8.8, 8.9 ’da gösterilmiştir. Ayrıca hesaplara ait detaylar Ek-5’teki Çizelge 8.3’te gösterilmiştir. Söz konusu kuvvetlere göre kaynak kontrolü yapılmıştır.

Çelik çerçevelerin tasarımından sonra çelik kolonlara ait taban plakaları tasarlanmıştır. GDE-1'e ait çelik kolon taban plakaları Türkiye'de yürürlükte olan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları'na (ÇYTHYE, 2016) göre tasarlanmış olup hesap detayları Bölüm EK-6.1'de mevcuttur. EK-6.1'deki Şekil 8.10'da taban plakalarının boyutları görülmektedir. Tasarımdan sonra üretime geçilmiştir. Çelik çerçeveler tam penetrasyonlu kaynak yöntemiyle üretilmiştir.

Taban plakasının montajını kolaylaştırmak amacıyla kolonlar 495 mm ve 2538 mm boyunda iki ayrı parça olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.24a). Her ne kadar deney elemanının üretiminde işçilik daha etkin yapılabilir olsa da gerçek boyuttaki bir yapıda kolon-taban plakası bağlantısı istenilen işçilik kalitesine ulaşamayabilir. Bu yüzden kolon elemanı ikiye bölünmüştür. Bu iki parçanın birleşiminde kolon gövdelerinin bir yüzüne 6 mm kalınlığında diğer yüzüne 3 mm kalınlığında plakalar kaynatılıp ve 3 mm'lik ara plakalar kullanılarak, kolon başlıkları ise başlıkların her iki yüzünde olmak üzere altı adet 5 mm kalınlığındaki ara plakalar kullanılarak 8.8 kalitede bulonlarla bağlanmıştır (Şekil 3.24c, d). Kolon kiriş birleşim yerlerinde kiriş gövdelerinin her iki yüzüne 5 mm kalınlığında plakalar kaynatılmış 8 mm ara plakalar kullanılarak 10.9 kalitede bulonlarla birleştirilmişlerdir (Şekil 3.24e). Moment aktarmayan çerçeve olması sebebiyle kiriş başlıkları bağlanmamıştır.

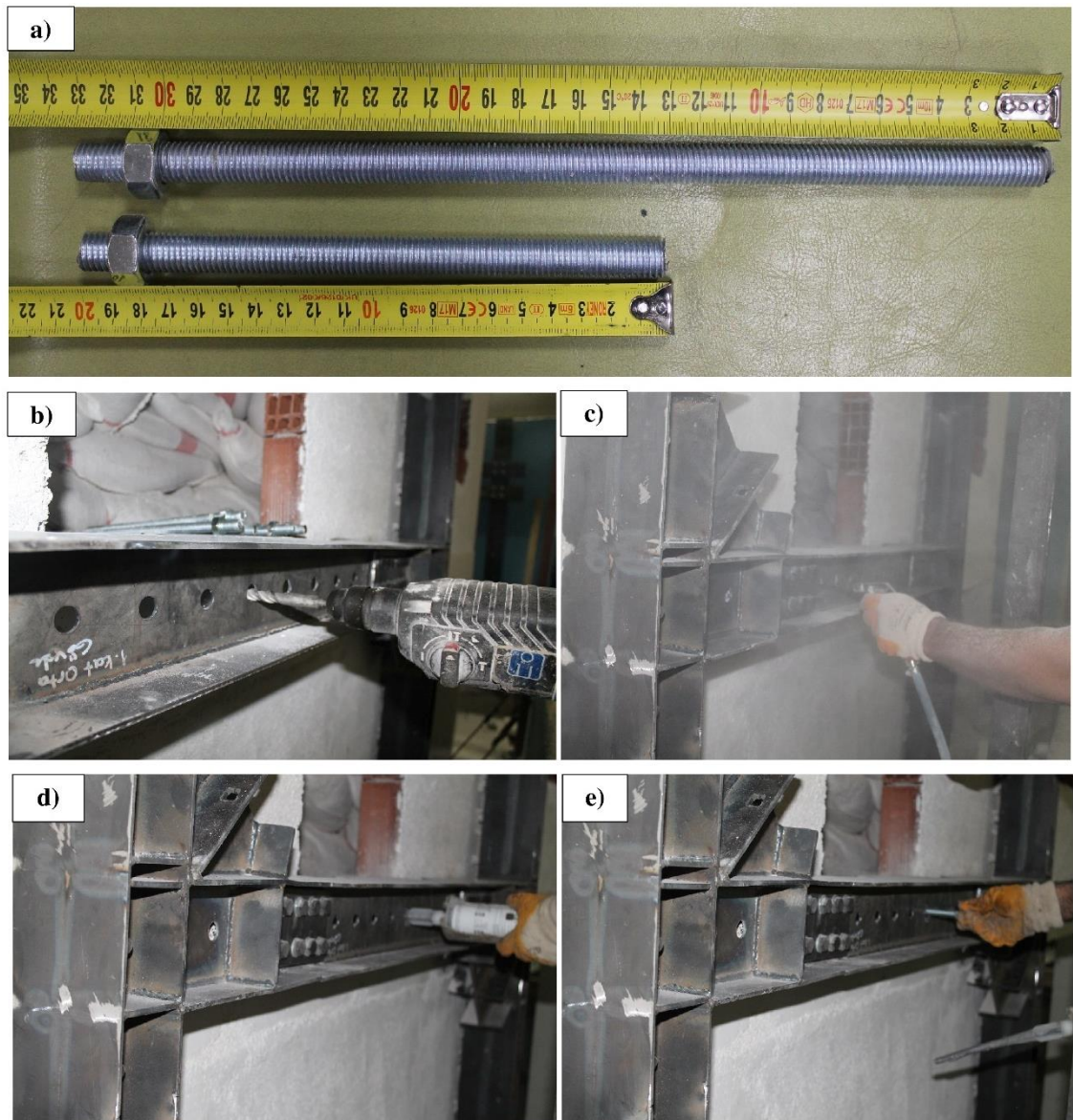
Çelik çerçevenin betonarme yapıya monte edilmesi işlemine taban plakalarının betonarme temellere ankrajlanması ile başlanmıştır. Taban plakalarının ankraj çapı Ø12 ve ankraj derinliği 200 mm olarak belirlenmiştir. Matkapla açılan ankraj delikleri hava kompresörü kullanılarak temizlendikten sonra epoksi sıkılmış ve ankrajlar bu deliklere yerleştirilmişlerdir. Sonrasında üst kısım kolonlar taban plakalarına kaynatılmış olan 495 mm uzunluğundaki kesik kolonlara bağlanmıştır (Şekil 3.28b, c). Daha sonra ise kirişler kolonlara bağlanmıştır (Şekil 3.28d, e). Kolon ve kiriş seviyelerindeki ankraj delikleri bu montaj işlemlerinden sonra matkap yardımıyla açılmıştır (Şekil 3.29). Kolon ve kirişler için ankraj çapı Ø14 olarak belirlenmiştir. Ankraj aralıkları ortalama 75 mm'dir. Kolonlarda ankraj derinliği 100 mm iken kirişlerde bu derinlik 200 mm'dir (Şekil 3.29a). Kolon seviyesindeki ankrajlar betonarme kolonların merkezine, kiriş seviyesindeki ankrajlar ise betonarme binanın döşeme orta seviyesine denk gelecek şekilde uygulanmışlardır (Şekil 3.27). Böylece betonarme ve çelik çerçeve arasında rijit diyafram sağlanmıştır. Açılan delikler hava kompresörü kullanılarak temizlenmiştir (Şekil 3.29c). Temizlenen deliklere epoksi sıkılmış ve ankrajlar deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 3.29d, e). Böylelikle çelik çerçevenin montajı tamamlanmıştır. Betonarme bina ve çelik çerçeve arasındaki boşluğu doldurmak ve ankrajlarla aderans sağlamak için betonarme ve çelik çerçeveler arasına C20 kalitesinde beton dökülmüştür (Şekil 3.24c, e, g, 3.30). Beton karışım oranı Çizelge 3.2'de verilmiştir. GDE-1'e ait malzemelerin mekanik özellikleri EK-7.2'de Çizelge 8.6 ve 8.7'de verilmiştir.



Şekil 3.28. Çelik çerçeve montaj aşamaları **a)** imalat sonrası; **b)** 1, 2 ve 3 numaralı parçaların montajı sonrası; **c)** 4 numaralı parçanın montajı sonrası; **d)** 5 numaralı parçanın montajı sonrası; **e)** 6 numaralı parçanın montajı sonrası

Çizelge 3.2. C20 kalitede beton için karışım oranı
(betonarme ve çelik çerçeveler arasına dökülen beton)

Karışım	Ağırlık (kg)	Oran (%)
Çimento	54	18.4
Su	22	7.5
0-3 mm agregası	132	45.1
3-7 mm agregası	84	28.7



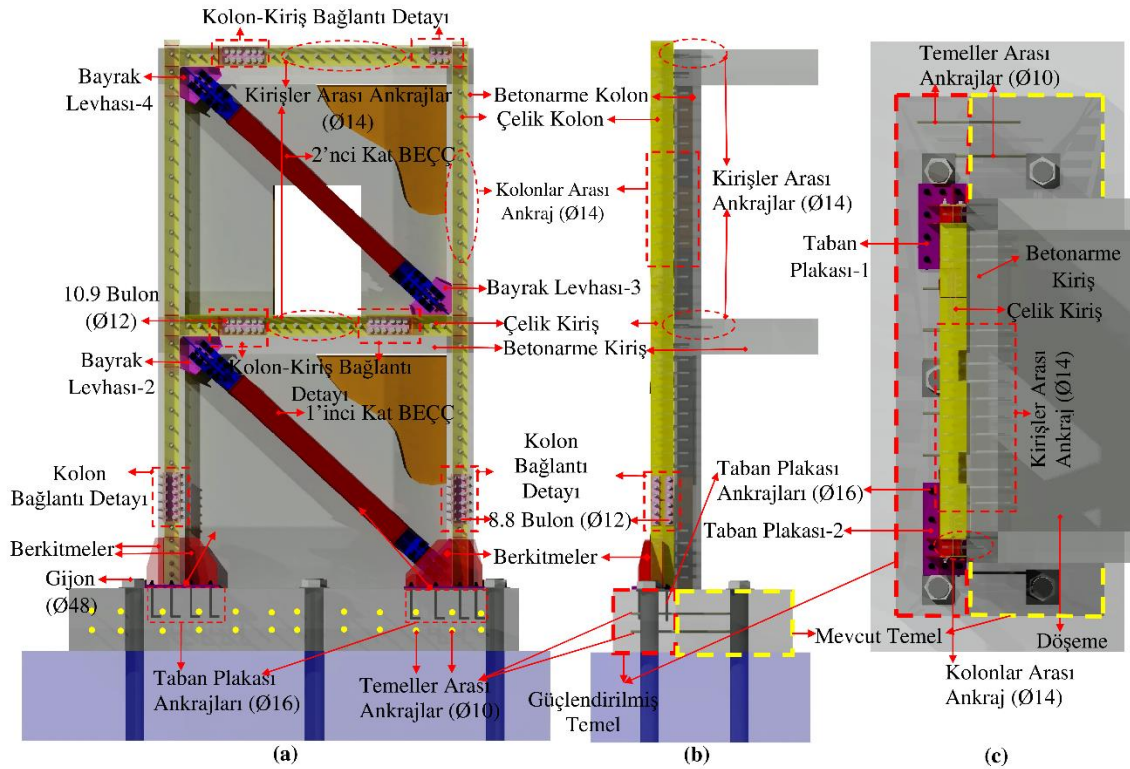
Şekil 3.29. Çelik çerçeve montajı **a)** montajda kullanılan ankrajlar (kirişler için 33 cm, kolonlar için 20 cm uzunluğunda); **b)** ankraj deliği açma işlemi; **c)** açılan deliğin basınçlı hava ile temizlenmesi; **d)** deliklere epoksi sıkılması; **e)** ankrajların yerleşimi



Şekil 3.30. Çelik çerçeveler ve betonarme çerçeve arasına beton dökülmesi **a)** mikserde betonun hazırlanması; **b)** kolonlar arası beton dökümü; **c)** ikinci kat kirişler arası beton dökümü; **d)** birinci kat kirişler arası beton dökümü; **e)** beton silindir numuneleri

3.1.2.2. Güçlendirilmiş deney elemanı-2 (GDE-2)

RDE'nin yapımı esnasında temeller düşük dayanımlı betonla inşa edilmişlerdir. GDE-1 için yeni temeller inşa edilmemiş yani RDE'nin temelleri yıkılmamış ve tekrar kullanılmıştır. Bu nedenle, GDE-1'de BEÇÇ'li çelik çerçevenin bağlandığı orta açıklıktaki sürekli temeller hasar görmüş (Şekil 4.17, 4.18) ve dolayısıyla BEÇÇ'ler etkin çalışmamıştır (Şekil 4.22). GDE-2'nin GDE-1'den farkı orta açıklıktaki sürekli temellerin güçlendirilmiş olması ve farklı tasarım taban plakalarının kullanılmasıdır (Şekil 3.25b, 3.31). GDE-2'ye ait taban plakalarının tasarımı Amerikan standardına (ACI, 2014) göre yapılmıştır. Hesap detayları EK-6.2'de verilmiştir.

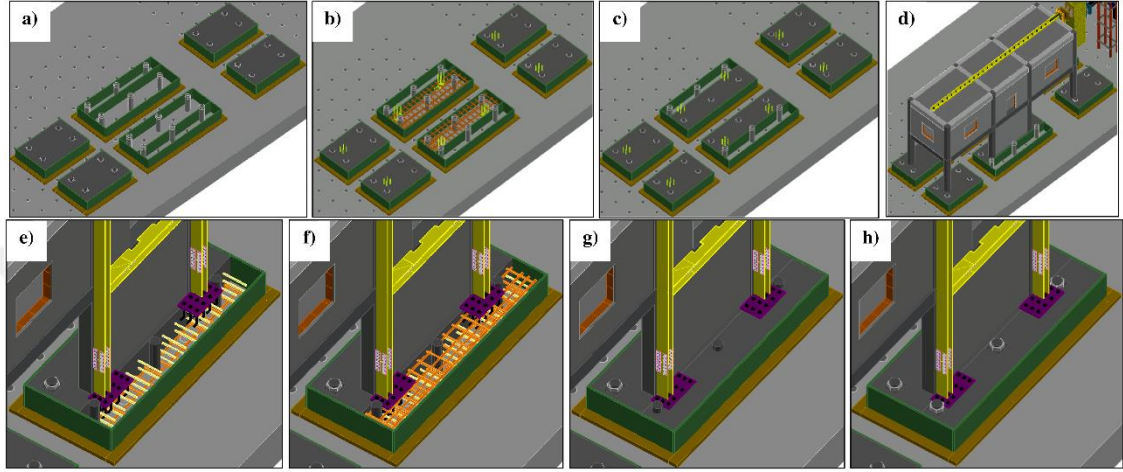


Şekil 3.31. GDE-2'ye ait çelik çerçeve ve BEÇÇ detayları

BEÇÇ'li çelik çerçeve temellerinin güçlendirilmesi

Mevcut betonarme yapıların gerçek durumunu yansıtmak amacıyla betonarme çerçevelerin orta açıklıklarına, yine düşük dayanımlı beton kullanılarak sürekli temeller imal edilmiştir (Şekil 3.32a-c, 3.33a-b). Sonrasında bu temellerin üzerine betonarme yapı inşa edilmiştir (Şekil 3.32d). Betonarme yapının inşası tamamlandıktan sonra orta açıklıktaki bu sürekli temellere ek, BEÇÇ'li çelik çerçevelerin oturtulacağı, yüksek beton dayanımına sahip yeni temeller imal edilmiştir (Şekil 3.32e-h, 3.33d-i). Bu yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan karışım oranı Çizelge 3.3'te görülmektedir. GDE-2'ye ait malzemelerin mekanik özellikleri EK-7.3'te Çizelge 8.8 ve Çizelge 8.9'da gösterilmiştir. Bu işlemlerin sırası belirlenirken mevcut bir temele ek yeni temel yapımının belirlenmesi amaçlanmıştır. İki aşamada inşa edilen betonarme ve çelik çerçevelerin altındaki temellerin birlikte çalışmaları ankrjalarla (Ø10) sağlanmıştır (Şekil 3.25, 3.31, 3.32e, 3.33d). Deneysel çalışmanın yapıldığı tarihte Türkiye'de

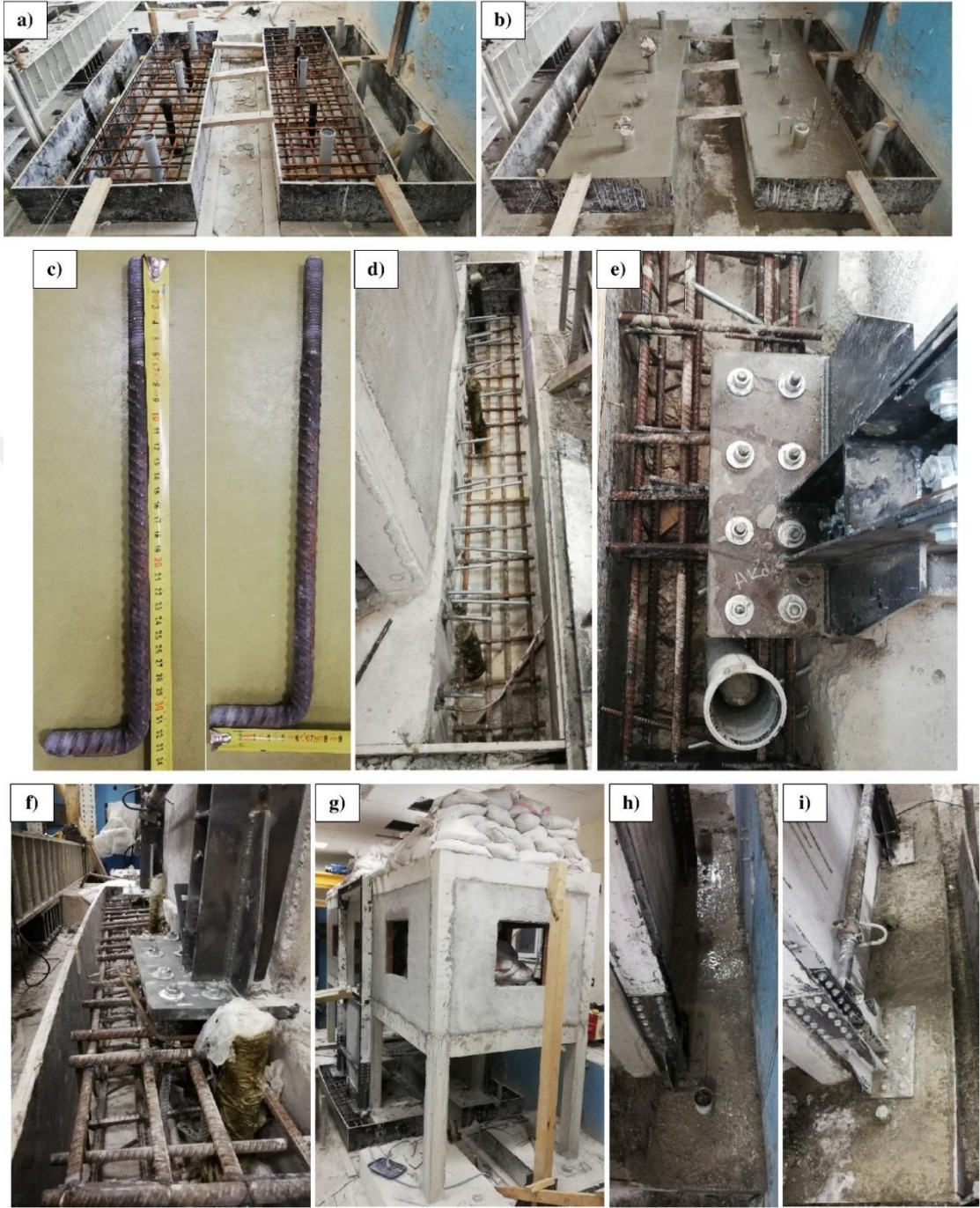
yürürlükte olan deprem şartnamesinde (TDY 2007) belirtildiği gibi taşıyıcı sistem davranış katsayısı, $R=1$ alınarak hesaplanan yatay istemler ankraj hesaplarında kullanılmıştır. Ankraj hesapları hem kullanılan ankraj çubuğunun kesme dayanımı hem de ankraj için betonda açılan ankraj deliğinin ezilme kapasitesi dikkate alınarak yapılmıştır. Betonarme yapı temelinin orta yükseklik seviyesine yaklaşık 100 mm aralıklarla 200 mm derinliğinde matkapla ankraj delikleri açılmış, delikler hava kompresörü kullanılarak temizlendikten sonra epoksi sıkılmış ve M14 ankrajlar bu deliklere yerleştirilmişlerdir.



Şekil 3.32. Temellerin güçlendirilme aşamaları **a)** temel kalıplarının yerleştirilmesi, temel gijonlarının deliklere yerleştirilmesi ve PVC borularının gijonlara sarılması; **b)** betonarme elemana ait temel donatılarının yerleştirilmesi; **c)** betonarme elemana ait temel betonunun dökülmesi; **d)** betonarme elemanın üretilmesi; **e)** çelik çerçevelere ait temel alt donatılarının ve temeller arası yatay ankrajların yerleştirilmesi; **f)** çelik çerçevelere ait temel üst donatılarının ve çelik çerçevelerin yerleştirilmesi; **g)** çelik çerçevelere ait temel betonunun dökülmesi; **h)** çelik çerçevelere ait temeldeki gijon etrafındaki pvc borularının fazla kısımlarının kesimi ve gijonların pul ve somunlarının takılması

Çizelge 3.3. C30-C35 kalitede beton için karışım oranı (güçlendirilmiş temel betonu)

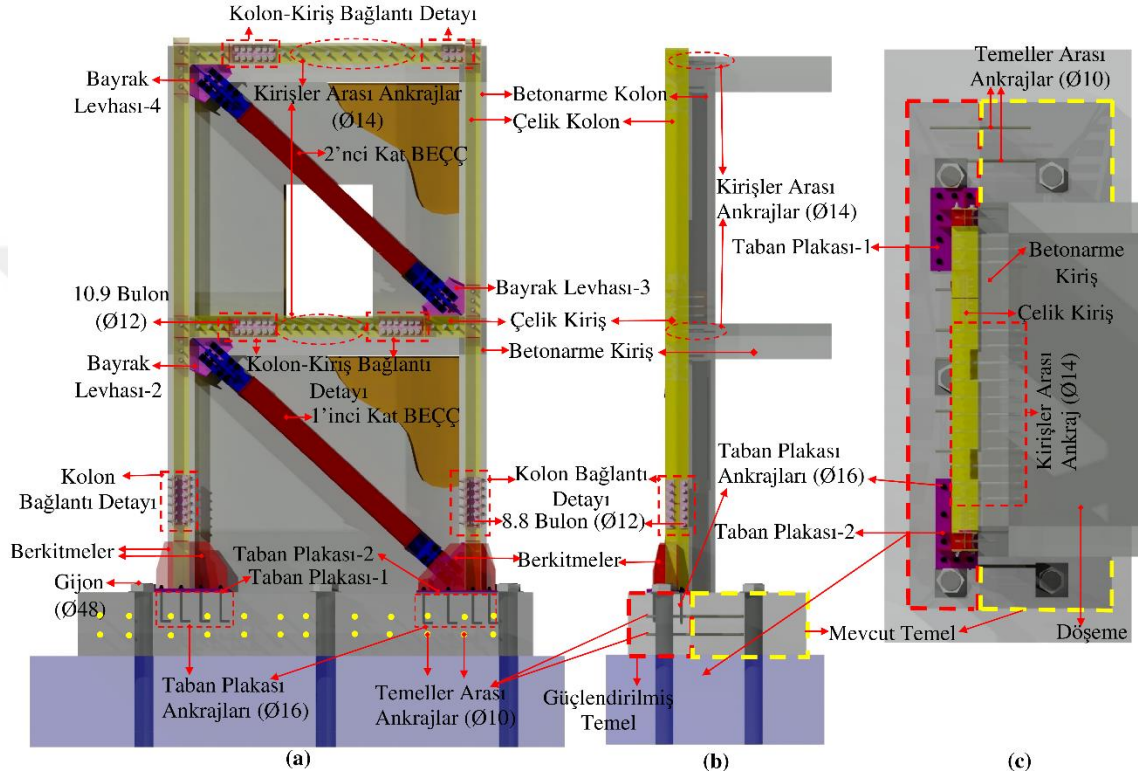
Malzeme	Ağırlık (kg)	Oran (%)
Çimento	109	23.7
Su	31	6.8
0-3 mm Agrega	182	39.7
3-7 mm Agrega	136	29.6
Katkı Malzemesi	1	0.2



Şekil 3.33. Temellerin güçlendirilmesi **a)** temel kalıplarının yerleştirilmesi, temel gijonlarının deliklere yerleştirilmesi, PVC borularının gijonlara sarılması ve betonarme elemana ait temel donatılarının yerleştirilmesi; **b)** betonarme elemana ait temel betonunun dökülmesi; **c)** çelik çerçevelerin taban plakalarına ait ankrajlar; **d)** çelik çerçevelere ait temel alt donatılarının ve temeller arası yatay ankrajların yerleştirilmesi; **e); f)** çelik çerçevelere ait temel üst donatılarının ve çelik çerçevelerin yerleştirilmesi; **g)** çelik çerçevelere ait temel betonu dökülmeden önce deney elemanının genel görünümü; **h); i)** çelik çerçevelere ait temel betonunun dökümü sonrası

3.1.2.3. Güçlendirilmiş deney elemanı-3 (GDE-3)

GDE-3'ün GDE-2'den en belirgin farkı BEÇÇ'li çelik çerçevenin sadece kiriş seviyesinde betonarme yapıya bağlanmış olmasıdır (Şekil 3.26, 3.34). Ayrıca GDE-3'te BEÇÇ ve çelik çerçeve arasındaki bağlantıda oval delik (slot) yerine standart dairesel delik kullanılmıştır (Şekil 3.25c, 3.26b, 8.8, 8.9). Diğer bütün aşamalar GDE-2 ile aynıdır. GDE-3'e ait malzemelerin mekanik özellikleri EK-7.4'te Çizelge 8.10 ve 8.11'de verilmiştir.

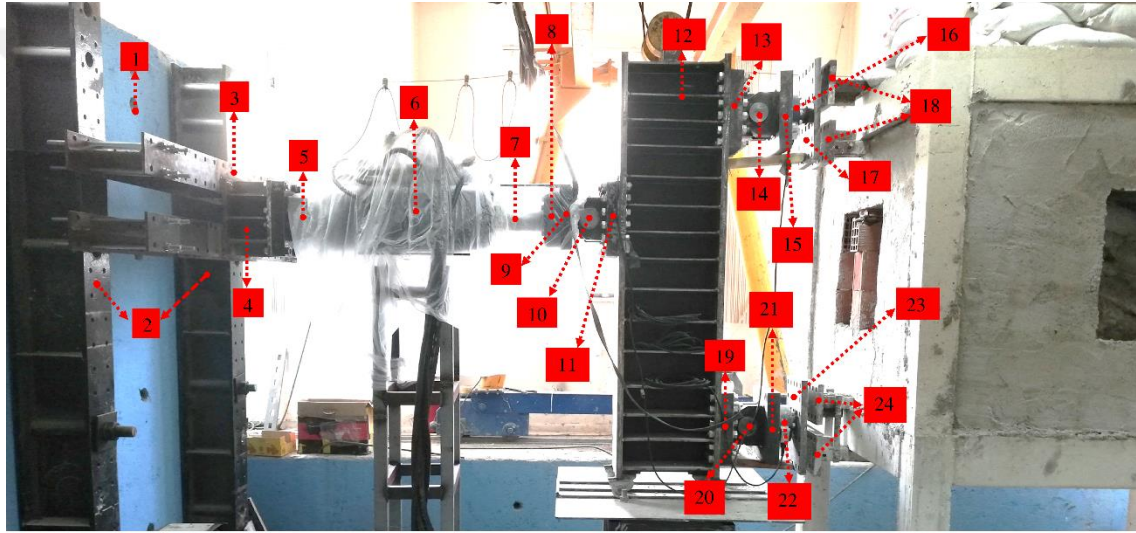


Şekil 3.34. GDE-3'e ait çelik çerçeve ve BEÇÇ detayları

3.1.3. Ölçüm ve yükleme sistemi

Deneyisel çalışmalar Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmıştır. Laboratuvarda bulunan yükleme duvarı ve güçlü döşeme, üç boyutlu deney düzeneğinin kurulmasına olanak sağlamıştır. Deneyisel çalışmalarda deney elemanları temel seviyesinde güçlü döşemeye Ø48 gijonlarla ankrjlanmış ve yükleme duvarı ile deney elemanları arasına sabitlenen 1000 kN'luk basma-çekme kapasitesine sahip hidrolik piston ile yatay yük uygulanmıştır. Söz konusu piston (Şekil 3.35'teki 6 numaralı eleman) yükleme duvarına iki adet çelik kolon (Şekil 3.35, 2 numaralı elemanlar) ve bir adet IPE-300 profili (Şekil 3.35'teki 3 numaralı eleman) yardımıyla bağlanmıştır. Pistona yük aktarılmasını önlemek amacıyla pistonun her iki ucunda birer adet mafsal (Şekil 3.35'teki 5 ve 10 numaralı elemanlar) ve diğer elemanlarla bağlantıyı sağlamak amacıyla mafsallara bağlı plakalar (Şekil 3.35'teki 4 ve 11 numaralı elemanlar) mevcuttur. Binaya gelen toplam yatay yükü ölçmek için pistonun ucunda 100 ton kapasiteli bir adet yük hücresi (Şekil 3.35'teki 8 numaralı eleman) bulunmaktadır. Piston deney elemanına bağlanırken ilkin

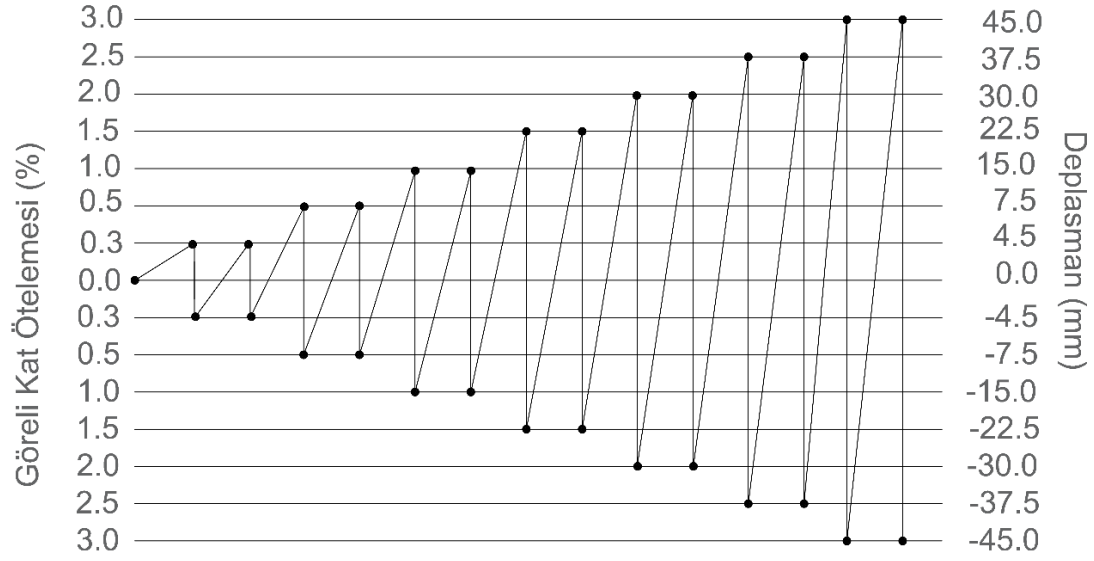
ara eleman olarak tasarlanan I-500 profiline (Şekil 3.35'teki 12 numaralı eleman) bağlanmıştır. Bu ara eleman da betonarme yapıya her bir kat seviyesinde ara plakalar yardımıyla bağlanmıştır (Şekil 3.35'teki 13 ve 19 numaralı elemanlar). Piston ara elemana orta noktadan değil yatay yük dağılımını yapabilmek için üst kata daha yakın mesafeden bağlanmıştır (Şekil 3.7, 3.35). Bu sayede kat kütlesi ve yüksekliği ile orantılı olarak yatay yükün uygulanması mümkün hale gelmiştir. Katlara uygulanan yükü ölçebilmek adına her bir kat seviyesine yük hücresi (Şekil 3.35'teki 16 ve 22 numaralı elemanlar) bağlanmıştır. Birinci kat seviyesine 20 ton, ikinci kat seviyesine 50 ton kapasiteye sahip yük hücreleri bağlanmıştır. Yük hücreleri ile I-500 profili arasına mafsallar (Şekil 3.35'teki 14 ve 20 numaralı elemanlar) yerleştirilmiştir. Yük hücreleri ara plakalar (Şekil 3.35'teki 17 ve 23 numaralı elemanlar) yardımıyla daha önce döşeme alt ve üst kotlarına yerleştirilen NPU-140 profillerinin ucuna kaynatılmış plakalara (Şekil 3.35'teki 18 ve 24 numaralı elemanlar) bağlanarak deney elemanına yatay yük uygulanacak hale getirilmiştir.



- | | | |
|-------------------|-------------------|---------------------------|
| 1. Yükleme Duvarı | 9. Plaka-2 | 17. Plaka-6 |
| 2. Çelik Kolonlar | 10. Mafsal-2 | 18. NPU140 Kafa Plakaları |
| 3. IPE300 | 11. Plaka-3 | 19. Plaka-7 |
| 4. Plaka-1 | 12. I500 | 20. Mafsal-4 |
| 5. Mafsal-1 | 13. Plaka-4 | 21. Plaka-8 |
| 6. Piston | 14. Mafsal-3 | 22. Yük Hücresi-3 |
| 7. Piston Stroku | 15. Plaka-5 | 23. Plaka-9 |
| 8. Yük Hücresi-1 | 16. Yük Hücresi-2 | 24. NPU140 Kafa Plakaları |

Şekil 3.35. Yükleme sistemi

Yükleme protokolü Şekil 3.36'da görülmektedir. Yatay yükleme GKÖÖ'ya göre belirlenmiş olup birinci katta meydana gelen deplasman verilerine göre yükleme yapılmıştır. İkinci kat GKÖÖ'nun daha düşük olacağı tahmini ile birinci kat dikkate alınmıştır. Deneylerde ölçümler biri 19 kanallı, diğeri 24 kanallı olmak üzere 2 adet veri toplama sistemi ile alınmıştır (Şekil 37).



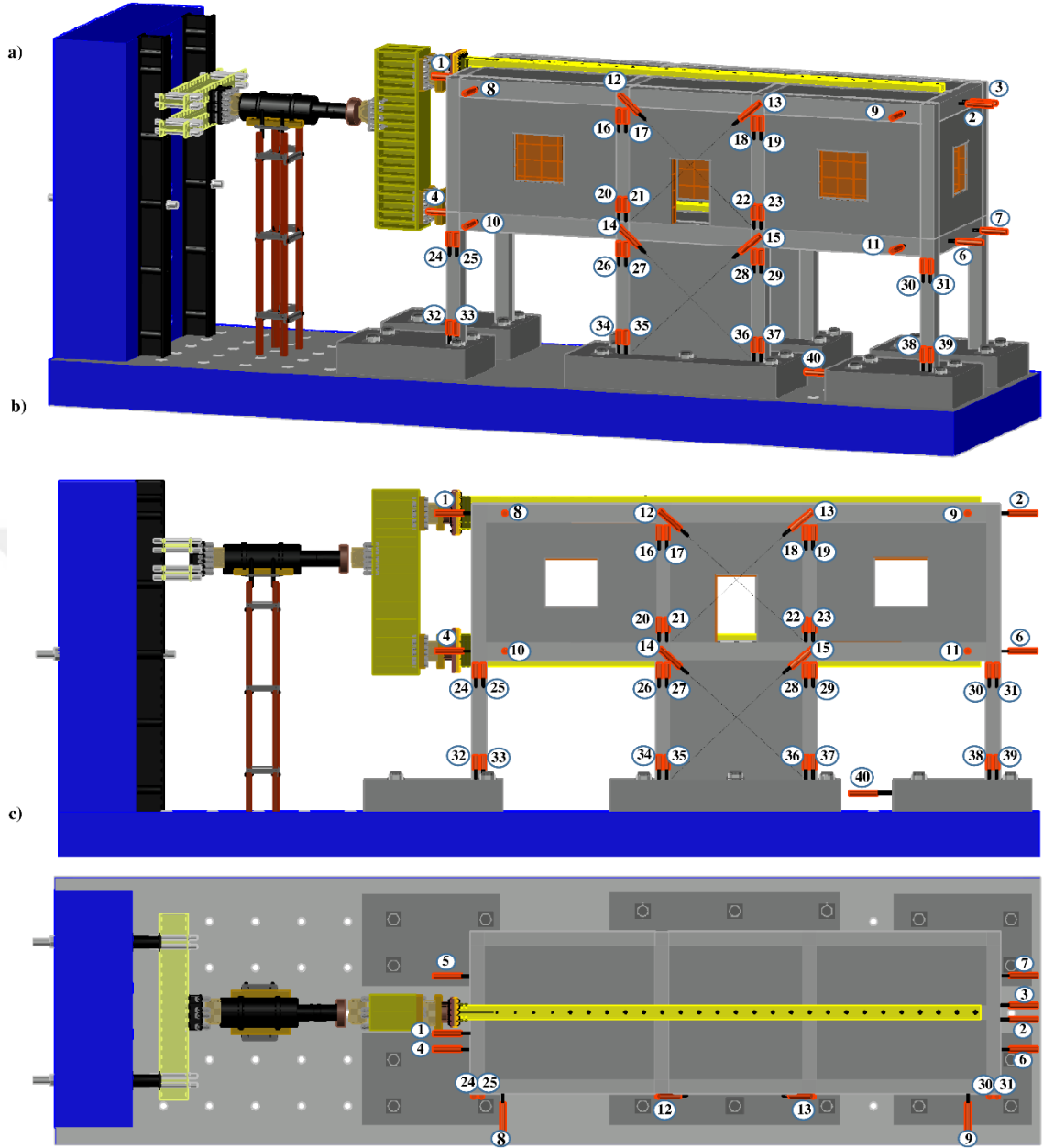
Şekil 3.36. Yük protokolü



Şekil 3.37. Veri toplama sistemleri

3.1.3.1. RDE için ölçüm sistemi

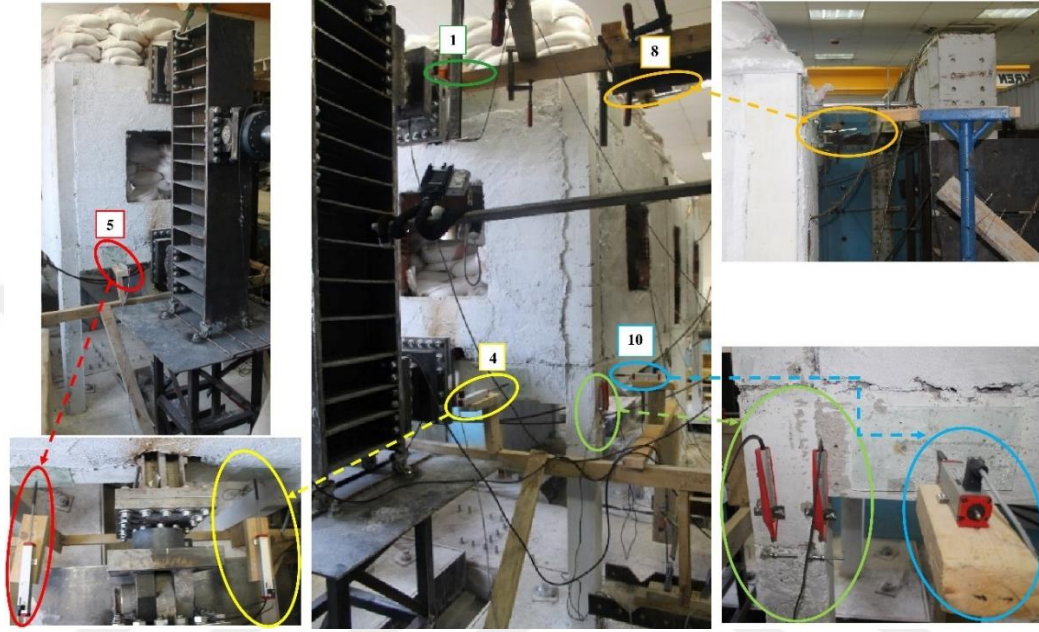
Yapının imalatı ve yükleme sisteminin kurulumu tamamlandıktan sonra deney aşamasına geçilmiştir. İlk olarak ölçüm cihazları binaya yerleştirilmiştir. Üç boyutlu deney elemanının simetrik olması sebebiyle yatay yüke paralel yöndeki yani düzlem içinden sadece bir adet betonarme çerçeveden ölçüm alınmıştır.



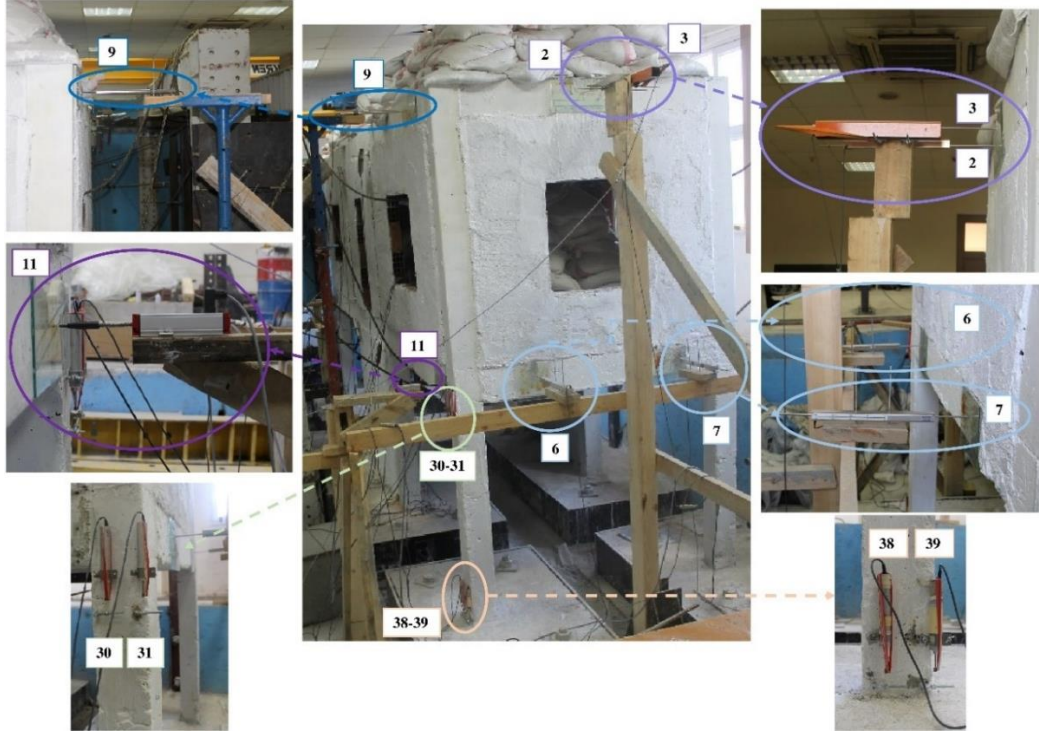
Şekil 3.38. RDE için deplasman ölçerlerin yerleşimi **a)** üç boyutlu görünüm; **b)** ön görünüş; **c)** plan görünüş

Deplasman ölçerlerin konumları Şekil 3.38’de fotoğrafları ise Şekil 3.39, 3.40, 3.41’de gösterilmektedir. Tepe deplasmanı ölçmek için piston tarafında bir adet, diğer tarafta iki adet deplasman ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.38, 3.39, 3.40 (1-2-3)). Birinci kat yatay deplasmanları ölçmek içinse binanın piston tarafı ve karşı tarafına ikişer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.38, 3.39, 3.40 (4-5-6-7)). Birinci kattaki kolonların potansiyel plastik mafsallık bölgelerinde deplasman ölçerler, beton içerisine belirli mesafelerde bırakılan somunlar yardımıyla yerlerine yerleştirilmiş ve ölçüm alınacak mesafedeki diğer somunlar çelik tellerle bağlanmıştır (Şekil 3.38, 3.39, 3.40 (24-39 arası deplasman ölçerler)). İkinci kattaki orta açıklıktaki kolonların potansiyel plastik mafsallık bölgelerine deplasman ölçerler birinci kattakilere benzer şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.38 (16-23 arası deplasman ölçerler)). Bu sayede, kolonların

potansiyel plastik mafsallardaki eğrilik miktarlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Binanın düzlem dışı hareketini kontrol etmek amacıyla her bir kat seviyesinde düzlem dışı hareket yönünde deplasman ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.38, 3.39, 3.40 (8-9-10-11)). Binanın orta açıklığında bulunan iki adet duvarın yüzünde diyagonal yönde deformasyon ölçümleri alınmıştır (Şekil 3.38, 3.41 (12-13-14-15)). Ayrıca orta açıklıktaki temel hareketini gözlemlemek amacıyla bir adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.38, 3.41 (40)).



Şekil 3.39. RDE'ye ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (1'inci kısım)



Şekil 3.40. RDE'ye ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (2'nci kısım)

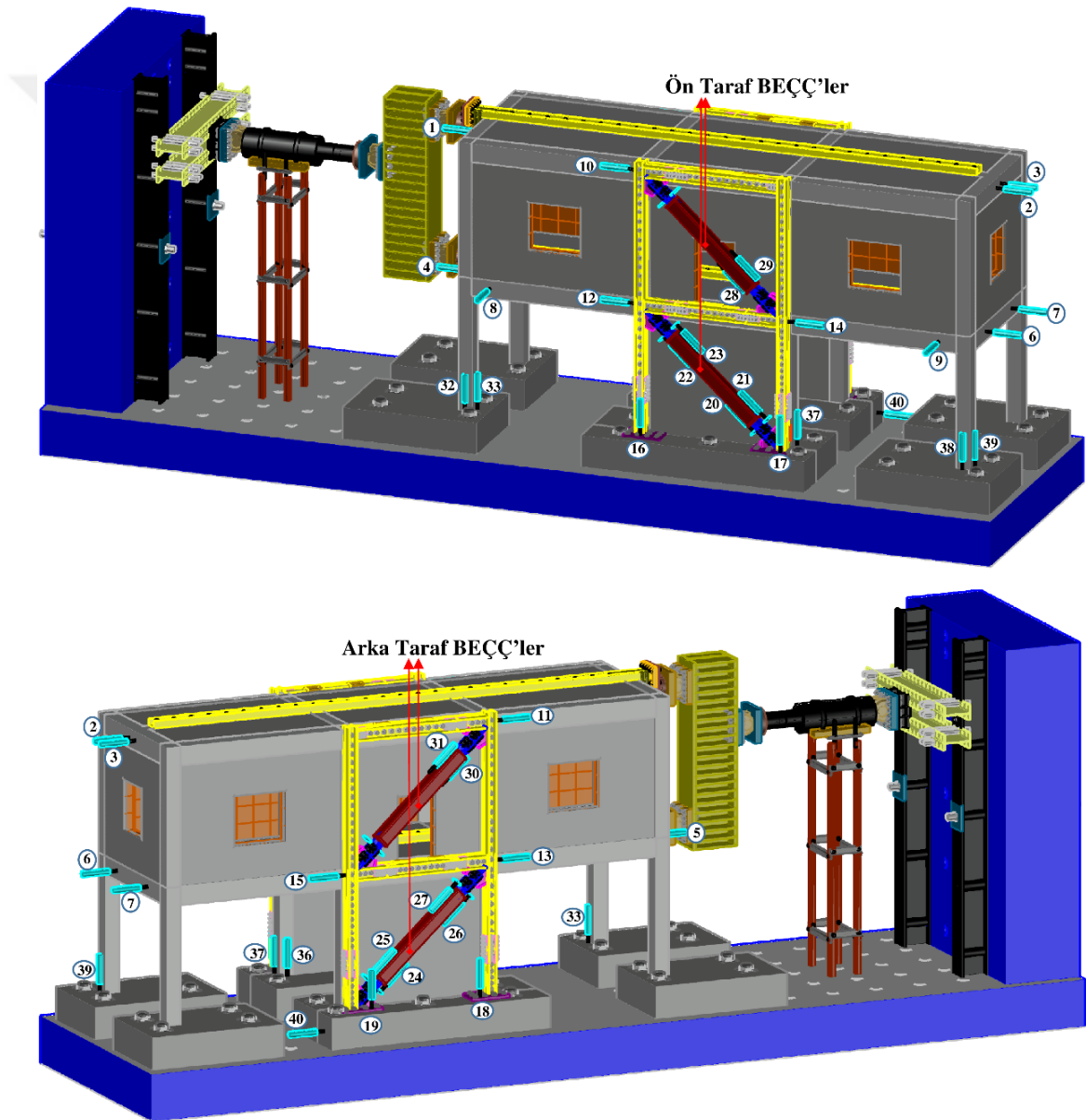


Şekil 3.41. RDE'ye ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (3'üncü kısım)

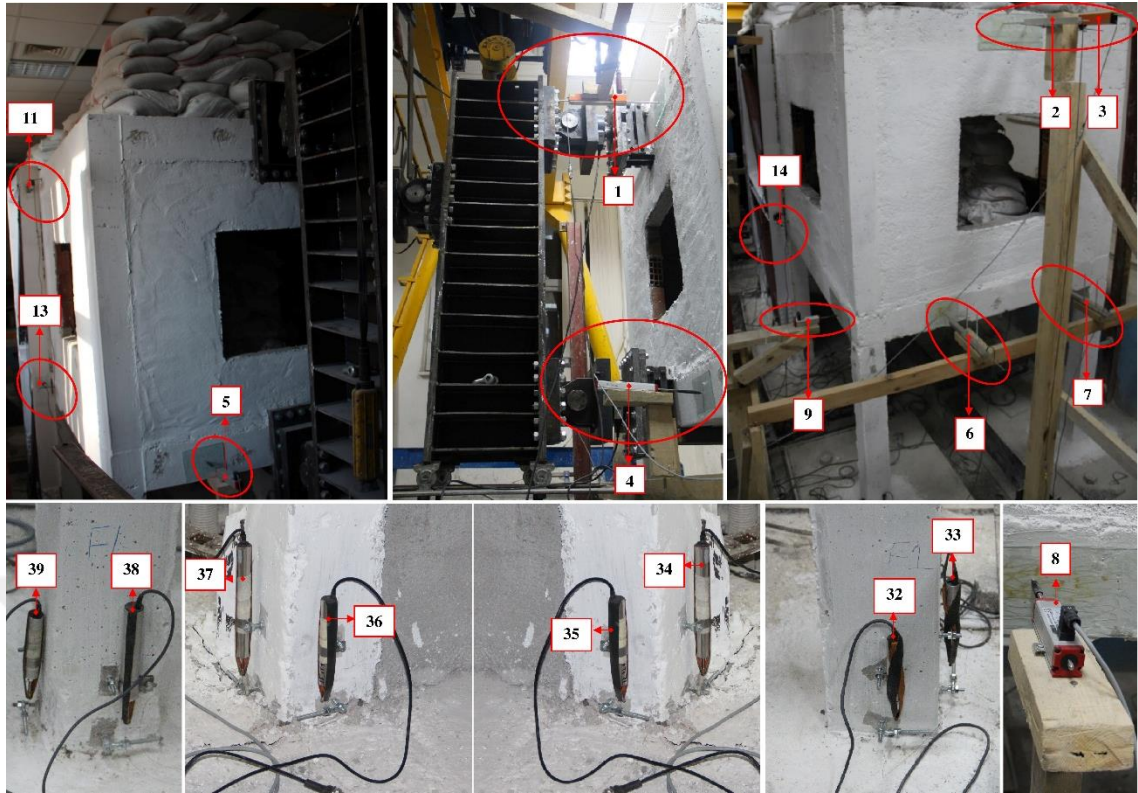
3.1.3.2. GDE-1 için ölçüm sistemi

GDE-1 için deplasman ölçerlerin yerleşimi RDE'ninkinden farklılık göstermektedir. Tepe deplasmanı ölçmek için piston tarafında bir adet (Şekil 3.42, 3.43, (1)), diğer tarafta iki adet (Şekil 3.42, 3.43 (2,3)) deplasman ölçer kullanılmıştır. Birinci kat yatay deplasmanları ölçmek için binanın piston tarafı ve karşı tarafına ikişer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.42, 3.43 (4-5-6-7)). Bina'nın düzlem dışı hareketini kontrol etmek amacıyla sadece birinci kat seviyesinde düzlem dışı hareket yönünde deplasman ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.42, 3.43 (8-9)). Bina'nın orta

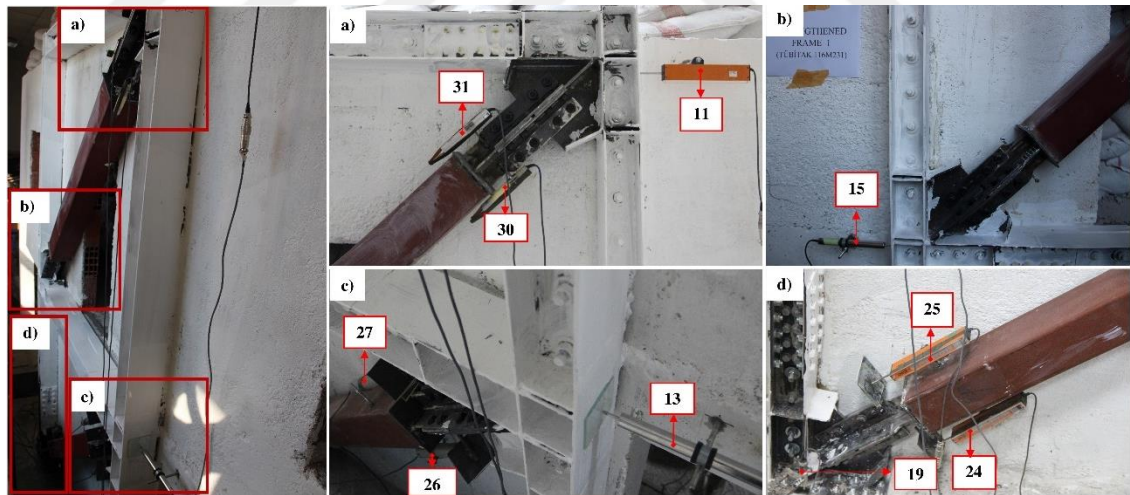
açıklığında bulunan BEÇÇ elemanlarından ölçüm almak için binanın ön ve arka taraftaki BEÇÇ elemanlarına birinci katta dörder adet ikinci katta ikişer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.42, 3.44, 3.45 (20-31)). Ayrıca orta açıklıktaki temel hareketini gözlemlemek amacıyla bir adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.42 (40)). Çelik çerçevelerin betonarme yapıdan görel hareketini ölçmek amacıyla betonarme bina ve çelik çerçeve arasına birinci kat seviyesinde ikişer adet, ikinci kat seviyesinde birer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.42, 3.44, 3.45 (10-15)). Çelik çerçeve mesnetlerinin her birine düşey yönde hareketin belirlenmesi için birer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.42, 3.44, 3.45 (16-19)). Ayrıca kolonların potansiyel plastik mafsallık bölgelerinde sadece birinci kat kolonlarının diplerinden ölçüm alınmıştır (Şekil 3.42, 3.43 (32-39 arası deplasman ölçerler)).



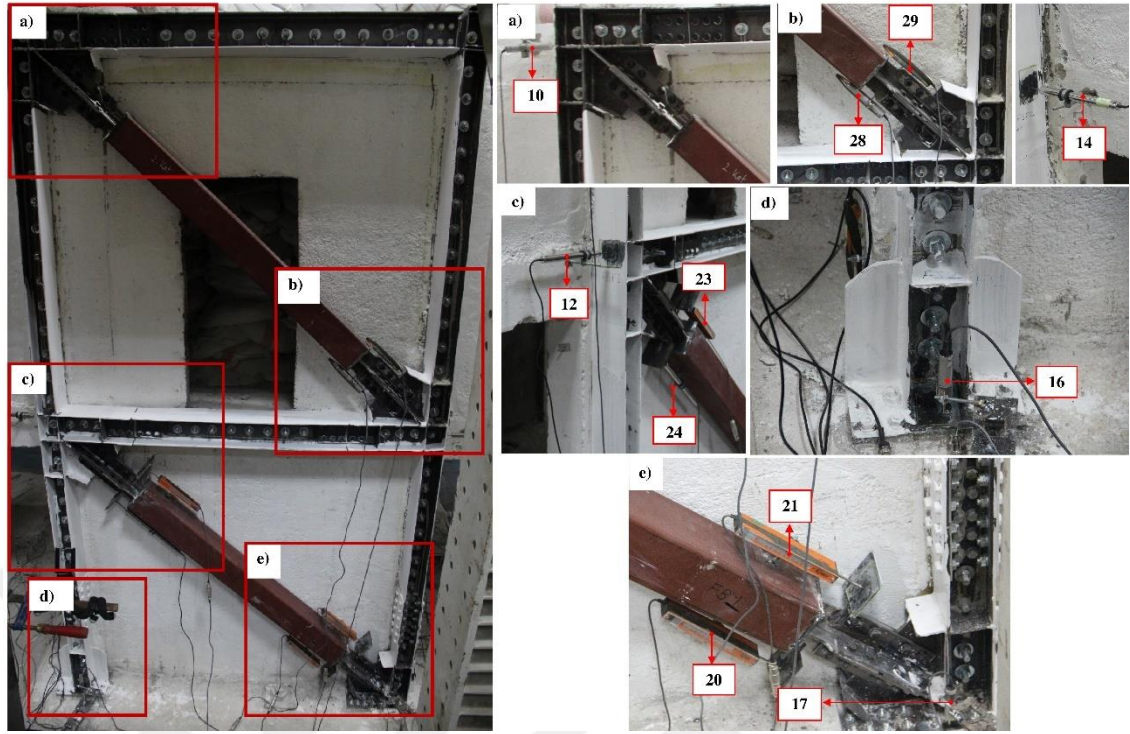
Şekil 3.42. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının yerleşimleri



Şekil 3.43. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (1'inci kısım)



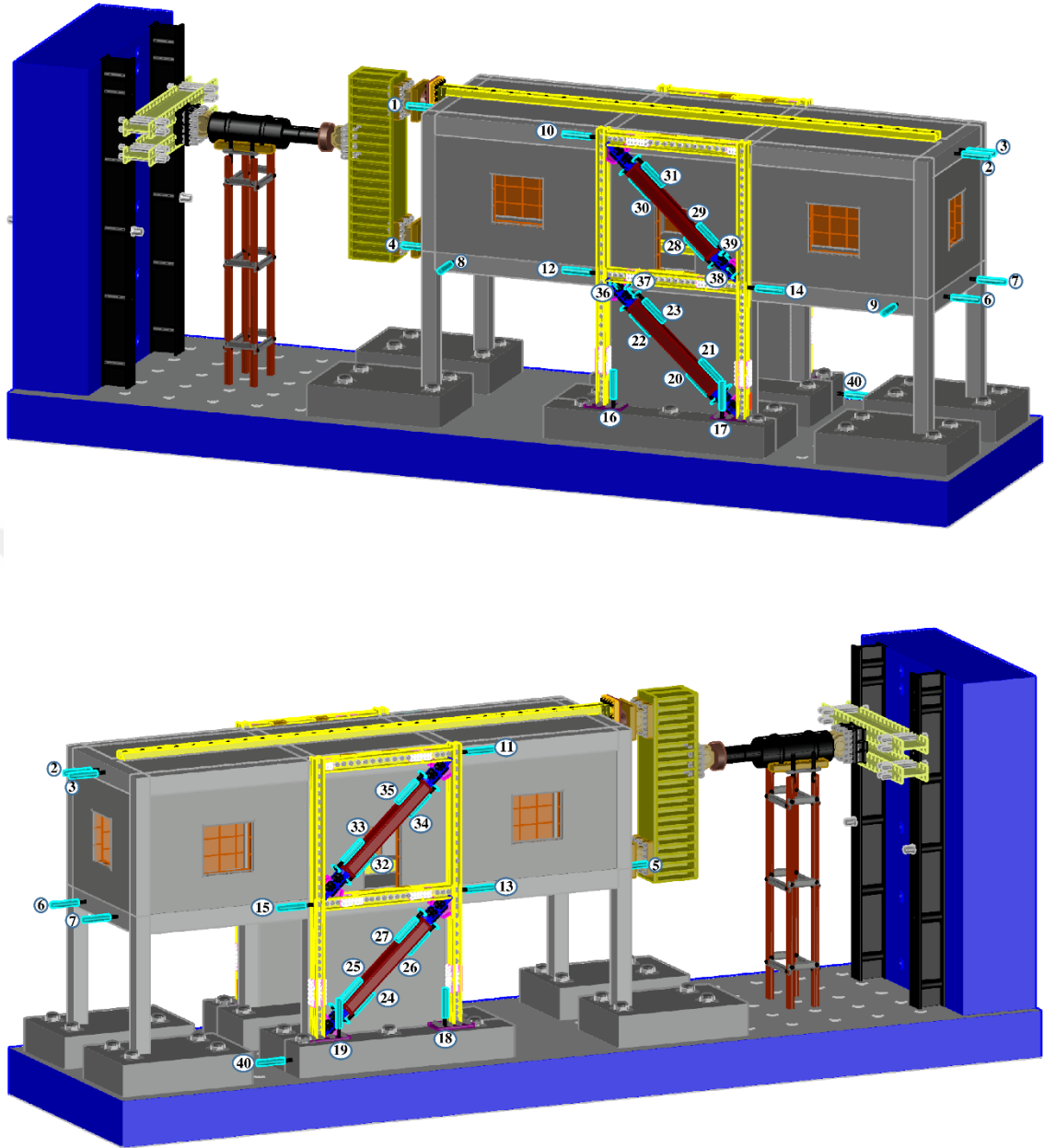
Şekil 3.44. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (2'nci kısım)



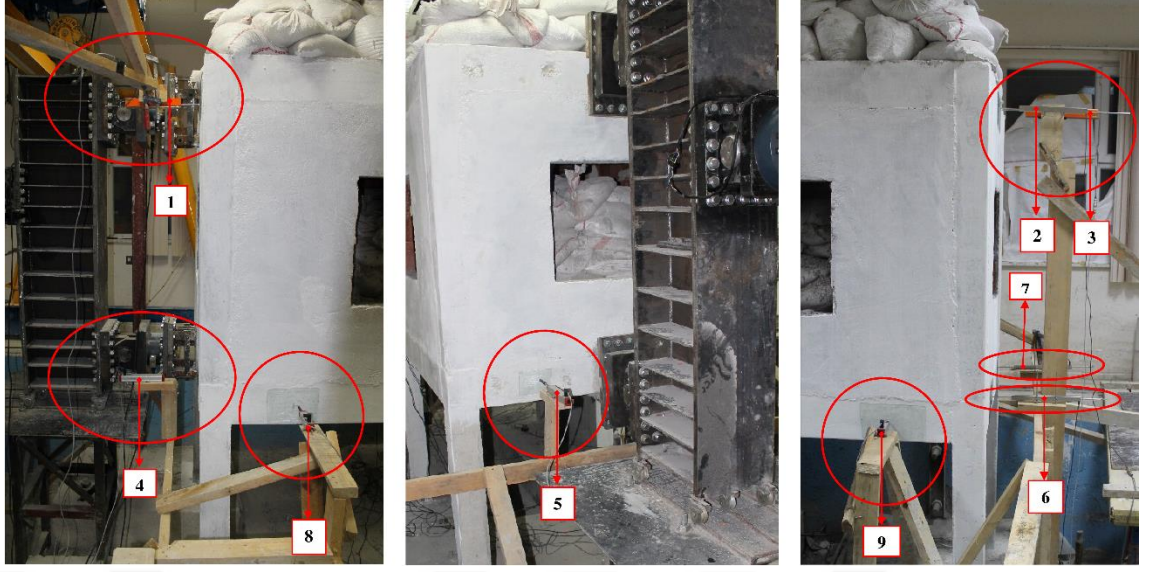
Şekil 3.45. GDE-1'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (3'üncü kısım)

3.1.3.3. GDE-2 ve GDE-3 için ölçüm sistemi

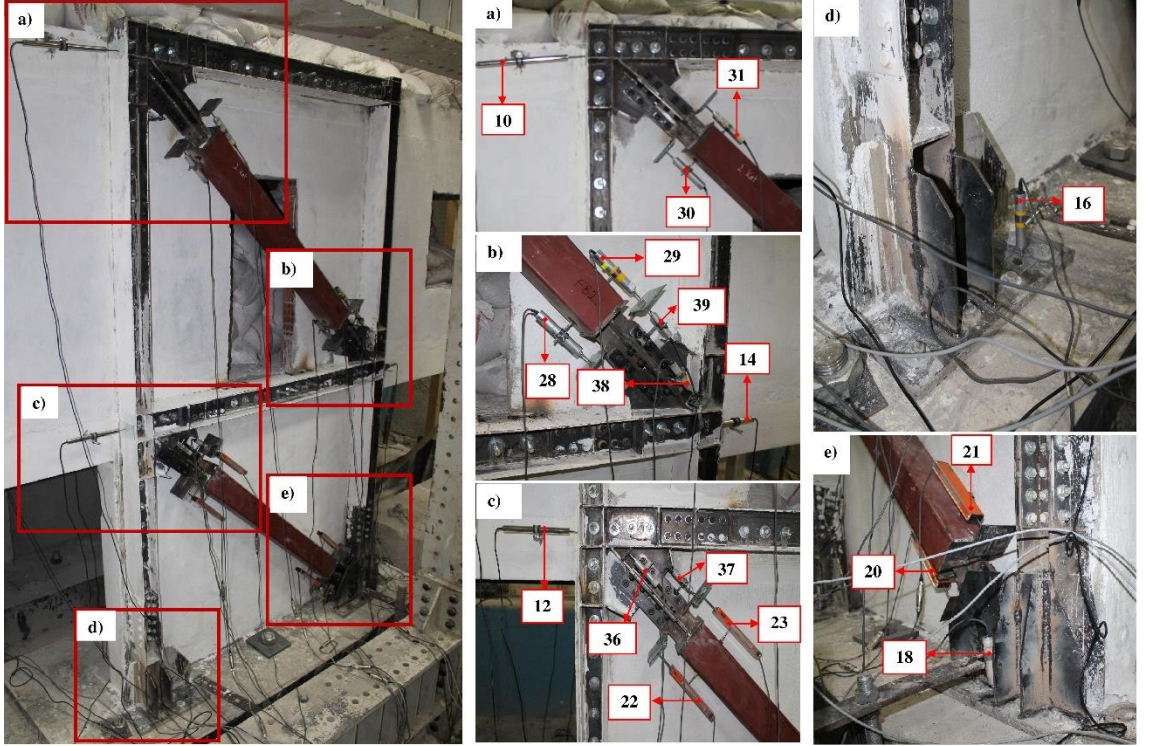
GDE-2 ve GDE-3 için deplasman ölçerlerin yerleşimi GDE-1'inkinden farklılık göstermektedir. Tepe deplasmanı ölçmek için piston tarafında bir adet (Şekil 3.46, 3.47, (1)), diğer tarafta iki adet (Şekil 3.46, 3.47 (2,3)) deplasman ölçer kullanılmıştır. Birinci kat yatay deplasmanları ölçmek için binanın piston tarafı ve karşı tarafına ikişer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.46, 3.47 (4-5-6-7)). Binanın düzlem dışı hareketini kontrol etmek amacıyla sadece birinci kat seviyesinde düzlem dışı hareket yönünde deplasman ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.46, 3.47 (8-9)). Binanın orta açıklığında bulunan BEÇÇ elemanlarından ölçüm almak için binanın ön ve arka taraftaki BEÇÇ elemanlarına dörder adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.46, 3.48, 3.49 (20-35)). Ayrıca orta açıklıktaki temel hareketini gözlemlemek amacıyla bir adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.46 (40)). Çelik çerçevelerin betonarme yapıdan görel hareketini ölçmek amacıyla betonarme bina ve çelik çerçeve arasına birinci kat seviyesinde ikişer adet, ikinci kat seviyesinde birer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.46, 3.48, 3.49 (10-15)). Çelik çerçeve mesnetlerinin her birine düşey yönde hareketin belirlenmesi için birer adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.46, 3.48, 3.49 (16-19)). Ayrıca BEÇÇ-bayrak levhası arasındaki kayma miktarları da deney esnasında ölçülmüştür (Şekil 3.46, 3.48 (36-39)).



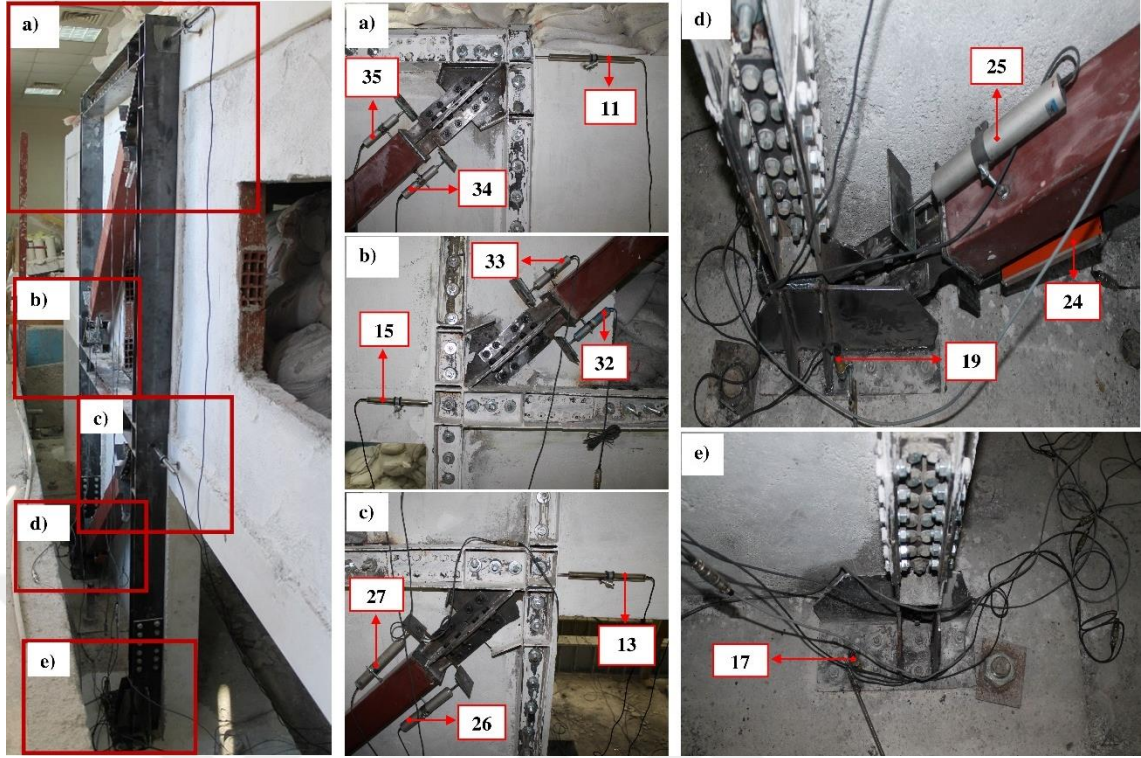
Şekil 3.46. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının yerleşimleri



Şekil 3.47. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (1'inci kısım)



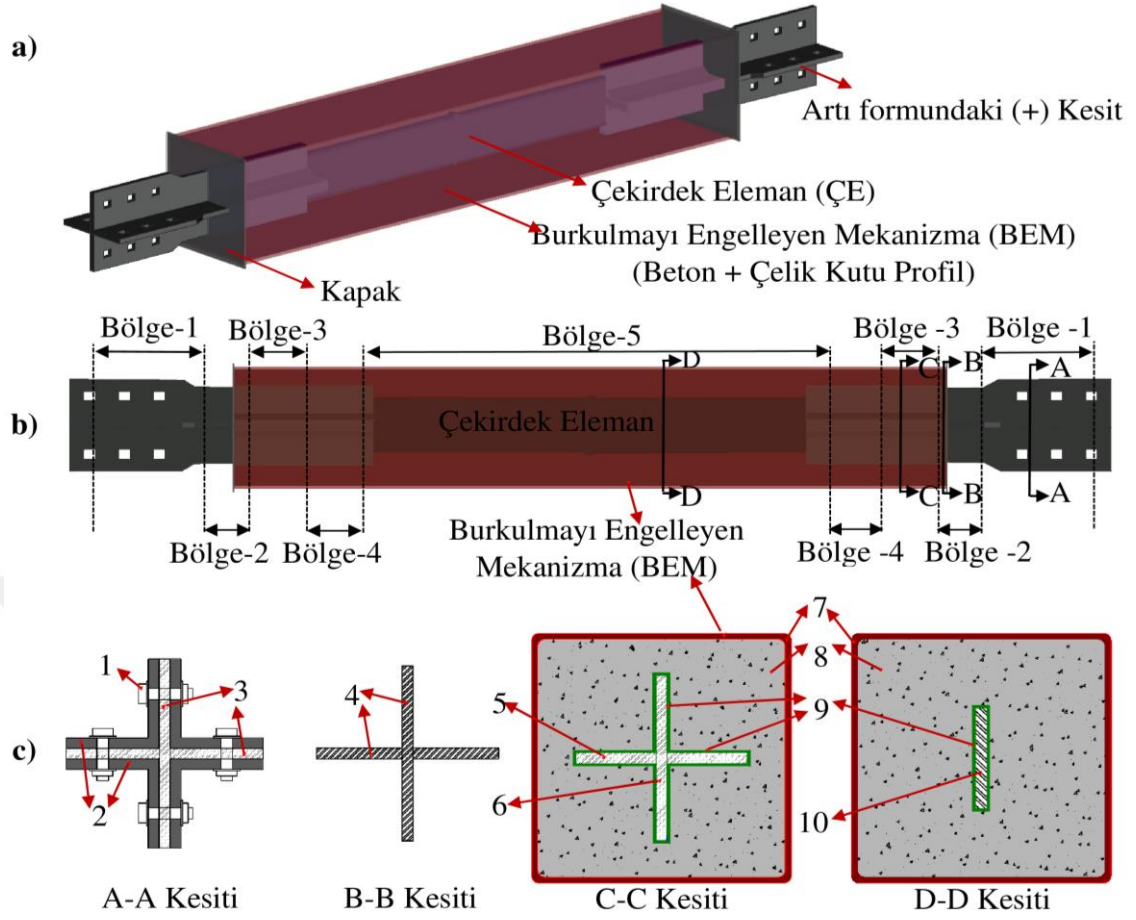
Şekil 3.48. GDE-2 ve GDE-3'e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (2'nci kısım)



Şekil 3.49. GDE-2 ve GDE-3’e ait ölçüm cihazlarının fotoğrafları (3’üncü kısım)

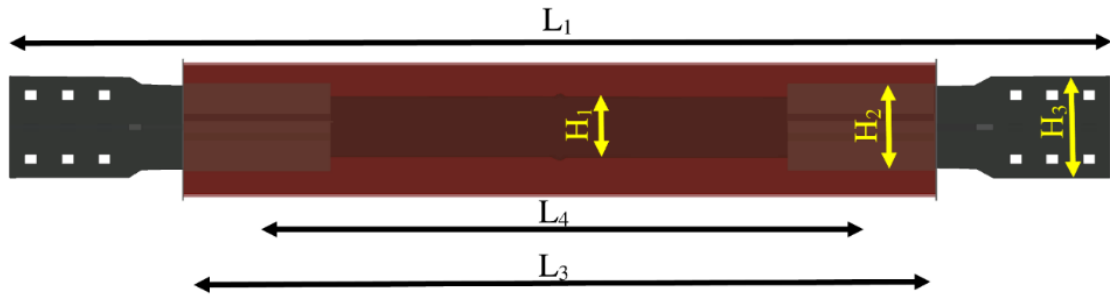
3.1.4. BEÇÇ ve BEÇÇli çelik çerçeve sisteminin detayları

Bu çalışmada kullanılan BEÇÇ modeli Özçelik (Özçelik 2016a)’nın çalışmasındaki BEÇÇ modellerinden biridir. Çelik çerçeveye bağlanacak olan BEÇÇ’lerde burkulması engellenmemiş elastik kısım (Şekil 3.50b, 1. ve 2. Bölge), burkulması engellenmiş elastik kısım (Şekil 3.50b, 3. ve 4. Bölge) ve burkulması engellenmiş plastik kısım (Şekil 3.50b, 5. Bölge), olmak üzere üç tip bölge bulunmaktadır. Burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) için 120x120x3 mm ebatlarında kare kutu profil ve C20 beton kullanılmıştır (Çizelge 3.2). Uç stabilitesi 150 mm uzunluğunda ek çelik levhalarla tasarlanmış bir sistem kullanılmıştır. BEÇÇ modellerinde ÇE ve BEM arasındaki boşluk 2 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. BEÇÇ eleman detayları Şekil 3.51 ve Çizelge 3.4’te görülmektedir. Benzer eleman detayının oldukça karalı histeretik davranış gösterdiği Özçelik vd. (2017) ve Özçelik ve Erdil (2019)’da görülebilir.



1= Bağlantı bulonu, 2= Ek plakalar, 3 ve 4= Artı (+) şeklindeki kesit, 5= Bağlantı plakası, 6= Çekirdek eleman (burkulması engellenmiş elastik), 7= Çelik kutu profil, 8= Beton (7 ve 8 BEM), 9= İzolasyon malzemesi, 10= Çekirdek eleman (burkulması engellenmiş plastik).

Şekil 3.50. BEÇÇ elemanı detay çizimleri



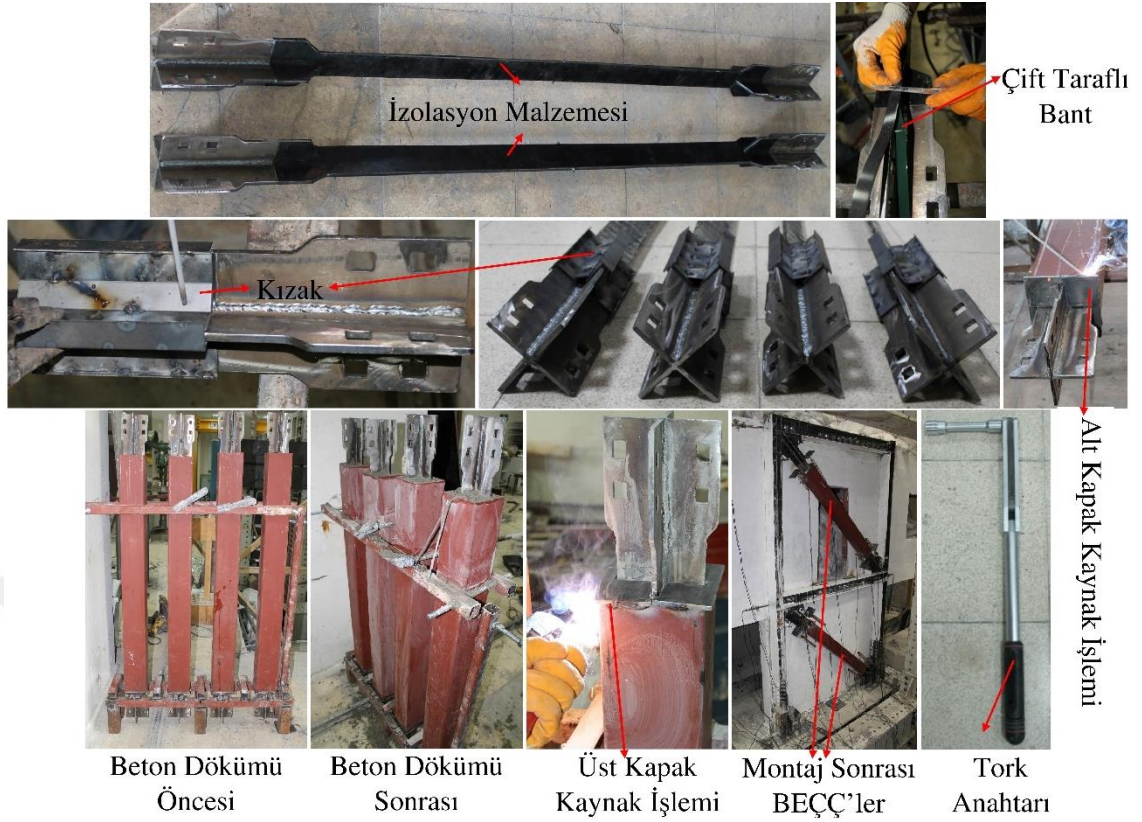
Şekil 3.51. BEÇÇ eleman detayları

Çizelge 3.4. BEÇÇ eleman detayları

BRB Konumu	ÇE Alanı (mm ²)			t _{çe}	h ₁	h ₂	h ₃	L ₁	L ₂	L ₃
	AA Kesiti	BB Kesiti	CC Kesiti	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1'inci Kat	762	600	420	6	70	100	127	1632	1256	1071
2'nci Kat	762	600	300	6	50	100	127	1615	1248	1055

BEÇÇ elemanlarının hazırlanmasına elastik kısımla başlanmıştır. Bunun için iki adet plaka ÇE'ye dik olarak kaynatılmıştır (Şekil 3.52). İzolasyon malzemesi ÇE'nin BEM içerisinde kalan Şekil 3.50'deki 3. ve 4. bölgeleri boyunca ana elemana, uç kısımların yanal yüzeylerine yapıştırılmıştır. Yapıştırıcının kurumması için gereken süre kadar bekletildikten sonra fazla kısımları kesilerek yan yüzeylere çift taraflı bant uygulaması yapılmış ve izolabant ile kaplanarak BEM içine konurken herhangi bir zarar görmesi engellenmiştir (Şekil 3.52). Şekil 3.50'de görülen 2. ve 3. bölgede oluşturulacak olan çelik plakaların her biri 3 adet levhanın kaynaklı birleşimi ile oluşturulmuştur (Şekil 3.52). Bu levhaların ebatları 150x37x2 mm ve 150x22x2 mm'dir. Bu sistemin içerisine beton girmemesi için ek plakalar sisteme kaynatılmıştır. Çelik plakaların ÇE üzerindeki ve BEM olan 120x120x3 mm kare kutu profilin içine yerleştirilmiş hali Şekil 3.52'de görülmektedir. 120x120x3 mm kare kutu profilin bir ucuna beton dökümünden önce diğer ucuna beton dökümünden sonra 5 mm kalınlığında tasarlanan kapaklar kaynatılmıştır (Şekil 3.52). BEÇÇ'lerin beton dökümü için hazırlanan sistem üzerinde dikey hale getirilen BEÇÇ elemanlarına beton dökümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.52). Beton dökümünden sonra diğer kapak plakası 120x120x3 mm'lik kutu profile kaynatılmıştır (Şekil 3.52). Bu işlemin ardından BEÇÇ elemanları çelik çerçevelere montaj edilmeye hazır hale gelmiştir (Şekil 3.52). İmalat süreci tamamlanan BEÇÇ'ler gerekli ölçüm aparatları takılarak deney düzeneğine montajı yapılmıştır (Şekil 3.52). Bağlantıda kullanılan 10.9 kalitesindeki M12 bulonlar tork anahtarıyla 125 N.m kuvvet uygulanarak sıkılmıştır (Şekil 3.52).

GDE-1 ve GDE-2'de BEÇÇ-çelik çerçeve arasındaki bağlantı sürtünme etkili birleşim olarak tasarlanmış olup BEÇÇ ve bayrak levhası arasında standart dairesel delik yerine oval delik (slot) kullanılmıştır (Şekil 3.25c, 8.8). Bu sayede BEÇÇ'nin çelik çerçeveye montajı oldukça pratik olmuştur. GDE-2'nin test edilmesi esnasında slot deliklerden dolayı meydana gelen kaymaları (EK-8.3, Şekil 8.32) önlemek amacıyla GDE-3'te BEÇÇ ve çelik çerçeve arasındaki bağlantıda oval delik (slot) yerine standart dairesel delik kullanılmıştır (Şekil 3.26b, 8.9).



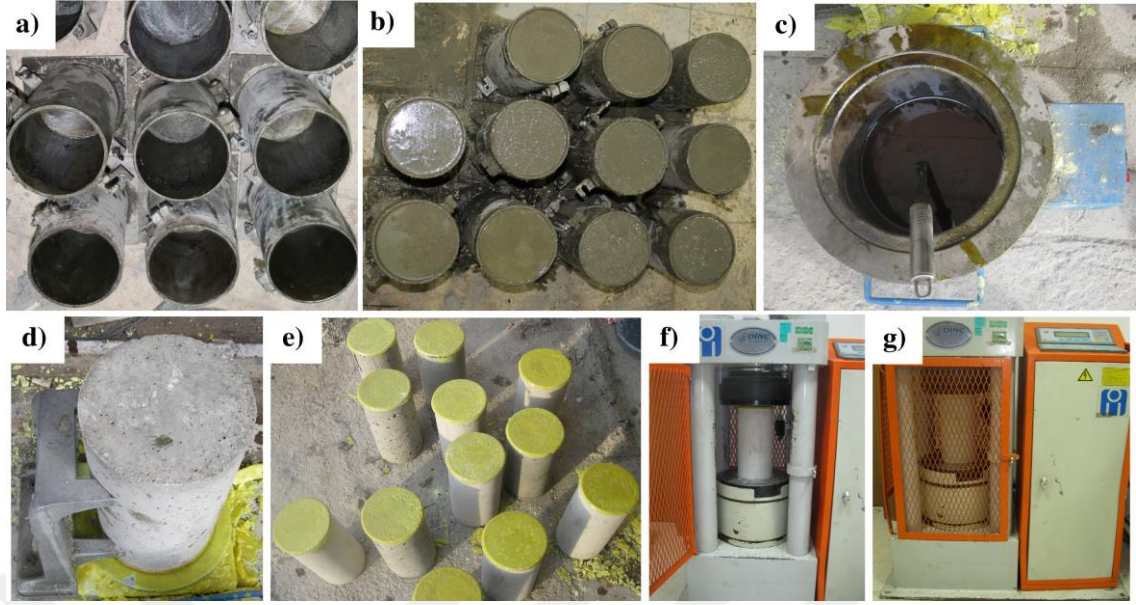
Şekil 3.52. BEÇÇ elemanlarının üretim ve montaj işlemleri

3.1.5. Malzeme Özellikleri

Deneyisel çalışma kapsamında test edilen yapıların aynı olmasına özen gösterilmiştir. Beton dayanımının bütün deney elemanları için aynı değerde olması hedeflenmiştir. Kullanılan boyuna donatılar bütün elemanlar için aynı seriden kullanılmıştır.

3.1.5.1. Beton malzeme özelliklerinin tayin edilmesi

Beton dayanımının düşük olmasından dolayı karışım oranında meydana gelen en küçük değişim beton dayanımını etkilemektedir. Bu sebeple her kat beton dökümünde yeterli sayıda beton numunesi alınmış ve yapıların beton dayanımları sürekli kontrol edilmiştir (Şekil 3.53). Bu sayede 8 MPa hedef beton dayanımı için kür uygulamasının yapıp yapılmayacağına karar verilmiştir. Hedeflenen beton dayanımı için karışım oranı Çizelge 3.1’de verilmiştir.

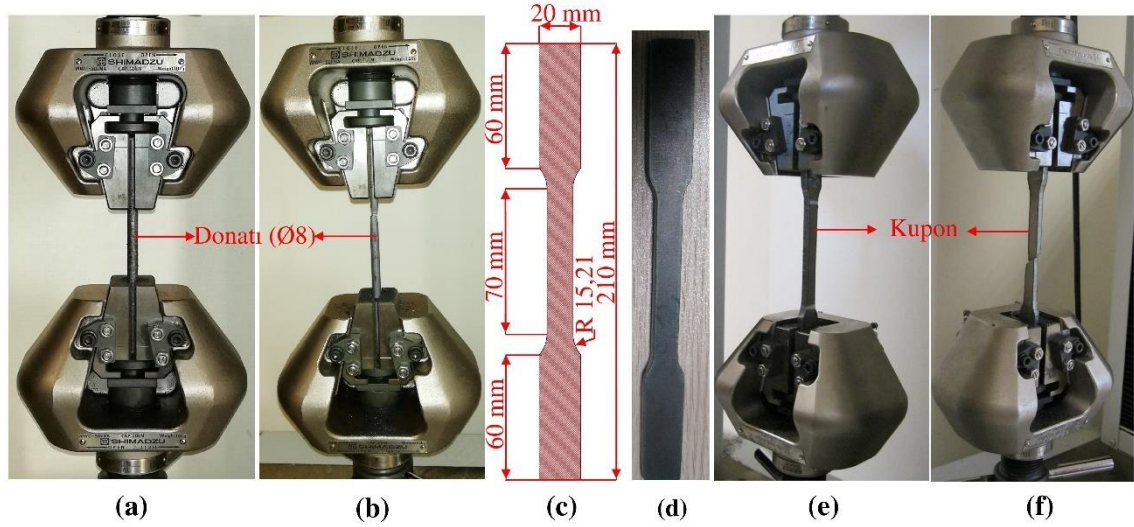


Şekil 3.53. Betonun silindir kalıplara yerleşimi ve test edilmesi **a)** kalıpların yağlanması; **b)** betonun kalıplara yerleşimi; **c)** kükürt başlıkların hazırlanması; **d); e)** numunelere kükürt başlığı yapımı; **f); g)** numunenin test cihazına yerleşimi ve test edilmesi

Beton dökümü sırasında numune alınırken daha önce hazırlanmış ve iç kısımları yağlanmış olan Türk standardına (TS EN 12390-1 2013) uygun silindir kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.53a, b). Numuneler test edilmeden önce silindir kalıplardan çıkarılmış ve numunelere eriyik haline getirilmiş kükürt ile başlık yapılmıştır (Şekil 3.53c, d, e). Sonrasında deney elemanından alınan silindir numuneleri, pres makinesi ile kırılmış ve basınç kapasiteleri elde edilmiştir (Şekil 3.53f, g). Bu şekilde her bir deneye ait numunelerden elde edilen beton basınç kapasite değerleri EK-7’de verilmiştir.

3.1.5.2. Çelik malzeme özelliklerinin tayin edilmesi

Türkiye’deki yapı stokundaki betonarme yapıları temsil etmeleri açısından betonarme deney elemanlarının inşasında düz donatı kullanılmıştır. Donatı çeliğinin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri ile akma ve kopma gerilmesi değerlerini belirlemek için donatılardan alınan numuneler Türk Standardına (TS 708 2016) uygun olarak çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.54). Akdeniz Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında 50 kN kapasiteli çelik çekme cihazında test edilen donatı çubuklarına (Şekil 3.54a, b) ait akma ve kopma dayanım değerleri EK-7’de ait olduğu deney elemanı ile ilgili çizelgelerde verilmiştir.

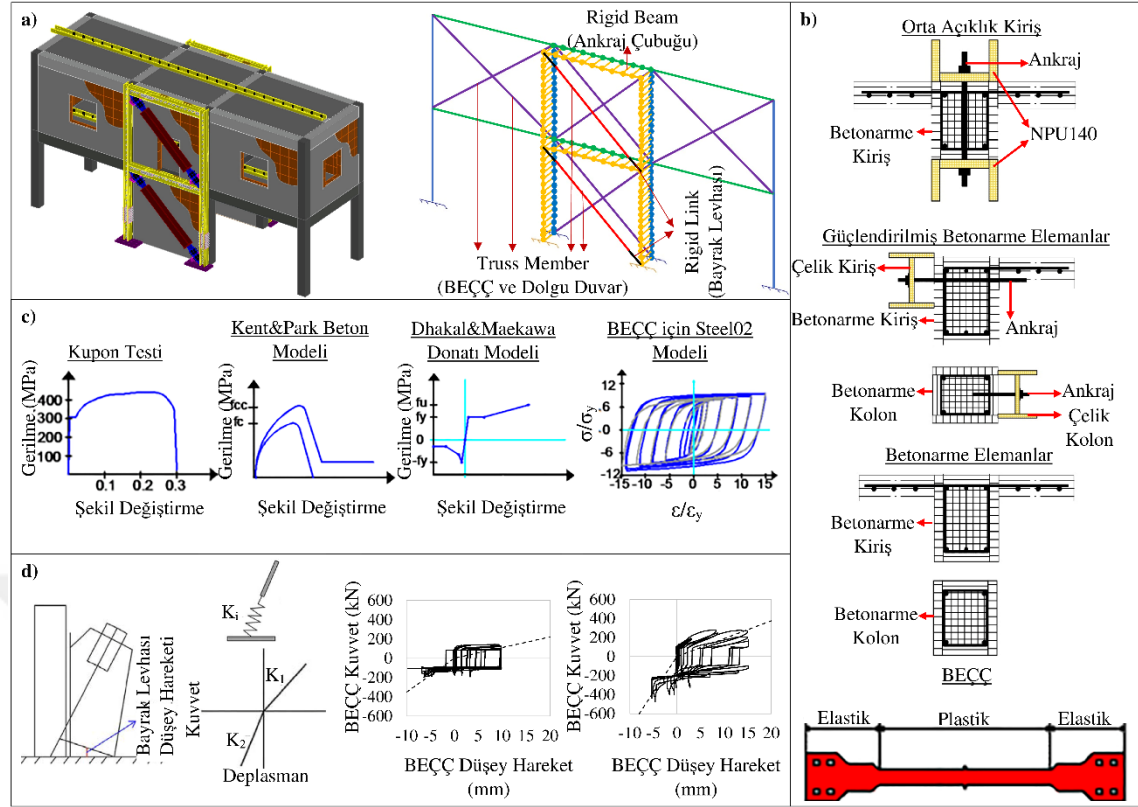


Şekil 3.54. Çelik numunelerin test edilmesi **a)** donatı numunesinin çekme cihazına yerleşimi; **b)** kopma sonrası donatı numunesi; **c)** Amerikan standardına göre kupon ölçüleri **e)** çelik malzemeden kesilmiş kupon örneği; **e); f)** test önce ve sonrası kupon numunesi

Betonarme elemanın güçlendirilmesinde kullanılan çelik çerçeve ve BEÇÇ'lerin üretiminde kullanılan çelik malzemelerinden Amerikan Standardına (ASTM-E8/E8M 2007) uygun olarak kesilen kupon numuneleri (Şekil 3.54c, d) de benzer şekilde çelik çekme cihazında test edilmiş (Şekil 3.54.e, f) ve elde edilen akma ve kopma değerleri EK-7'de ilgili çizelgelerde verilmiştir. Ayrıca çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri EK-7.5'teki Şekil 8.23'te gösterilmiştir.

3.2. Analitik Çalışmalar

Deney elemanlarının OPENSEES simülasyon platformu (Mazzoni vd. 2007) kullanılarak modellendikten sonra ters çevrimli statik ve itme analizleri yapılmıştır. Şekil 3.55, deney elemanlarının analizleri için kullanılan modelleme stratejisini ve malzeme modellerini özetlemektedir. Kirişleri ve kolonları modellemek için yer değiştirmeye dayalı fiber elemanlar (displacement beam column) kullanılmıştır. Hem kolon hem de kirişler için entegrasyon noktası sayısı (number of integration point) 5 olarak seçilmiştir. Beton malzeme modeli için (Concrete01 modeli) Karsan ve Jirsa (1969) tarafından önerilen plastik ofset kurallarına sahip Kent ve Park'ın modeli (Kent and Park, 1971) kullanılmıştır. Çelik donatının davranışını modellemek için Dhakal ve Maekawa'nın akma sonrası burkulma modeli (Dhakal and Maekawa, 2002), malzeme testlerinden elde edilen akma ve nihai dayanım değerlerine göre "Uniaxial Hysteretic Material" komutu kullanılarak tanımlanmıştır (Mazzoni vd. 2007). Yatay yük uygulaması için kullanılan iç açıklıktaki kirişler, kirişlerin üstünde ve altında NPU140 profilleri de dahil olmak üzere kompozit kesit olarak modellenmiştir (Şekil 3.55b). Çelik kirişler ve kolonlar (Şekil 3.55b), tek eksenli çekme kupon testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Şekil 3.55c) kullanılarak "Uniaxial Hysteretic Material" komutu kullanılarak modellenmiştir. Betonarme ve çelik çerçevelerin bağlantısında kullanılan ankraj çubukları, "Rijid Beams" komutu kullanılarak modellenmiştir (Şekil 3.55a).



Şekil 3.55. Modelleme stratejisi

Geometrik nonlineerite etkisinin önemsiz olması nedeniyle kirişler için lineer geometrik dönüşüm kullanılmıştır. BEÇÇ'lerin yük-deformasyon ilişkisi, daha önceki bir çalışmada elde edilen test verilerine göre kalibre edilmiştir (Özçelik vd. 2017) (Şekil 3.55c). Bu nedenle, BEÇÇ'ler çubuk (truss) elemanlar olarak modellenmiştir. Analizlerde BEÇÇ'lerin bağlandığı bayrak levhası ve bağlantı detaylarını simüle etmek için söz konusu çubuk (truss) elemanlara “rigid end off-set” uygulanmıştır (Şekil 3.55a). Dolgu duvarlar, sadece basınca çalışan çubuk elemanlar (compression only truss) kullanılarak modellenmiştir (Şekil 3.55a). Malzeme özellikleri ve ilgili denklemler Amerikan standardına (ASCE/SEI41-06 2007) uygun olarak kullanılmıştır. Modelde kullanılan bu basınç çubukları için etkin alan, aşağıdaki denklemler kullanılarak ASCE standardına (ASCE/SEI41-06 2007) göre hesaplanmıştır:

$$\alpha = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (3.3)$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{E_{ms}(t_{in} + t_p) \sin(2\theta)}{4E_c I_c h_{in}} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (3.4)$$

Burada h_{col} kolon yüksekliği, r_{inf} dolgu duvarın diyagonal uzunluğu, θ tanjantı dolgu duvar yüksekliğinin uzunluğuna oranı olan açı, E_c ve E_{ms} sırasıyla betonun ve dolgu duvarın elastisite modülüdür. t_{in} ve t_p sırasıyla tuğla ve sıvanın kalınlıklarıdır. Tuğla ve sıva kompozitinin elastisite modülü, E_{sm} şu şekilde hesaplanmıştır:

$$E_{ms} = \left(\frac{E_{in}t_{in} + E_mt_p}{t_{st}} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (3.5)$$

Burada E_{in} ve E_m dolgu duvar ve harç/sıvanın elastisite modülü ve t_{in} ve t_m dolgu duvar ve harcın kalınlığıdır. Buna göre ASCE standardına (ASCE/SEI41-06 2007) göre E_{in} ($550F_m'$) olarak alınmış ve t_u , Amerikan standardı (ACI, 2014) kullanılarak ($4700\sqrt{F_c'}$) denklemiyle hesaplanmıştır. Deney sırasında yapılan gözlemler, dolgu duvarın orta bölgesinde her iki yönde diyagonal çatlaklar oluştuğunu ve bu çatlakların diyagonal boyunca kademeli bir desende uzandığını göstermiştir. Sonuç olarak, dolgu duvar modelindeki basınç çubuklarının basınç dayanımı (F_{cm}) Amerikan standardına (ASCE/SEI41-06 2007) uygun olarak aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$V_{ss} = f_{mv}L(t_{in} + t_p) \quad (3.6)$$

$$f_{cm} = \frac{V_{ss}}{\alpha \cos \theta} \quad (3.7)$$

$$f_{cm} = \frac{V_{ss}}{\alpha \cos \theta} \quad (3.8)$$

V_{ss} duvar uzunluğu boyunca toplam kesme direnci, L dolgu duvarın uzunluğu, f_{mv} Amerikan standardından (ASCE/SEI41-06 2007) alınan harç/alçı karışımının kesme mukavemetidir (0.25 MPa iyi durumdaki dolgu duvarlar için).

Dolgu duvarlara ait malzeme modeli (Concrete 04) için Popovics (1973) denklemi kullanılmıştır. Maksimum basınç dayanımı ve kırılma anındaki birim şekil değiştirmeler için sırasıyla 0.002 ve 0.004 değerleri kullanılmıştır. Sayısal simülasyonda dolgu duvar modeline ait bir yöndeki diyagonal çubuk elemanın yıkılmasına rağmen diğer yöndeki diyagonal elemanın hasar almadığı gözlenmiştir. Bu modelleme hatasının üstesinden gelmek için Talaat ve Mosalam (2008) tarafından önerilen eleman çıkarma algoritması (element removal algorithm) benimsenmiştir. Bir yöndeki diyagonal çubuk elemanın birim şekil değiştirme değeri kırılma değerini aştığında her iki yöndeki diyagonal çubuk elemanlar modelden çıkarılmıştır. Böylece, bir yöndeki kırılmanın dolgu duvarın tamamen yıkılmasına neden olduğu durum modelde de elde edilmiştir.

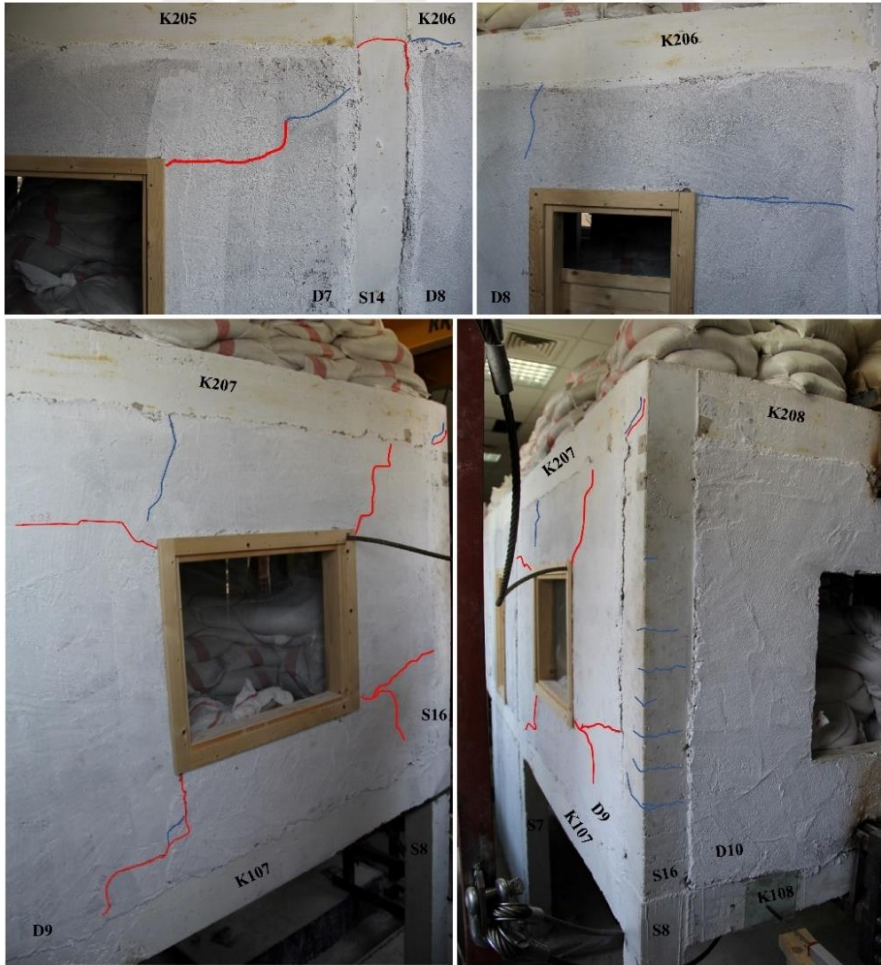
Taban plakası üzerine yerleştirilmiş LVDT'ler (Şekil 3.42, 3.46) yardımıyla ölçülen değerler, özellikle (GDE-1'e ait) ikinci deney esnasında kayda değer bir düşey hareketin meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 4.21, 4.39, 4.53). Söz konusu bu düşey hareket, güçlendirilmiş deney numunelerinin rijitliğini doğru bir şekilde simüle etmek için, dikkate alınmıştır. Şekil 3.55d'de deneylerden elde edilen BEÇÇ'lerin ait ortalama birim şekil değiştirmesi ve taban plakalarının düşey yöndeki hareketinden elde edilen çapraz kuvvetini gösterilmiştir. Taban plakalarının düşey hareketi, modelde BEÇÇ'ler ve temel arasında elastik yaylar kullanılarak sağlanmıştır. Bu elastik yayların rijitliği, deneydeki tepe deplasman ve taban kesme kuvvetine yakın değerler elde edilene kadar deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre kalibre edilen yayların rijitlik değerleri Şekil 3.55d'de gösterilmiştir. Model oluşturulduktan sonra statik ters çevrimli döngüsel analiz gerçekleştirilmiş. Şekil 4.56 ve 4.57 yapılan analizlerin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. RDE’de gözlenen hasarlar

1’inci Kat GKÖO (%)	Gözlenen Hasarlar
0.3 (Şekil 4.2)	Kolonlarda ve dolgu duvarlarda kılcal boyutta çatlaklar gözlenmiştir.
0.5 (Şekil 4.3)	Kolonlarda ve dolgu duvarlarda yeni kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir. Mevcut çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam etmiştir. Dolgu duvarlar ve betonarme çerçeve arasında ayrışma başlamıştır.
1.0 (Şekil 4.4)	Mevcut çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam etmiştir. Kolonlarda yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Dolgu duvarda çatlaklar belirgin hale gelmiştir. Birinci kat dolgu duvarlar ve temeller arasında ayrışma başlamıştır. Ayrıca birinci kat kolon diplerinde çatlakların belirgin hale geldiği gözlenmiştir.
1.5 (Şekil 4.5)	Birinci kat kolon diplerindeki çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam etmiştir. Dolgu duvarlar ve betonarme çerçeve arasındaki ayrışma artmıştır. Dolgu duvarlardaki mevcut çatlaklar genişlemiş ve yeni çatlaklar oluşmuştur.
2.0 (Şekil 4.6)	Birinci kattaki dolgu duvarların diplerinde açılmalar gözlenmiştir. Dolgu duvarlardaki mevcut çatlaklar genişlemiş ve yeni çatlaklar oluşmuştur. Kolonların sargısız bindirme bölgelerinde boyuna donatı sıyrılmaları gözlenmiştir.
2.5 (Şekil 4.7)	Birinci kat dolgu duvarları betonarme çerçevelerden tamamen ayrılmıştır. Birinci kattaki dolgu duvarların diplerinde betonarme kolonlarla birleştikleri yerde tuğlalar kırılmıştır. Birinci kat kolon üst bölgelerinde boyuna donatı burkulması gözlenmiştir.
3.0 (Şekil 4.8)	İkinci kat dolgu duvarları betonarme çerçevelerden tamamen ayrılmıştır. Betonarme bina ağır hasar durumuna gelmiştir.



Şekil 4.2. Deney sırasında (%0.3 GKÖO’da) RDE’de gözlenen hasarlar



Şekil 4.3. Deney sırasında (%0.5 GKÖO’da) RDE’de gözlenen hasarlar



Şekil 4.4. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.5. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar



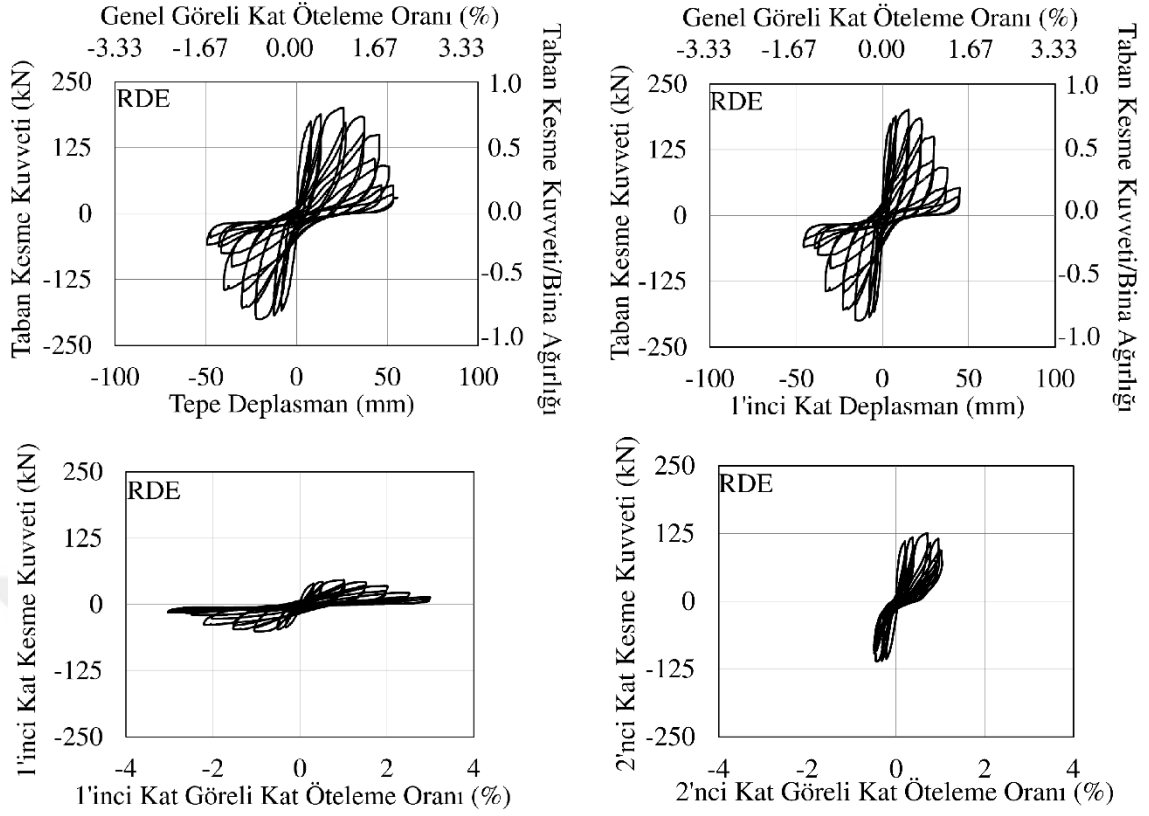
Şekil 4.6. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar



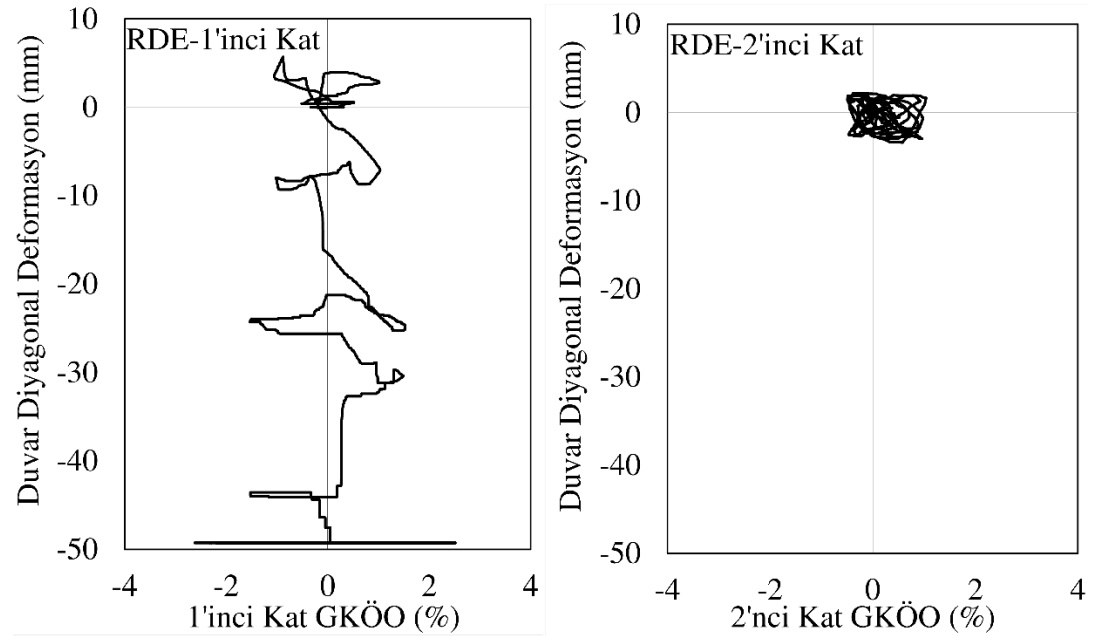
Şekil 4.7. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.8. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) RDE'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.9. RDE'ye ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat görelî öteleme, 2'inci kat kesme kuvveti-2'inci kat görelî öteleme grafikleri



Şekil 4.10. RDE'ye ait tuğla duvar diyagonal uzama grafikleri

4.1.2. GDE-1'e ait deney sonuçları

GDE-1'e ait hasarlar Çizelge 4.2'de özetlenmiş olup Şekil.4.11-4.19'da gösterilmiştir. GDE-1'e ait yatay kuvvet yatay deplasman, BEÇÇ'li çerçeve temelinde meydana gelen düşey deplasman davranışı ve BEÇÇ'deki ÇE'nin eksenel birim şekil değiştirme değeri sırası ile Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. GDE-1'de gözlenen hasarlar

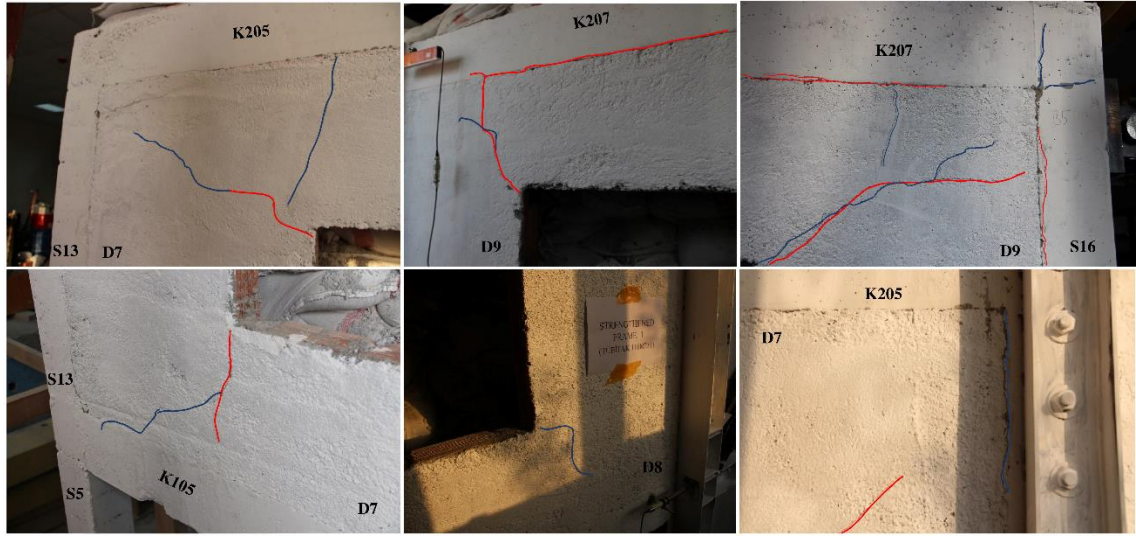
1'inci Kat GKÖO (%)	Gözlenen Hasarlar
0.3 (Şekil 4.11)	İkinci katın dış açıklıklarındaki duvarlarda kılcal çatlaklar ve açılmalar meydana gelmiştir.
0.5 (Şekil 4.12)	İkinci kat duvarlarındaki çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam etmiştir. Birinci kat orta açıklığındaki duvar çerçeveden kısmi seviyede ayrılmıştır.
1.0 (Şekil 4.13, 14)	İkinci kat duvarlarındaki çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam ederken yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Birinci kat dış açıklıktaki kolonlarda çatlaklar gözlenmiştir. Dış açıklıktaki birinci kattaki kirişlerde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çelik çerçeve ve betonarme yapı arasında kısmi seviyede ayrılmalar meydana gelmiştir. Orta açıklıktaki sürekli temellerde (taban plakaları çevresinde) çatlaklar oluşmuştur.
1.5 (Şekil 4.15, 16)	Birinci kat kolon diplerinde sargısız beton dökülmeye başlamış ve bindirme bölgesindeki donatılar betondan sıyrılmıştır. İkinci kat duvarlarındaki çatlaklar 3-4 mm'ye kadar genişlemiştir. Her iki katta dış açıklıktaki kirişlerde mevcut çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam ederken yeni çatlaklar oluşmuştur. Orta açıklıktaki sürekli temellerdeki çatlaklar yayılmaya devam etmiştir.
2.0 (Şekil 4.17)	Birinci kat kolon diplerindeki çatlaklar genişlemiştir. İkinci kat kolon ve kirişlerindeki çatlaklar yayılmaya genişlemeye devam etmiştir. Orta açıklıktaki sürekli temellerdeki çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam etmiştir. Böylece temellerde ciddi hasarlar meydana gelmiştir.
2.5 (Şekil 4.18)	Birinci kat orta açıklıktaki duvarlar temelden ayrılmıştır. İkinci kat dış açıklık duvarlarındaki çatlaklar belirgin bir şekilde genişlemiştir. Orta açıklıktaki sürekli temelleri taban plakalarından ayrılmıştır. Temellerdeki hasar artmıştır.
3.0 (Şekil 4.19)	Orta açıklıktaki temeller ve kolon dipleri ağır hasar almıştır.

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi GDE-1’in yatay yük kapasitesi 330 kN’dur. Bu değer RDE’nin yatay yük kapasitesinin 1.6 katı kadardır. Söz konusu deney elemanı davranışının yatay yük taşıyıcı sistemler olan tuğla duvar ve BEÇÇ’li çerçeveye bağlı olduğu görülmüştür. Tuğla duvar taşıyıcılığının RDE’de %1.0 GKÖÖ’da etkisini kaybetmeye başladığı düşünülürse BEÇÇ’li çerçevenin yatay yük taşımadaki etkisinin devreye girdiği görülmüştür. Özellikle BEÇÇ’lerin hem basınç hem de çekme altında hemen hemen aynı kapasiteye sahip olmaları sebebiyle yatay yük taşıma konusunda betonarme yapıya katkısının oldukça etkin olduğu görülmüştür.

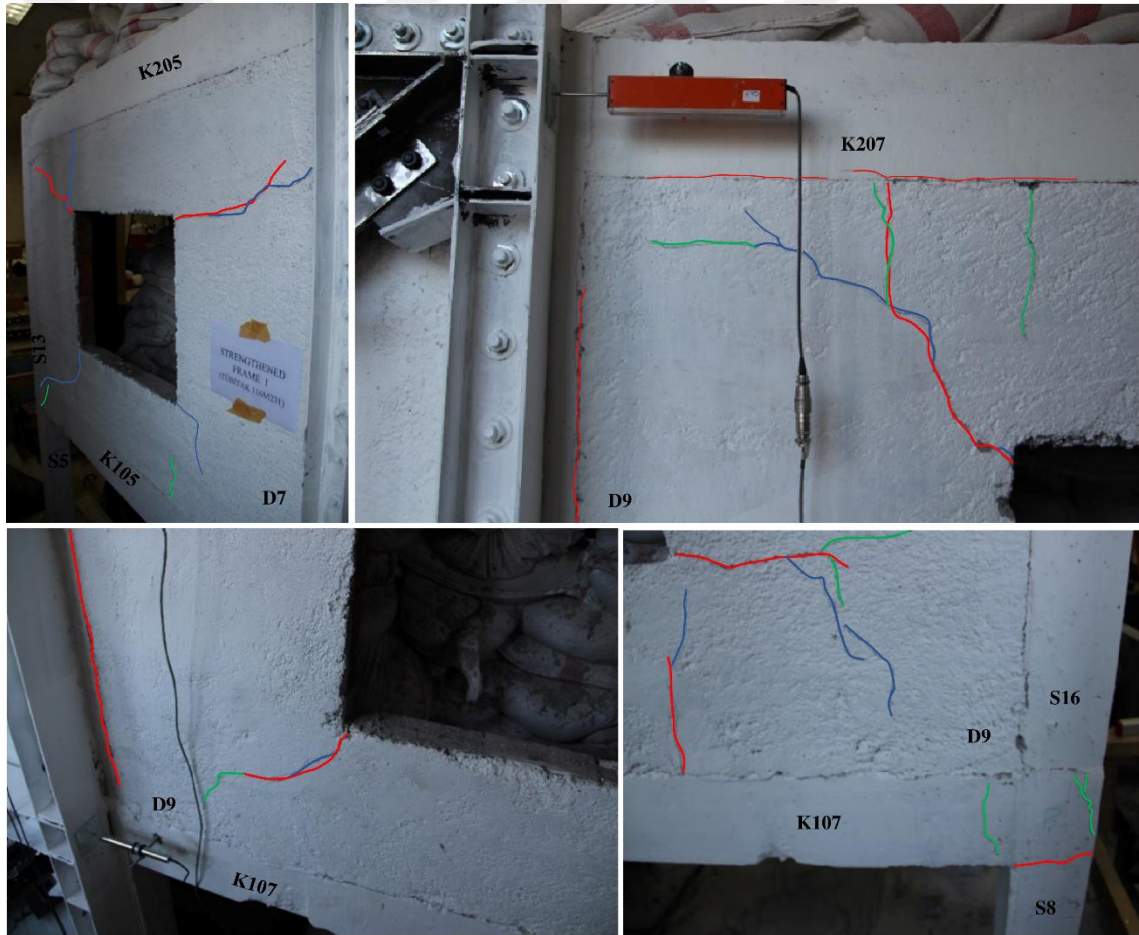
Ancak, Şekil 4.21’de görüldüğü gibi BEÇÇ’li çerçevenin temelinde oldukça yüksek değerlere (15 mm) ulaşan düşey deplasmanlar meydana gelmiştir. Bu deplasmanların meydana gelmesindeki en önemli faktörlerden birisi temel beton dayanımının çok düşük olmasıdır. Dolayısı ile Şekil 4.22’de görüldüğü gibi BEÇÇ’lerin kapasitelerine tam olarak ulaşmadığı veya kısmi seviyede plastikleşme meydana geldiği görülmüştür ($\epsilon_{akma} = \%0.162$). Sonuç olarak GDE-1’de BEÇÇ’li çerçeve temelinde meydana gelen ağır hasardan dolayı BEÇÇ’lerin yatay yük kapasitesine katkısı yeterince sağlanamamıştır. Dolayısı ile temellerin güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca GDE-1’e ait düzlem dışı deplasmanlar, temel deplasmanları ve çelik ve betonarme çerçeveler arası görel deplasmanlar EK-8.2’de sırasıyla Şekil 8.26, 8.27 ve 8.28’de verilmiştir.



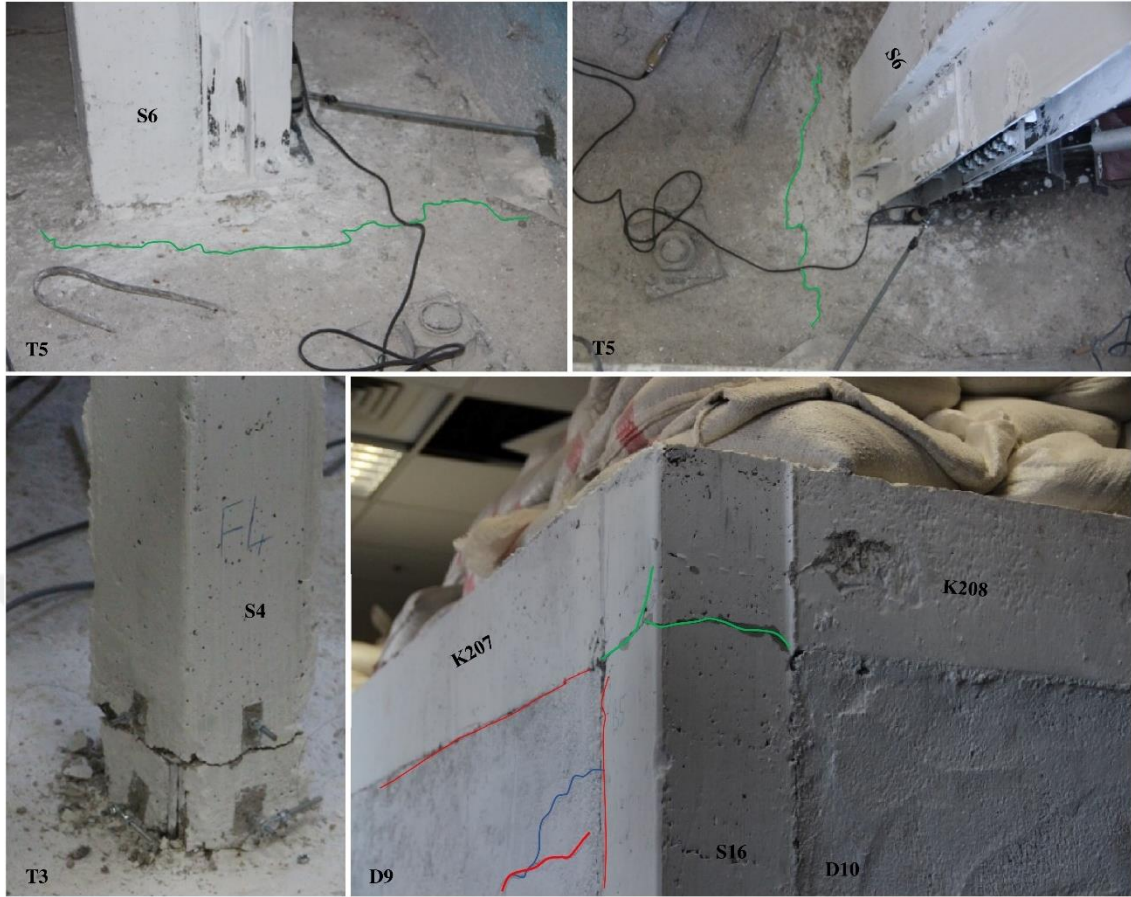
Şekil 4.11. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ’da) GDE-1’de gözlenen hasarlar



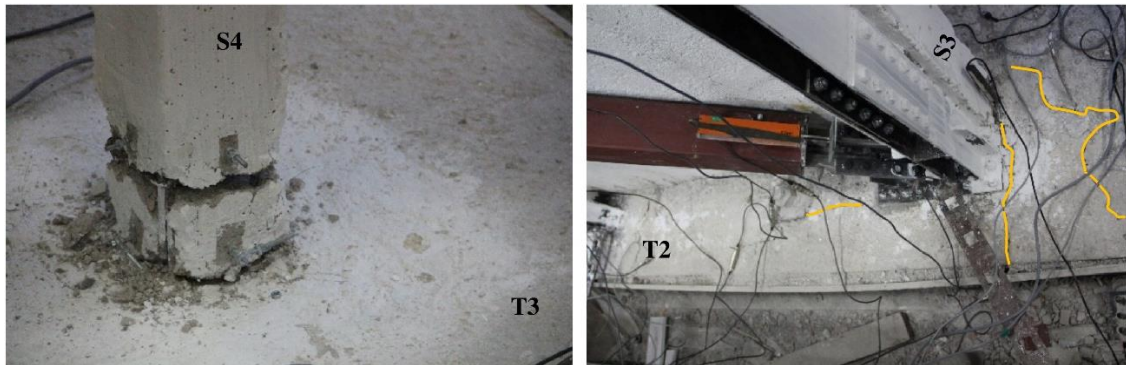
Şekil 4.12. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar



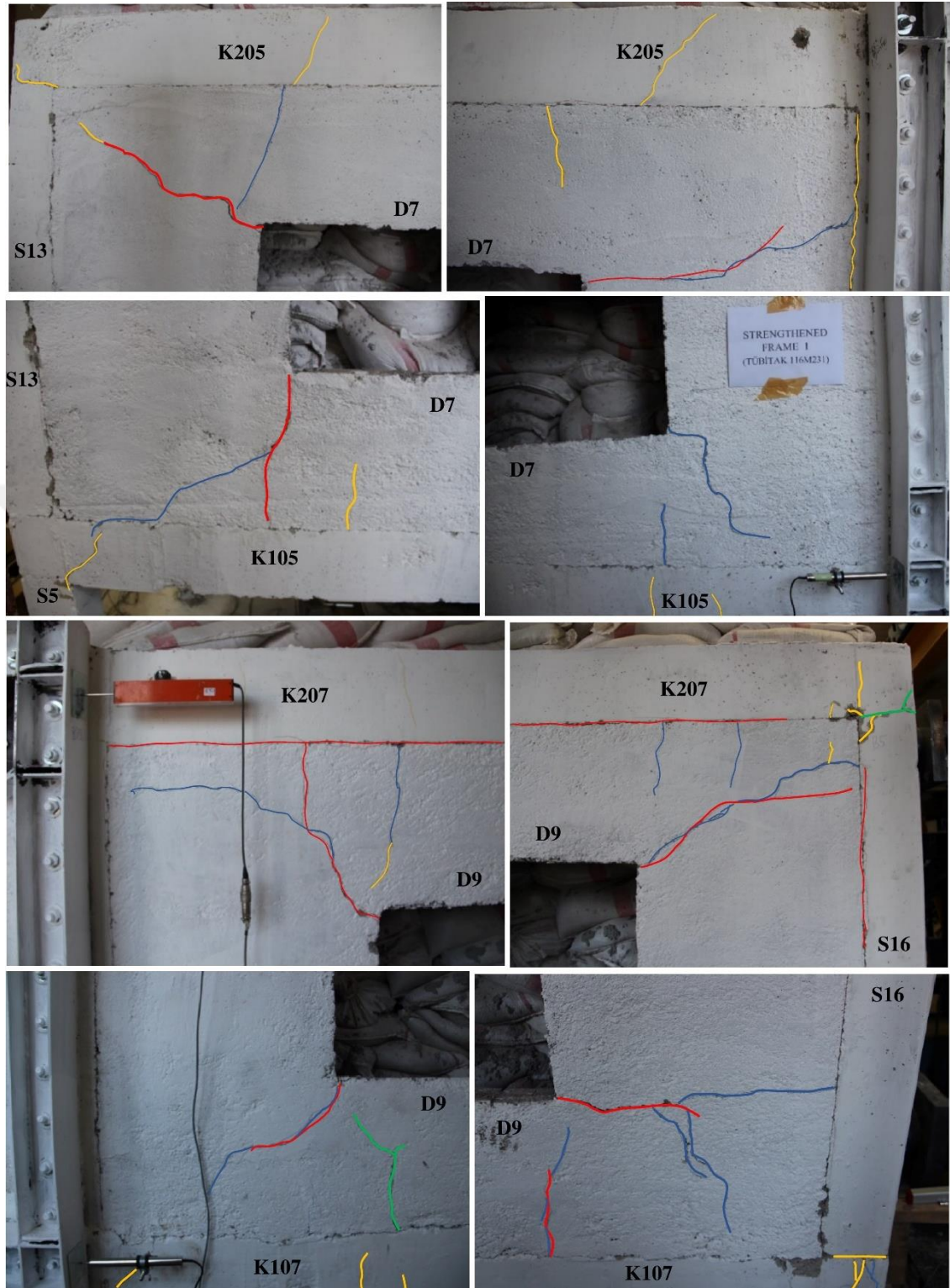
Şekil 4.13. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait duvarlarda gözlenen hasarlar



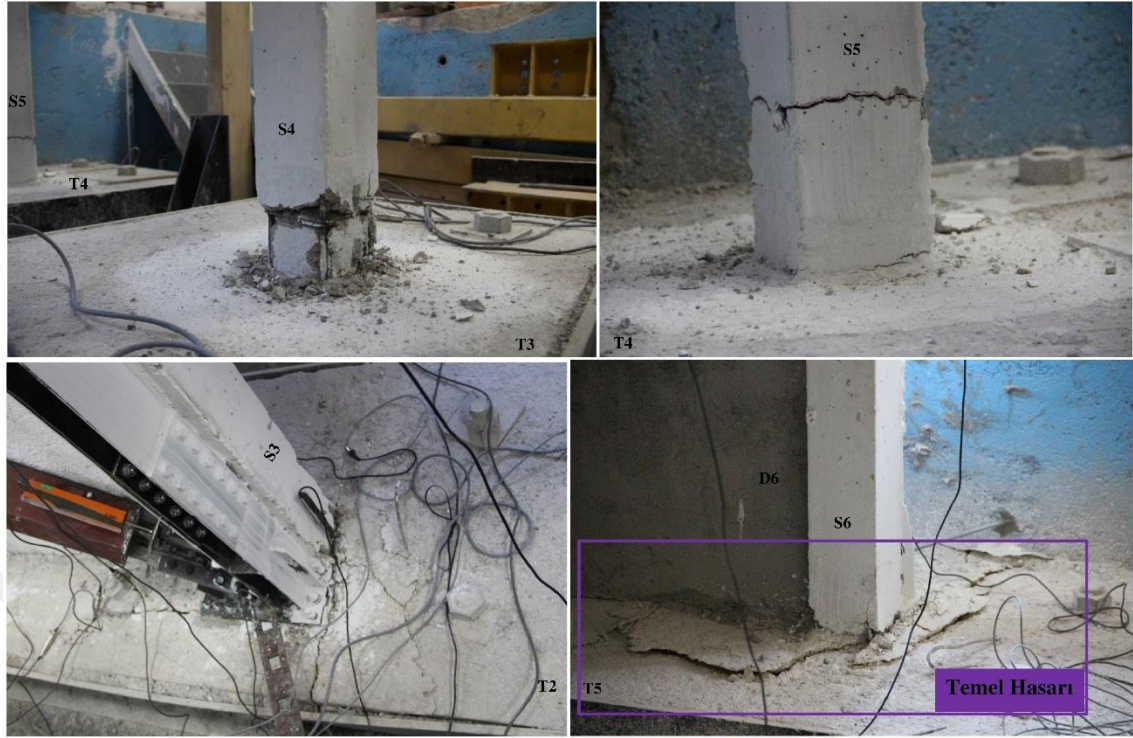
Şekil 4.14. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait temel ve kolonlarda gözlenen hasarlar



Şekil 4.15. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait temel ve kolonlarda gözlenen hasarlar



Şekil 4.16. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-1'e ait duvarlarda gözlenen hasarlar



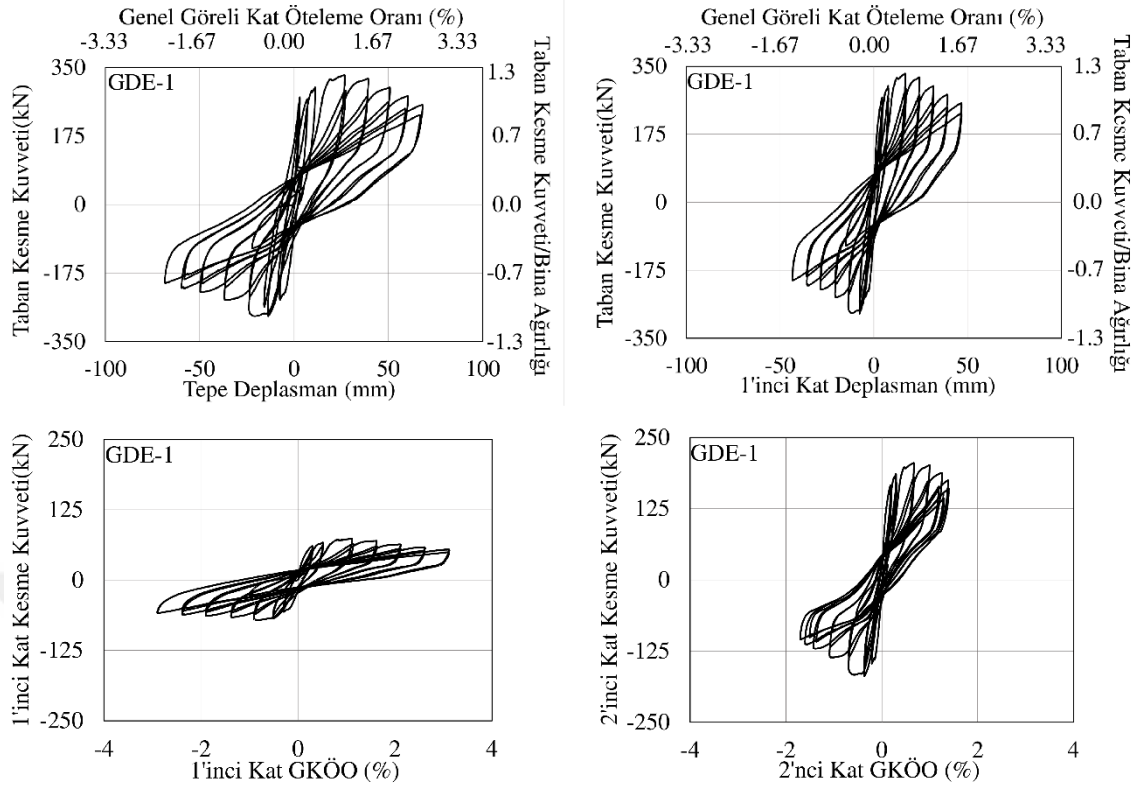
Şekil 4.17. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar



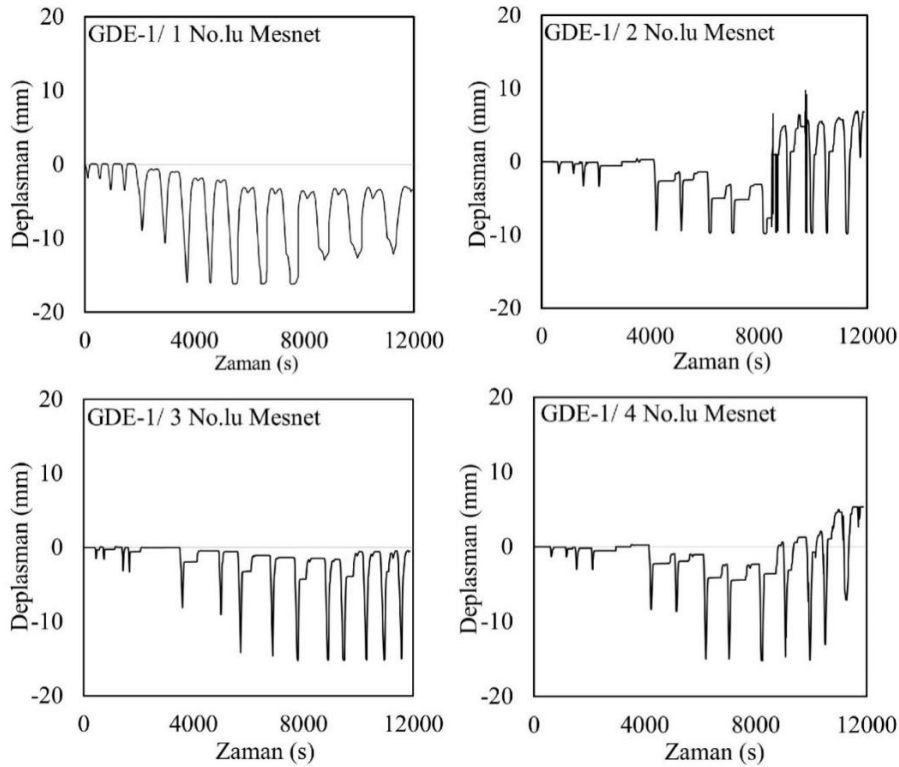
Şekil 4.18. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-1'de gözlenen hasarlar



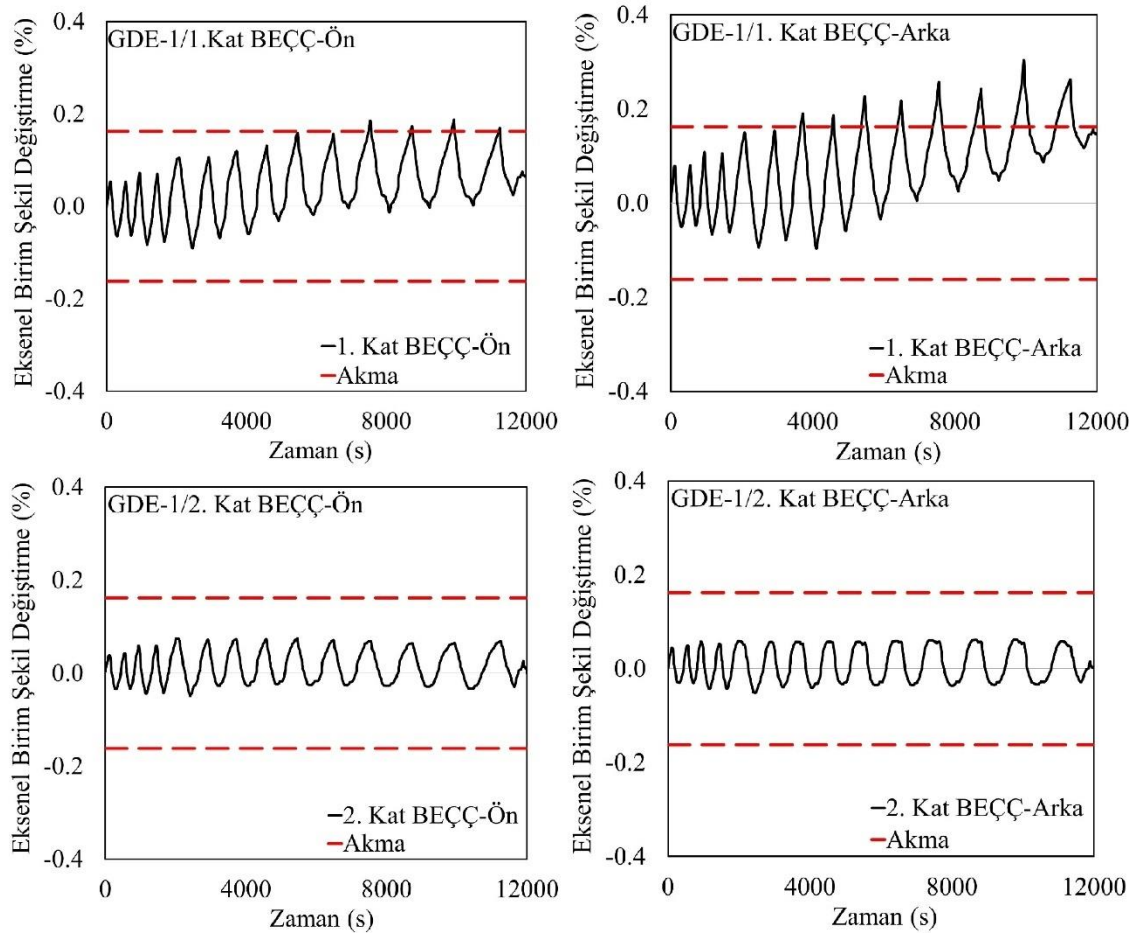
Şekil 4.19. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ’da) GDE-1’de gözlenen hasarlar



Şekil 4.20. GDE-1'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat göreceli öteleme, 2'inci kat kesme kuvveti-2'inci kat göreceli öteleme grafikleri



Şekil 4.21. GDE-1'e ait çelik çerçeve mesnetleri deplasman-zaman grafikleri



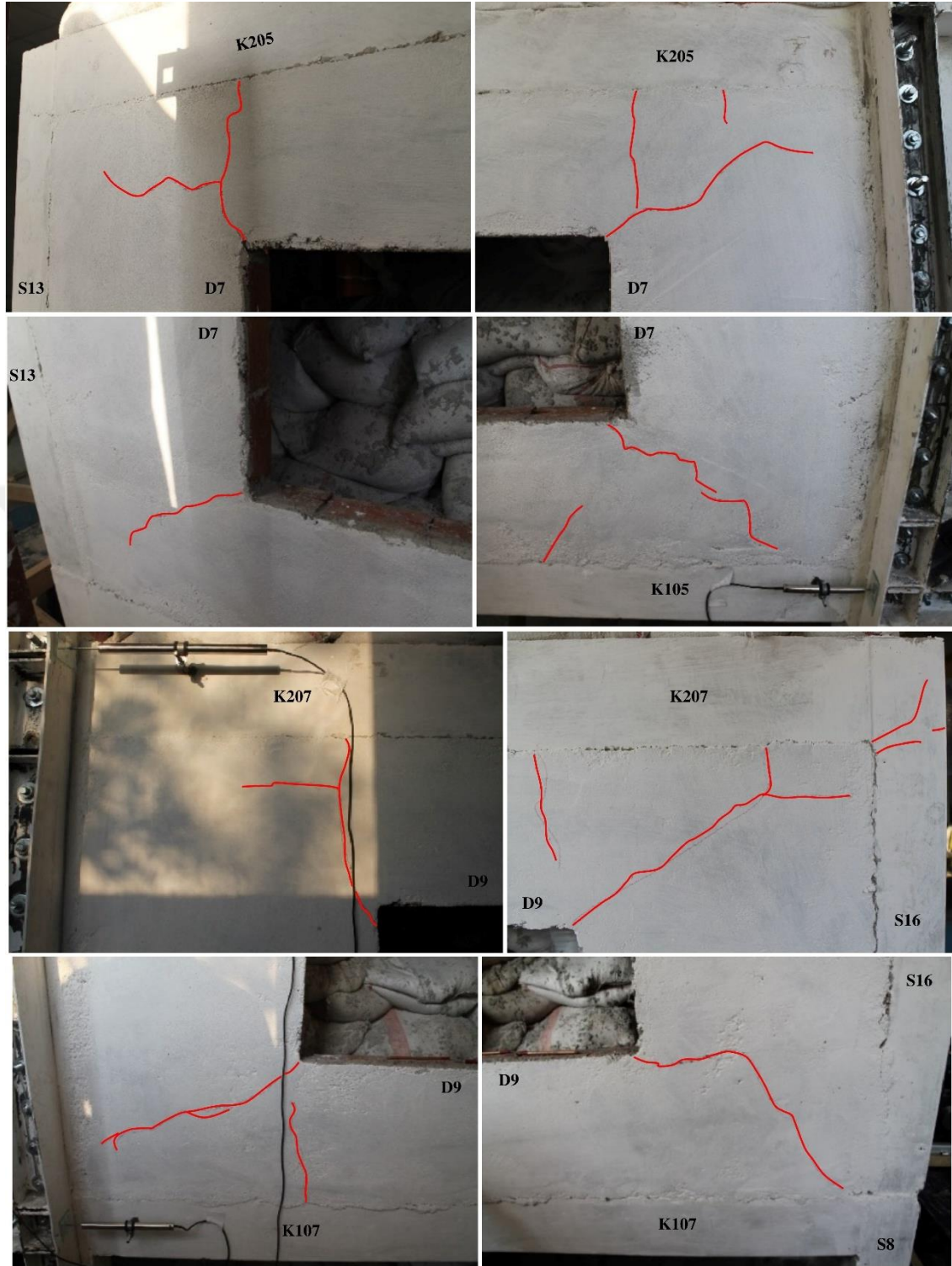
Şekil 4.22. GDE-1'e ait BEÇÇ elemanları eksenel şekil değiştirme-zaman grafikleri

4.1.3. GDE-2'ye ait deney sonuçları

GDE-2'de gözlenen hasarlar Çizelge 4.3 ve Şekil 4.23-4.37'de görülmektedir. GDE-2'ye ait yatay kuvvet yatay deplasman, BEÇÇ'li çerçeve temelinde meydana gelen düşey deplasman davranışı ve BEÇÇ'deki ÇE'nin eksenel birim şekil değiştirme değeri sırası ile Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'ta görülmektedir. Şekil 4.38'da görüldüğü üzere BEÇÇ'lerle güçlendirilen kusurlu yapının yatay yük taşıma kapasitesi 613 kN'dur. RDE'ye göre yatay yük artışı 3.0 katı civarındadır. GDE-2'de BEÇÇ'ler hem basınç hem de çekme istemleri altında plastikleşmiştir ($\epsilon_{akma} = 0.162$). Söz konusu birim uzama değerleri Şekil 4.40'ta görüldüğü üzere %1.5 civarındadır. GDE-2'nin yatay yük taşıma kapasitesi BEÇÇ'ler tarafından kontrol edildiği görülmüştür. Özellikle birinci kat GKÖO'nun %1.0'dan sonrası için tuğla duvarın yatay kapasiteye katkısının azalmaya başladığı anda BEÇÇ'lerin etkin şekilde yatay yük taşıdığı görülmektedir. Ayrıca GDE-2'ye ait düzlem dışı deplasmanlar, temel deplasmanları, çelik ve betonarme çerçeveler arası göreceli deplasmanlar ve slot delikten dolayı oluşan kaymalar EK-8.3'te sırasıyla Şekil 8.29, 8.30, 8.31 ve 8.32'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. GDE-2’de gözlenen hasarlar

1’inci kat GKÖO (%)	Gözlenen Hasarlar
0.3 (Şekil 4.23)	İkinci katın dış açıklıklarındaki dolgu duvarlarda diyagonal çatlaklar ve açılmalar meydana gelmiştir. Dolgu duvarlar çerçeveden ayrılmaya başlamıştır.
0.5 (Şekil 4.24)	Kolon ve kirişlerde çatlaklar oluşmuştur. Dolgu duvarlar çerçeveden daha fazla ayrılmıştır.
1.0 (Şekil 4.25)	Dolgu duvarlardaki mevcut çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam ederken yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Dolgu duvarlar çerçeveden tamamen ayrılmıştır.
1.5 (Şekil 4.26)	Dolgu duvarların yüzeyindeki sıva dökülmüştür. Orta açıklıktaki kolon diplerinde çatlaklar oluşmuştur. Birinci katta lokal olarak tuğlalar kırılıp ve dökülmüştür. Dolgu duvar diplerinde yarılmalar oluşmuştur.
2.0 (Şekil 4.27, 4.28)	Birinci kat kolon kiriş birleşimlerinde kılcal seviyede çatlaklar oluşmuştur. Kolon diplerindeki çatlaklar genişlemiştir. Dolgu duvarlar taşıma kapasitesini hemen hemen kaybetmiştir. Birinci kat betonarme kolon kiriş birleşimlerinde pay payı dökülmesi meydana gelmiştir. Birinci kat çelik kolon diplerinde plastik mafsallık oluşmuştur.
2.5 (Şekil 4.29, 4.30)	Birinci kat kolon diplerinde ek çatlaklar oluşmuştur. BEÇÇ’lerin yük aktardığı kolon diplerinde plastik mafsallık oluşmuş ve sonrasında hasar seviyesi artmıştır. Çelik çerçevede kolon diplerindeki I-profil başlığında ileri seviyede plastikleşme meydana gelmiştir.
3.0 (Şekil 4.31, 4.32, 4.33, 4.34)	Çelik çerçeveye ait kolon diplerinde plastik davranış artmıştır. Birinci kattaki dolgu duvarlar yıkılmıştır. İkinci kattaki dolgu duvarlar çerçeveden ayrılmıştır. Kolon kiriş birleşimlerinde pas payı dökülmüştür. Betonarme kolonların üst kısmı mafsallaşmıştır.
3.5 (Şekil 4.35, 4.36, 4.37)	Birinci kattaki dolgu duvarlar tamamen yıkılmıştır. Kolon dipleri ve kolon kiriş birleşimlerinde pas payı dökülmüştür. Çelik çerçeve ve betonarme yapıda ağır hasar meydana gelmiştir.



Şekil 4.23. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.24. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.25. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.26. Deney sırasında (%1.5 GKÖÖ'da) GDE-2'de gözlenen hasarlar



Şekil 4.27. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar



Şekil 4.28. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait çelik çerçevelerde gözlenen hasarlar



Şekil 4.29. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye betonarme yapıda gözlenen hasarlar



Şekil 4.30. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait çelik çerçevelerde gözlenen hasarlar



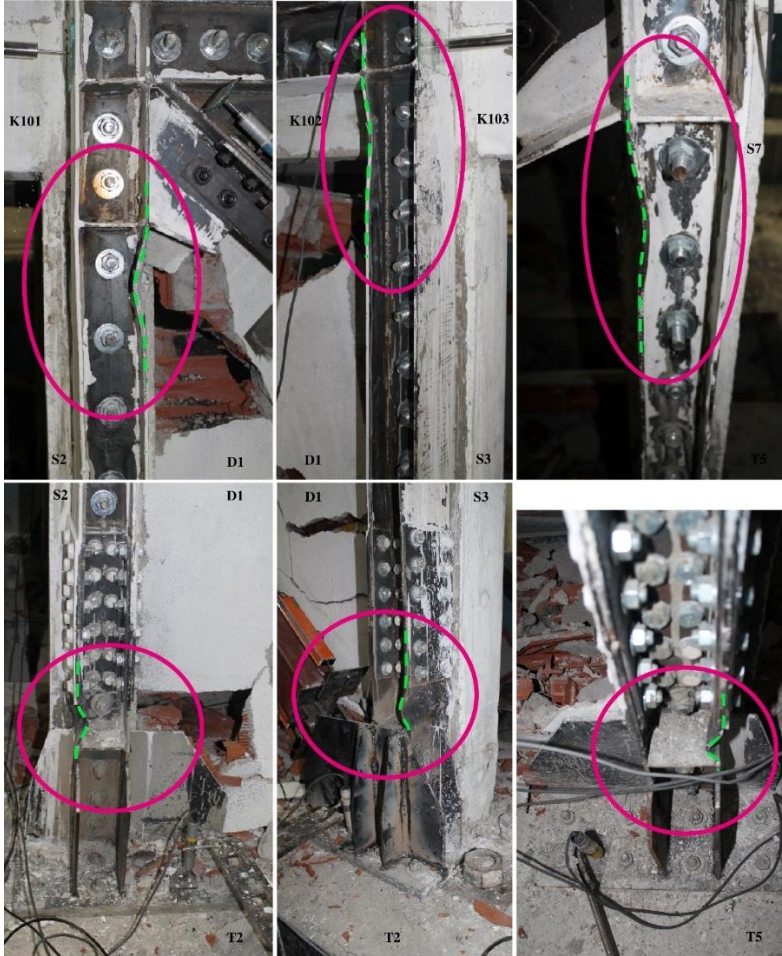
Şekil 4.31. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (1'inci kısım)



Şekil 4.32. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (2'nci kısım)



Şekil 4.33. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (3'üncü kısım)



Şekil 4.34. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait çelik çerçevelerde gözlenen hasarlar



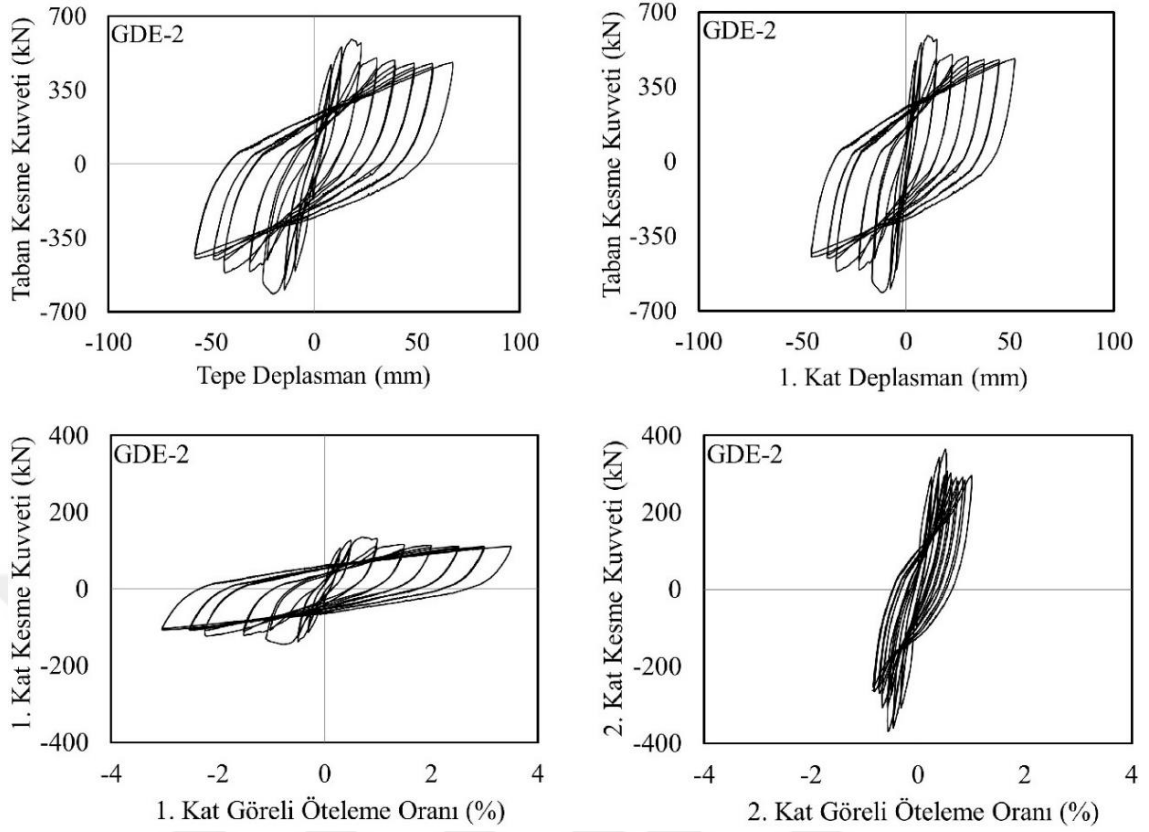
Şekil 4.35. Deney sırasında (%3.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (1'inci kısım)



Şekil 4.36. Deney sırasında (%3.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (2'nci kısım)

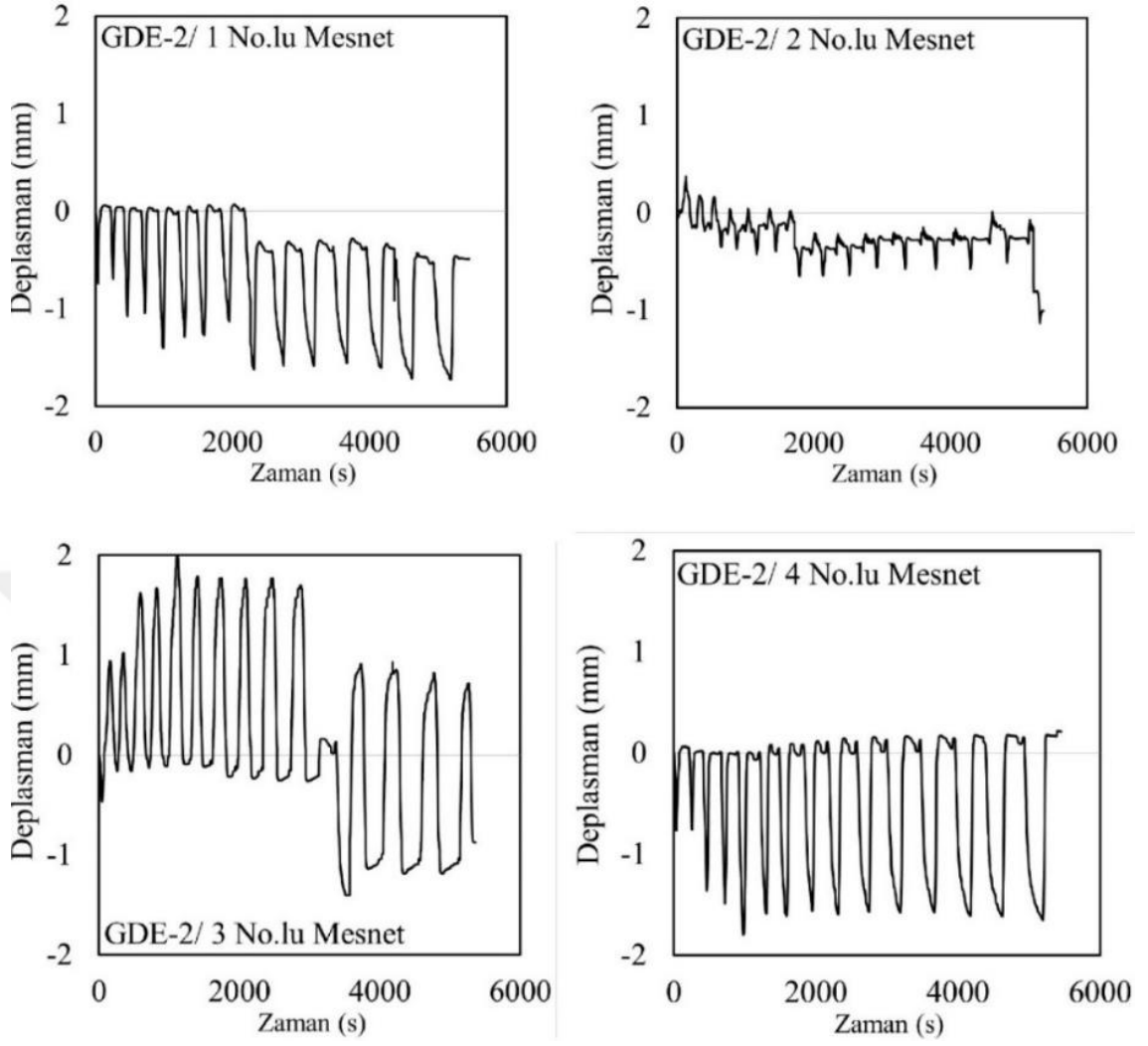


Şekil 4.37. Deney sırasında (%3.5 GKÖÖ'da) GDE-2'ye ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar (3'üncü kısım)

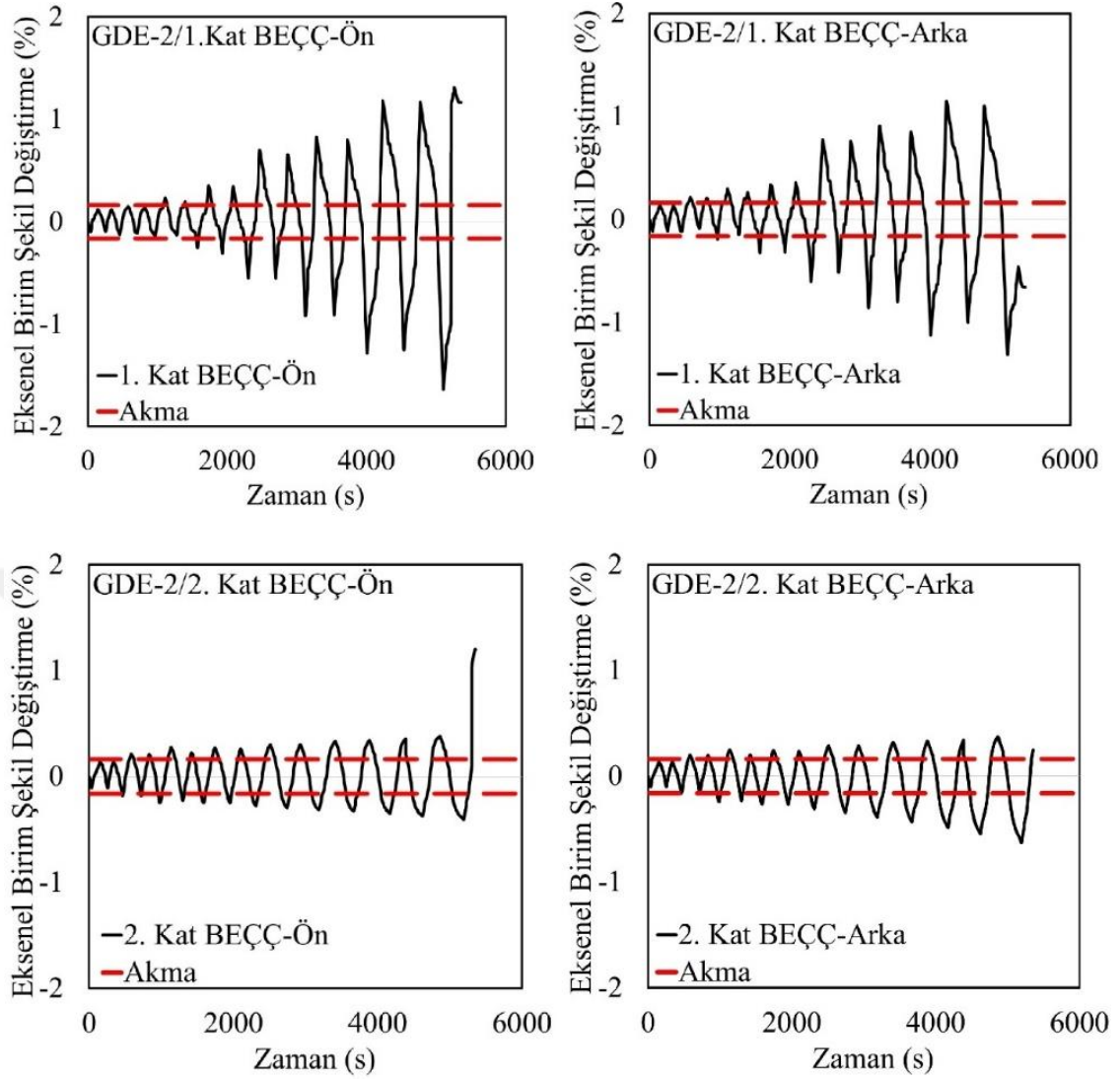


Şekil 4.38. GDE-2'ye ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat göreli öteleme, 2'nci kat kesme kuvveti-2'nci kat göreli öteleme grafikleri

Şekil 4.38'de görüldüğü gibi maksimum yatay yük kapasitesi 613 kN'dan yaklaşık olarak 490 kN civarına düşmüştür ve bu değerde hemen hemen sabit kalmıştır. Dolayısı ile BEÇÇ'lerin sahip olduğu simetrik ve stabil histeretik davranış BEÇÇ'li çerçeve ile güçlendirilen betonarme yapının davranışı üzerinde baskın etkiye sahip olduğu görülmüştür. Söz konusu deneysel çalışmada her ne kadar çelik çerçevenin bulunduğu temel sisteminde hasar görülmese de Şekil 4.39'da görüldüğü gibi taban plakalarında düşey deplasman meydana gelmiştir. Söz konusu deplasman değerinin BEÇÇ'li betonarme yapının yatay rijitliği üzerindeki etkisinin dikkate alınması gerektiği görülmüştür. GDE-1 ve GDE-2'de aynı BEÇÇ ve çelik çerçeve kullanılmasına rağmen GDE-2'deki kapasite artışı GDE-1'e göre oldukça fazladır. Dolayısı ile BEÇÇ'li çelik çerçeve sisteminin temel gereksinimine dikkat edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.39. GDE-2'ye ait çelik çerçeve mesnetleri deplasman-zaman grafikleri



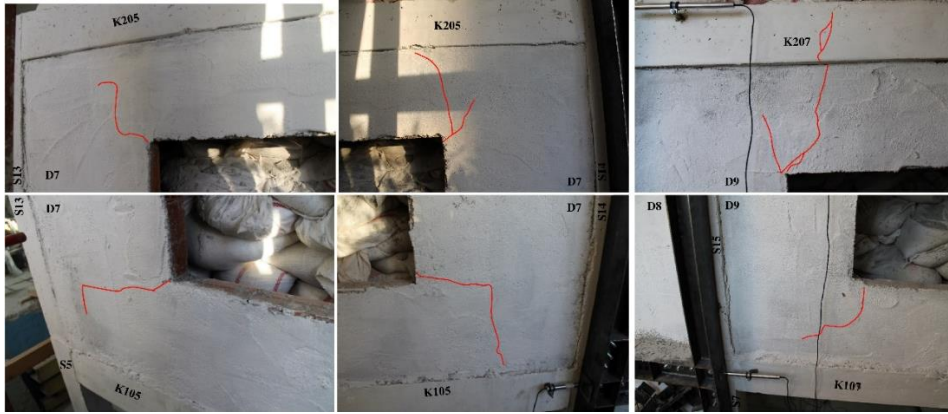
Şekil 4.40. GDE-2'ye ait BEÇÇ elemanları eksenel şekil değiştirme-zaman grafikleri

4.1.4. GDE-3'e ait deney sonuçları

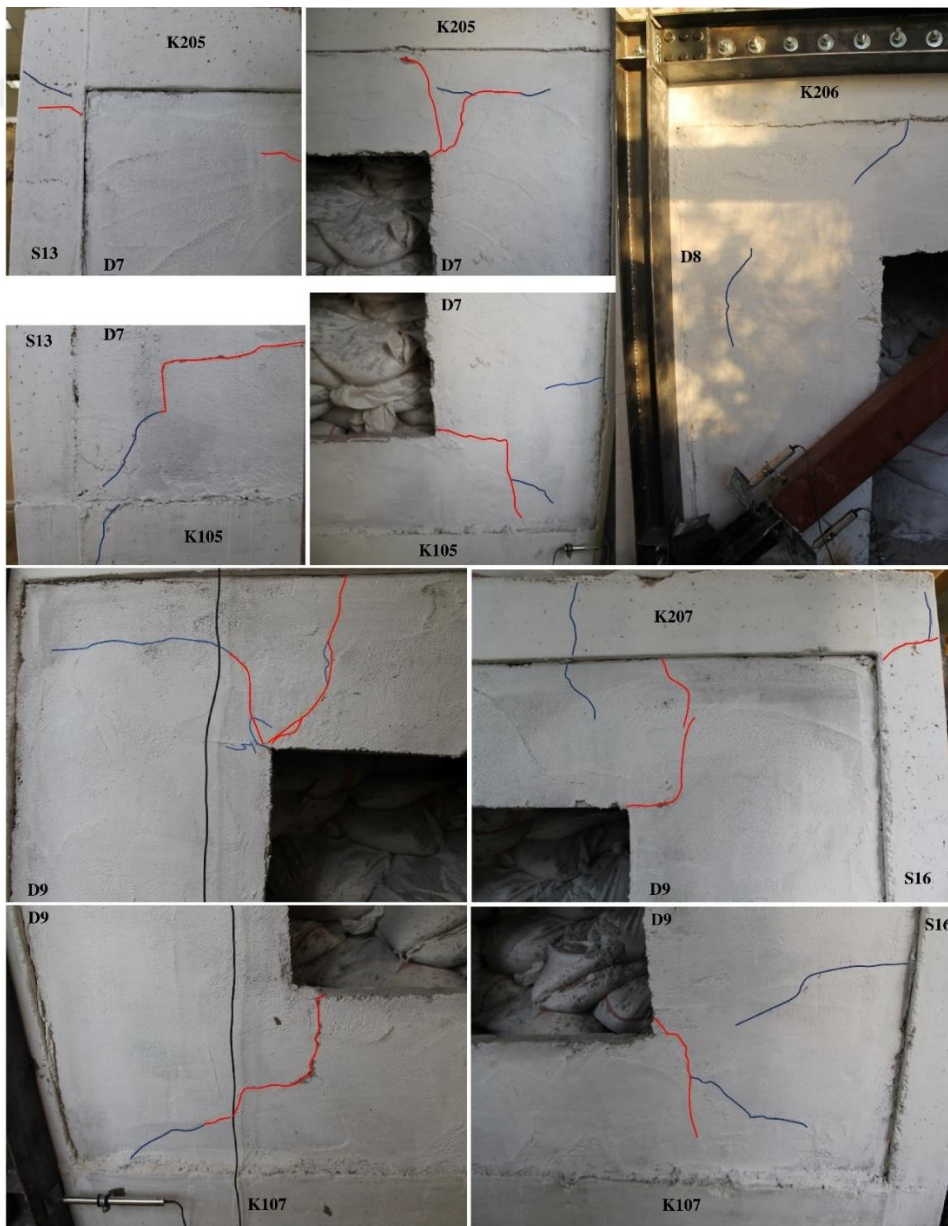
GDE-3'e ait hasarlar Çizelge 4.4 ve Şekil 4.41-4.51'de görülmektedir. GDE-3'e ait yatay kuvvet yatay deplasman, BEÇÇ'li çerçeve temelinde meydana gelen düşey deplasman davranışı ve BEÇÇ'deki ÇE'nin eksenel birim şekil değiştirme değeri sırası ile Şekil 4.52, 4.53 ve 4.54'te görülmektedir. Ayrıca GDE-3'e ait düzlem dışı deplasmanlar, temel deplasmanları, çelik ve betonarme çerçeveler arası göreceli deplasmanlar ve dairesel delikten dolayı oluşan kaymalar EK-8.4'te sırasıyla Şekil 8.33, 8.34, 8.35 ve 8.36'da verilmiştir. Şekil 4.52'de görüldüğü üzere GDE-3'ün yatay yük taşıma kapasitesi 532 kN'dur. RDE'ye göre yatay yük artışı 2.7 katı civarındadır. GDE-3'te BEÇÇ'ler hem basınç hem de çekme istemleri altında plastikleşerek ($\epsilon_{akma} = \%0.191$) %2.0 birim uzama değerine kadar eksenel deplasman yapmışlardır. GDE-3'ün yatay yük taşıma kapasitesi BEÇÇ'ler tarafından kontrol edildiği görülmüştür.

Çizelge 4.4. GDE-3'te gözlenen hasarlar

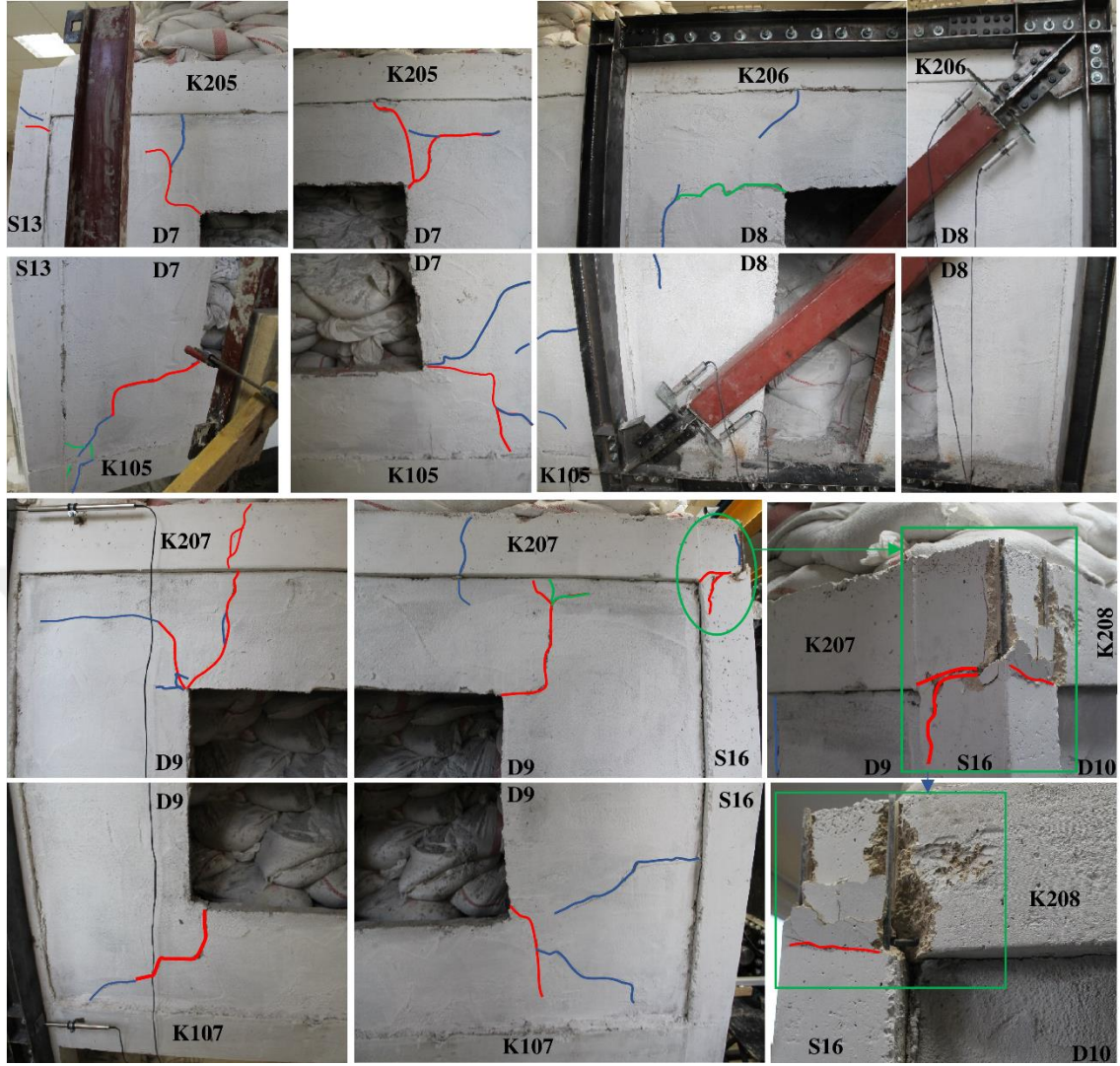
1'inci Kat GKÖÖ (%)	Gözlenen Hasarlar
0.3 (Şekil 4.41)	İkinci katın dış açıklıklarındaki dolgu duvarlarda kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Birinci kattaki dolgu duvarlar çerçeveden kılcal seviyede ayrılmaya başlamıştır. İkinci kat girişlerde kılcal çatlaklar oluşmuştur.
0.5 (Şekil 4.42)	İkinci kat kolonlarda kılcal çatlaklar oluşmuştur. İkinci kattaki dolgu duvarlarındaki çatlaklar genişleyip yayılmıştır. Birinci kattaki dolgu duvarlar çerçeveden ayrılmaya başlamıştır.
1.0 (Şekil 4.43, 4.44)	Birinci kata ait dolgu duvarlardaki çatlaklar yayılmaya ve genişlemeye devam etmiştir. İkinci kattaki dolgu duvarlar çerçeveden ayrılmıştır. İkinci kat (piston tarafındaki) kolonun tepe kısmındaki beton çatlamış ve pas payı dökülmüştür.
1.5 (Şekil 4.45)	Birinci kattaki dolgu duvarlar çerçeveden tamamen ayrılmıştır. İkinci katın dolgu duvarlarındaki çatlaklar genişleyip yayılmıştır. İkinci kat (piston tarafındaki) kolonun tepe kısmı tamamen çatlamıştır. Kolon diplerinde çatlaklar oluşmuştur. Birinci kattaki dolgu duvarların sıvası dökülmeye başlamıştır.
2.0 (Şekil 4.46, 4.47)	İkinci katta dolgu duvarlardaki çatlaklar genişleyip yayılmıştır. Birinci kat duvarlarında hasar artmıştır.
2.5 (Şekil 4.48, 4.49)	Birinci kat dolgu duvarlarında tuğlalar kırılıp dökülmüştür. Birinci ve ikinci kat kolon üst tarafında çatlaklar büyümüştür. İkinci kat duvar çerçeveden ayrılmıştır. Çelik çerçevede kolon diplerindeki I-profil başlığı plastikleşmeye başlamıştır.
3.0 (Şekil 4.50, 4.51)	İkinci kat dolgu duvarlarında çatlaklar genişlemiştir. Birinci ve ikinci kat kolon üst kısmında çatlaklar artmıştır. Birinci kat duvarlar tamamen yıkılmıştır. Çelik çerçeveye ait kolon diplerinde plastik davranış artmıştır.



Şekil 4.41. Deney sırasında (%0.3 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar



Şekil 4.42. Deney sırasında (%0.5 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar



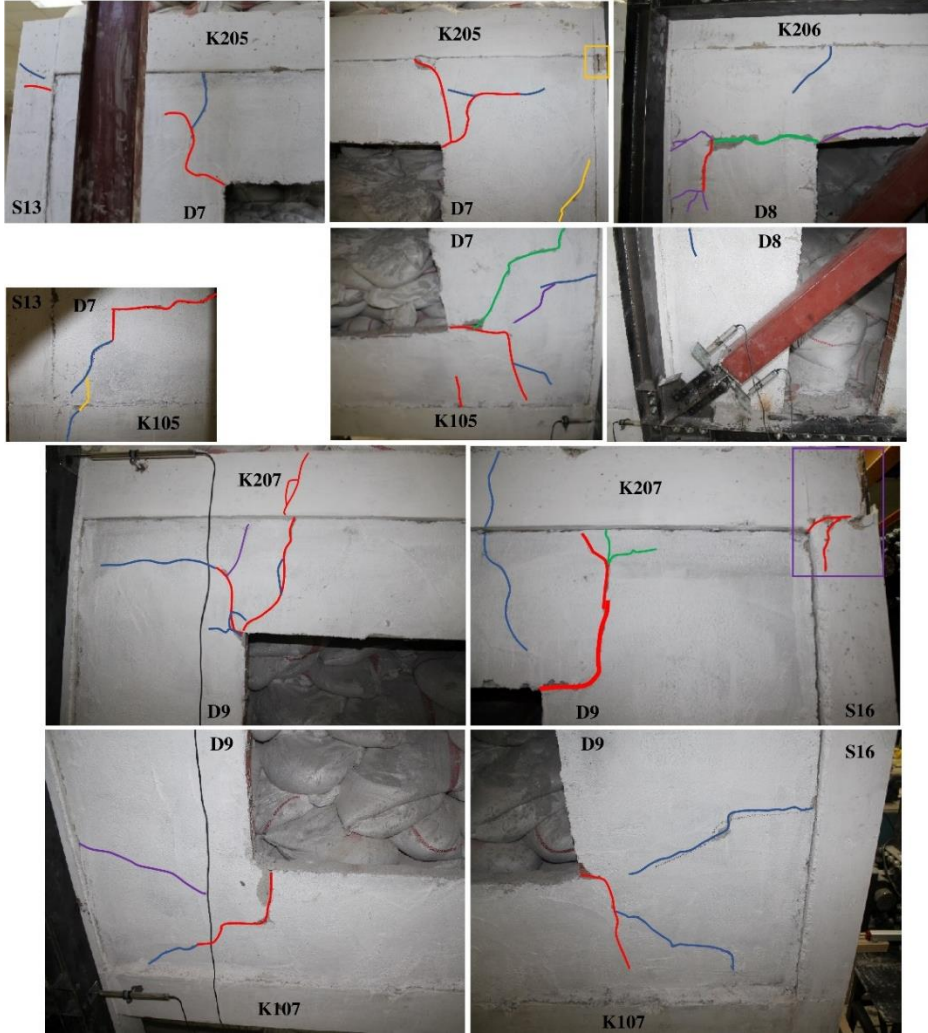
Şekil 4.43. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (1'inci kısım)



Şekil 4.44. Deney sırasında (%1.0 GKÖÖ'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (2'nci kısım)



Şekil 4.45. Deney sırasında (%1.5 GKÖO'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar



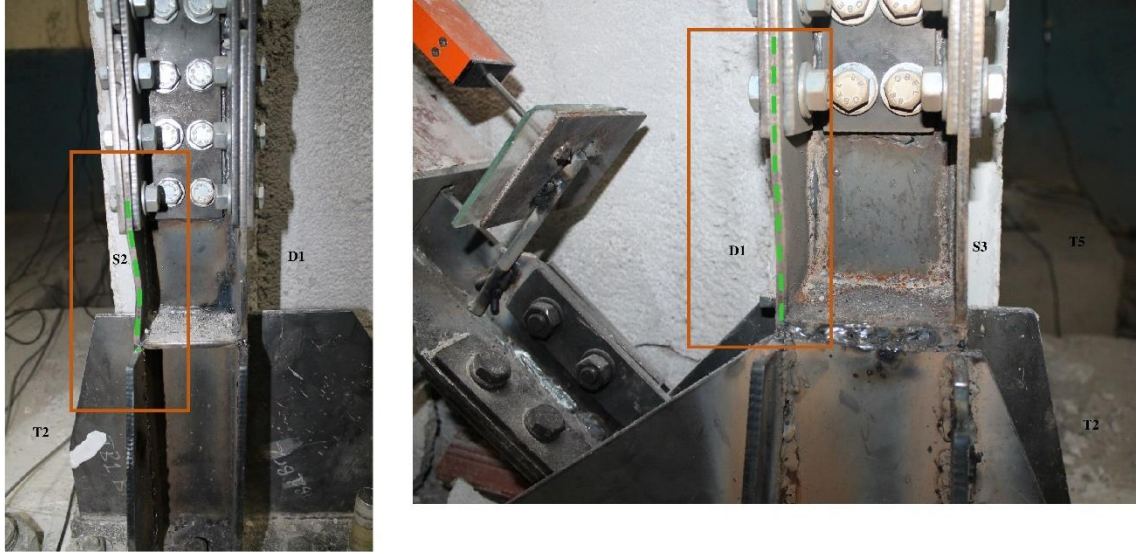
Şekil 4.46. Deney sırasında (%2.0 GKÖO'da) GDE-3'te gözlenen hasarlar (1'inci kısım)



Şekil 4.47. Deney sırasında (%2.0 GKÖÖ’da) GDE-3’te gözlenen hasarlar (2’nci kısım)



Şekil 4.48. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ’da) GDE-3’e ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar



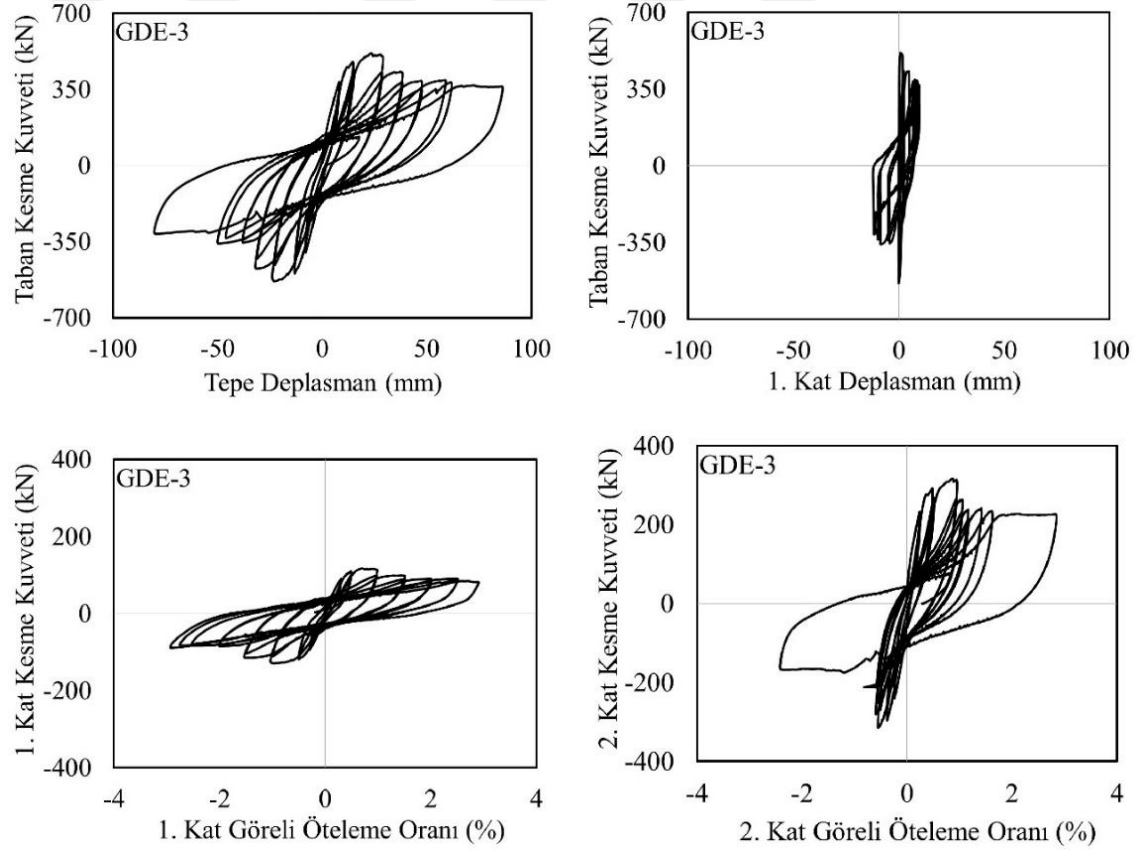
Şekil 4.49. Deney sırasında (%2.5 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait çelik çerçevede gözlenen hasarlar



Şekil 4.50. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait betonarme yapıda gözlenen hasarlar



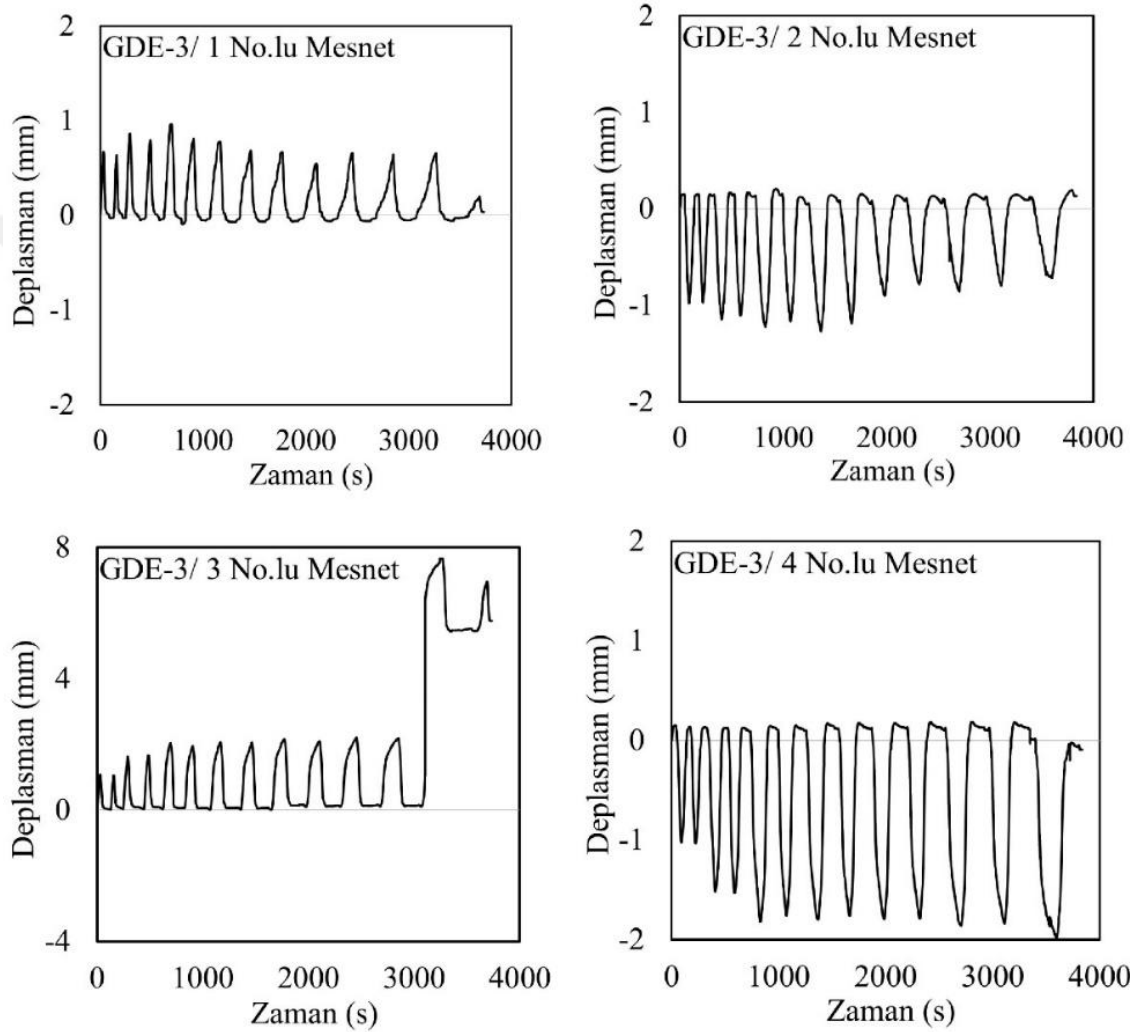
Şekil 4.51. Deney sırasında (%3.0 GKÖÖ'da) GDE-3'e ait çelik çerçevede gözlenen hasarlar



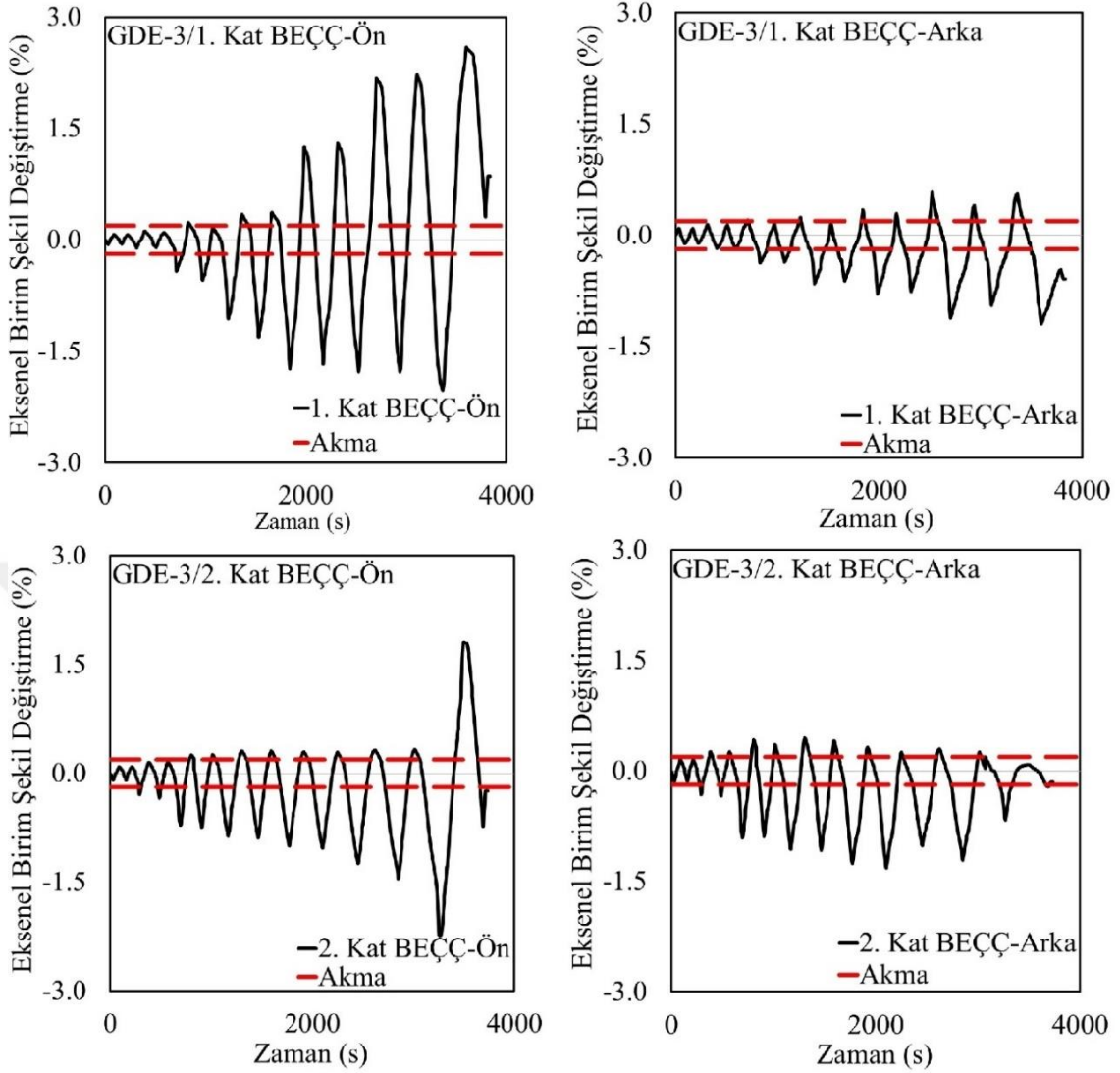
Şekil 4.52. GDE-3'e ait taban kesme kuvveti-tepe deplasman, taban kesme kuvveti-1'inci kat deplasman, 1'inci kat kesme kuvveti-1'inci kat görelî öteleme, 2'nci kat kesme kuvveti-2'nci kat görelî öteleme grafikleri

Tuğla duvarın yatay kapasiteye katkısı birinci kat GKÖÖ'nun %1.0'den sonra azalmaya başladığı esnada BEÇÇ'lerin etkin şekilde yatay yük taşıdığı görülmektedir. Şekil 4.52'de görüldüğü gibi maksimum yatay yük kapasitesi 532 kN'dan yaklaşık

olarak 390 kN civarına düşmüştür ve bu değerde sabit kalmıştır. Dolayısı ile BEÇÇ'lerin sahip olduğu simetrik ve stabil histeretik davranış BEÇÇ'li çerçeve ile güçlendirilen betonarme yapının davranışı üzerinde baskın etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çelik çerçevenin bulunduğu temel sisteminde hasar görülmemesine rağmen Şekil 4.53'te görüldüğü gibi taban plakalarında düşey deplasman meydana gelmiştir. Şekil 4.53'te görülen 3 numaralı mesnetteki ani deplasman artışı deplasman ölçer üzerine tuğla düşmesi sonucu meydana gelmiştir. Söz konusu deplasman değerleri BEÇÇ'li betonarme yapının yatay rijitliği üzerinde etkisi dikkate alınması gerektiği görülmüştür.



Şekil 4.53. GDE-3'e ait çelik çerçeve mesnetleri deplasman-zaman grafikleri



Şekil 4.54. GDE-3'e ait BEÇÇ elemanları eksenel şekil değiştirme-zaman grafikleri

4.2. Deneysel Bulguların Kıyaslanması

Deney sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.55'te karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.5'e bakıldığında GDE-2 ve GDE-3'teki yatay kapasite artışı sırasıyla 3.0 ve 2.6 kat olduğu görülmektedir. Söz konusu deneylerdeki tek farkın kolon ankraj uygulaması olduğu görülmekle beraber elde edilen yatay yük artışı benzerdir. Benzer sonuçlar Şekil 4.55'te deney elemanlarına ait zarf eğrilerinden de görülmektedir. GDE-2 ve GDE-3'teki yatay yük taşıma kapasitesi ve kapasite düşüşünün kontrollü olduğu ve BEÇÇ'li çerçeve tarafından baskın şekilde kontrol edildiği görülmektedir. GDE-2 ve GDE-3'te kullanılan BEÇÇ elemanlarında meydana gelen maksimum birim şekil değiştirme değerleri Çizelge 4.6'da görülmektedir. Çizelgeden de görüleceği üzere birim şekil değiştirme değerleri GDE-2 ve GDE-3 için sırasıyla %1.63 ve %2.60'tır. BEÇÇ'lerde meydana gelen bu plastik davranış BEÇÇ'li çelik çerçeve ile güçlendirilen betonarme yapının yatay yük taşıma kapasitesine doğrudan katkı sağlamaktadır.

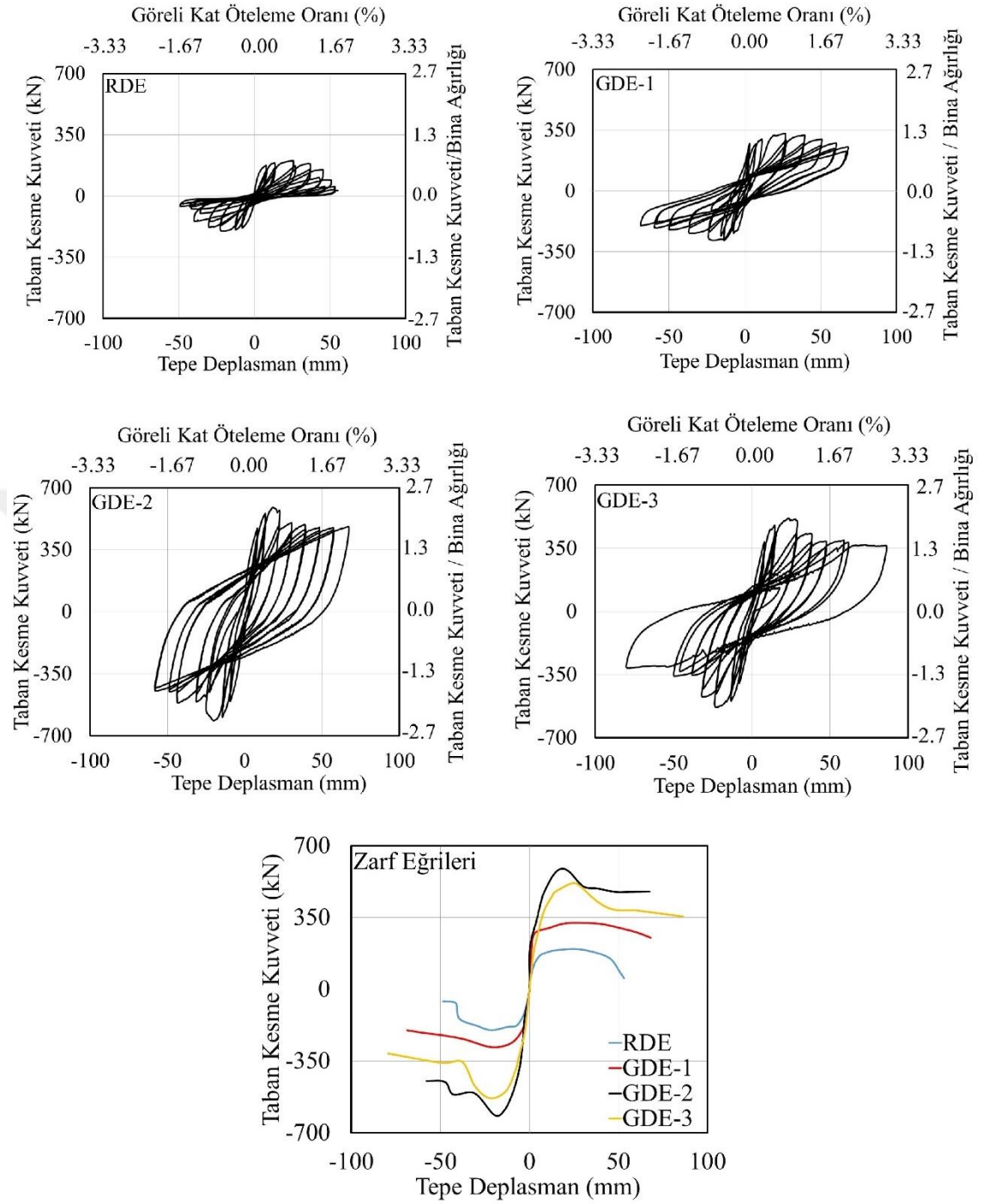
Çizelge 4.5. Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Deney Elemanı	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Taban Kesme Kuvveti Oranı*	Sönümlenen Enerji (kN.m)	Başlangıç Rijitliği (kN/m)	2'nci Kat Maksimum GKÖO (%)
RDE	201.3	1.00	15.68	34.62	1.044
GDE-1	330.8	1.65	36.55	39.27	1.702
GDE-2	613.9	3.05	57.64	62.68	1.010
GDE-3	532.7	2.65	61.76	47.07	2.850

* GDE'ye ait Taban Kesme Kuvveti / RDE'ye ait Taban Kesme Kuvveti

Çizelge 4.6. Deneylerden Elde Edilen Maksimum ÇE Eksenel Birim Şekil Değiştirme ($\epsilon_{y_GDE-1} = \%0.162$, $\epsilon_{y_GDE-2} = \%0.162$, $\epsilon_{y_GDE-3} = \%0.191$)

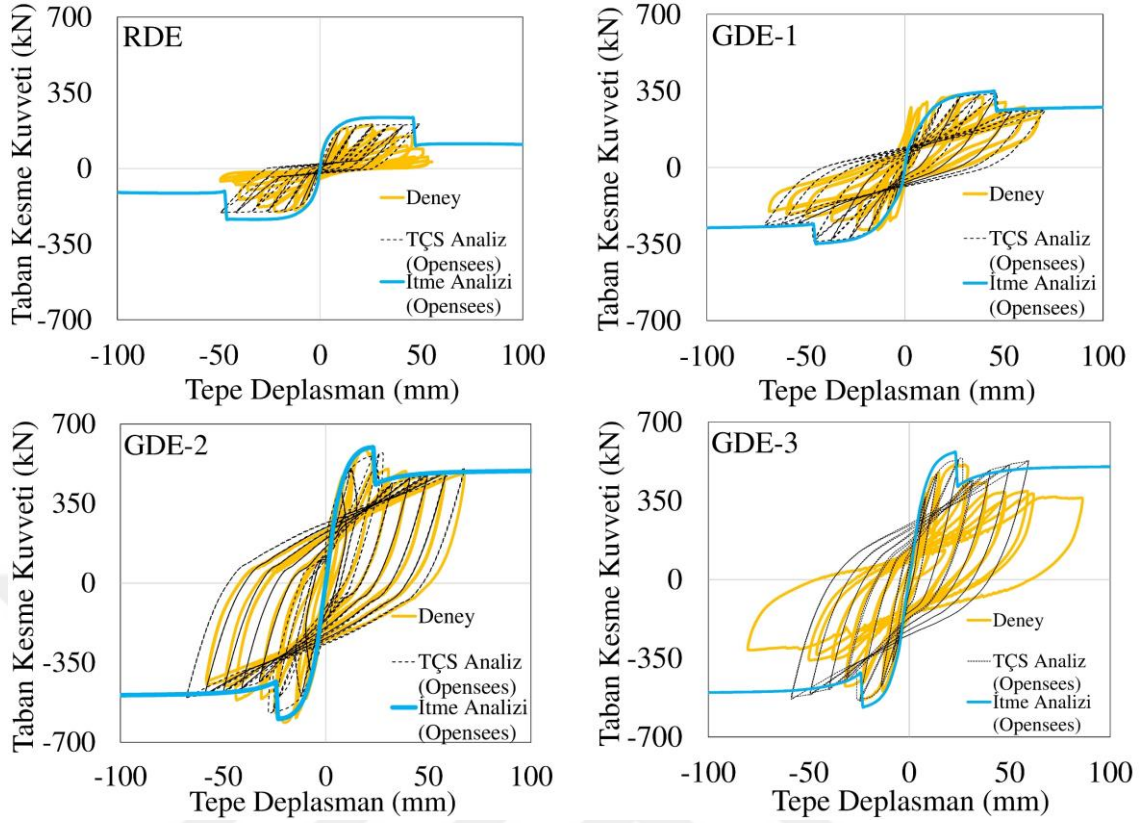
Deney Elemanı	BEÇÇ'lere Ait Maksimum ÇE Eksenel Birim Şekil Değiştirme (%)			
	1'inci Kat		2'nci Kat	
	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme
GDE-1	-0.097	0.304	-0.074	0.062
GDE-2	-1.635	1.149	-0.320	1.044
GDE-3	-2.020	2.596	-2.218	1.784



Şekil 4.55. Deney elemanlarına ait deney sonuçlarının karşılaştırılması

4.3. Analitik Bulgular

Şekil 4.56 deney elemanlarına ait analiz sonuçları taban kesme kuvveti-tepe deplasman grafiği şeklinde verilmiştir. Amerikan standardında (ASCE/SEI41-06 2007) tanımlanan dolgu duvar modelinin kırılğan davranışından dolayı yanal kapasite aniden düşmektedir. Bu davranış, efektif alan için kullanılan denklemlerin ve dolgu duvarının nihai gerilmesinin uygun olduğunu göstermiştir.



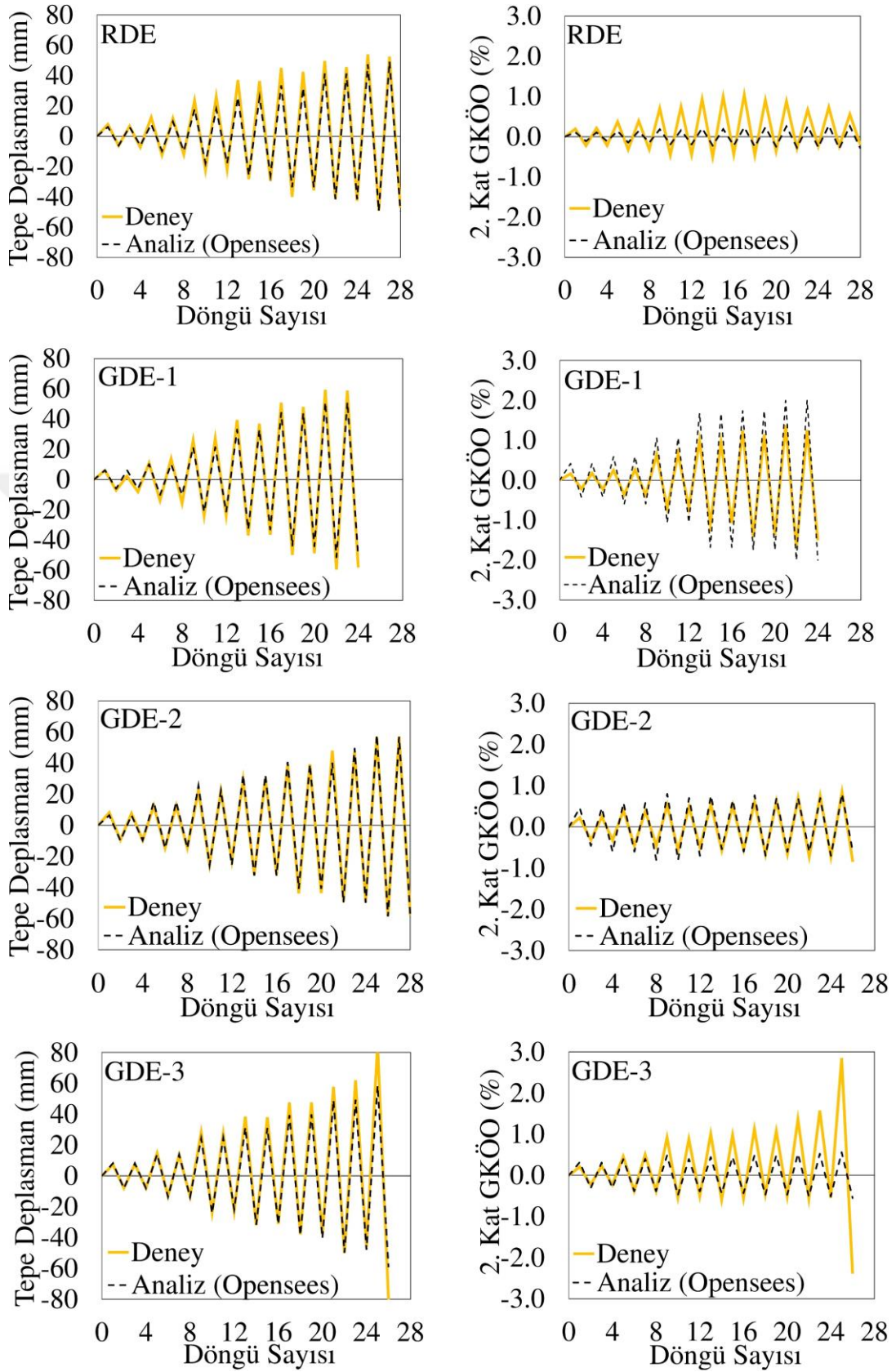
Şekil 4.56. Deney elemanlarına ait analiz sonuçları; taban kesme kuvveti-tepe deplasman

4.4. Deneysel ve Analitik Bulguların Karşılaştırılması

Şekil 4.56 ve 4.57 analiz sonuçlarını göstermektedir. Bu modelleme, test numunelerinin zaman-yer değiştirme ve yük-deformasyon tepkisini makul bir doğrulukla simüle etmeyi sağlamıştır. Çizelge 4.7 deneyler ve analizler arasındaki maksimum taban kesme kuvveti, tepe deplasman, sönümlenen enerji ve ilk rijitlik açısından hataları göstermektedir. RDE'ye ait taban kesme kuvveti %2'den daha az bir hatayla simüle edilmiştir. Öte yandan, RDE için %12'den daha az bir hatayla tepe deplasman tahmin edilebilmiştir. GDE-1'e ait analizler, taban kesme kuvvetini ve tepe deplasmanı (%3.5'ten az) tahmin etmede de oldukça başarılı olmuştur. Ayrıca, GDE-2'ye ait taban kesme için küçük bir hata (%7.5'ten az) ile simüle edilmiştir. GDE-2'ye ait tepe deplasman, %1'den daha az bir hata ile tahmin edilmiştir. GDE-3 için taban kesme kuvveti, %1.5'ten daha az bir hatayla simüle edilmiştir. Öte yandan, tepe deplasman için hata oranı %31 olmuştur. GDE-2 ve GDE-3 için başlangıç rijitliği, deneylerinkiyile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, malzeme davranışındaki olası belirsizlikler, geometrik kusurlar vb. göz önüne alındığında, analiz sonuçlarının, mühendislik sınırları içinde doğru olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 4.7. Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Deney Elemanı	Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)		Hata (%)	Tepe Deplasman (mm)		Hata (%)
	Deney	Analiz		Deney	Analiz	
RDE	201.3	204.5	1.61	55.29	49.11	11.18
GDE-1	330.8	338.3	2.27	68.59	70.76	3.16
GDE-2	613.9	568.8	7.34	67.42	67.75	0.49
GDE-3	532.7	539.4	1.26	86.23	59.42	31.09
Deney Elemanı	Sönümlenen Enerji (kN.m)		Hata (%)	Başlangıç Rijitliği (kN/m)		Hata (%)
	Deney	Analiz		Deney	Analiz	
RDE	15.68	17.68	12.76	34.62	21.92	36.7
GDE-1	36.55	34.85	4.65	29.27	20.91	28.6
GDE-2	57.64	56.60	1.80	62.68	59.58	4.9
GDE-3	61.76	52.51	14.98	47.07	52.01	2.4



Şekil 4.57. Deney elemanlarına ait analiz sonuçları; tepe deplasman-döngü sayısı ve 2'nci kat GKÖÖ-döngü sayısı

5. TARTIŞMA

5.1. BEÇÇ ile Güçlendirme Sisteminin Tartışılması

Deney elemanlarının üretiminden sonra betonarme yapılar BEÇÇ'li çelik çerçeve ile güçlendirilmiştir. GDE-1'in BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile güçlendirilmesinde mevcut yapı temelinden faydalanılmıştır. Söz konusu temel için kullanılan beton dayanımı yaklaşık 7 MPa'dır. Kolon taban plakası ankraj kullanılarak düşük beton dayanımına sahip temele bağlanmıştır. Deney esnasında GDE-1'de her ne kadar yatay yük taşıma kapasitesinde artış meydana gelse de kolon taban plakası-temel birleşiminde meydana gelen hasardan dolayı BEÇÇ'ler kusurlu betonarme yapının yatay yük taşıma kapasitesine tasarlanan seviyede katkı sağlayamamıştır. Böylece bu deneyden sonra BEÇÇ'li çelik çerçeveler için ek temel yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Söz konusu güçlendirme çalışması bina dışından olduğu için ek temel uygulaması gerek işçilik ve gerekse yapı kullanımı açısından herhangi bir olumsuz durum meydana getirmemiştir. GDE-1'de kullanılan BEÇÇ elemanlarında ve çelik çerçevede sınırlı seviyede plastik davranış görülmüştür. Birinci ve ikinci kat BEÇÇ'lerinde meydana gelen maksimum birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla %0.308 ve %0.074 olarak belirlenmiştir ($\epsilon_{akma} = \%0.162$). Deney sonunda gerek BEÇÇ'lerde ve gerekse çelik çerçevede herhangi bir hasar görülmediği için BEÇÇ'ler ve çelik çerçeve (kolon ayakları ve kolon taban plakası yenilenmiştir.) GDE-2'de de kullanılmıştır.

Betonarme yapı kısmı tekrar inşa edilen GDE-2 için GDE-1'de kullanılan BEÇÇ ve çelik çerçeve kullanılmış olup bu deney elemanı için ek temel uygulaması yapılmıştır. Ek temel uygulamasında ilk olarak mevcut bina temeline ankraj delikleri açılmış ve ankrajlar eklenmiştir. Bir sonraki aşamada ise kolon taban plakasının bağlantısını yapacak olan ankrajlar yeni temel sistemi içerisine konulmuş ve yeni temel betonu dökülmüştür. Söz konusu ek temel için kullanılan betonun 7 günlük dayanımının yaklaşık 21 MPa olduğu belirlenmiştir. GDE-1 ve GDE-2 temel hariç hemen hemen bütün detaylar aynı olmakla beraber GDE-2'de eklenen yeni temel deney esnasında hasar almadığı için GDE-2'de BEÇÇ'li çelik çerçeve tasarım kapasitesine ulaşmıştır. GDE-2'de RDE'deki gibi tuğla duvarın hasar almaya başlamasından sonraki yatay kapasite düşüşü görülse de yatay yük kapasitesinin BEÇÇ'li çelik çerçeve tarafından kontrol edildiği görülmüştür. BEÇÇ'lerin hem basınç hem de çekme kapasitelerinin hemen hemen eşit olması ve kararlı histeretik davranışa sahip olmasından dolayı BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile güçlendirilen kusurlu yapının yatay yük taşıma kapasitesi %3 GKÖÖ'ya kadar stabil kalmıştır. Her ne kadar betonarme yapıda hasar seviyesi artsa da yatay yük kapasitesi BEÇÇ'li çelik çerçeve tarafından kontrol edildiğinden dolayı güçlendirilen yapının performansının yeterli olabileceği sonucuna varılmıştır. Deney esnasında birinci ve ikinci katlardaki BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla %1.635 ve %0.629 olarak elde edilmiştir ($\epsilon_{akma} = \%0.162$). BEÇÇ'lere ait eksenel birim şekil değiştirmeden de görüleceği gibi BEÇÇ'ler plastikleşerek enerji sönmülemişlerdir. GDE-2'de gerek temel hasarı ve gerekse BEÇÇ'li çelik çerçeve-betonarme yapı bağlantısında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Bu sayede GDE-2'de BEÇÇ'ler etkin çalışmışlardır. GDE-1'de ise temel hasarından dolayı BEÇÇ'lerde meydana gelen plastik davranış sınırlı olmuştur. Her iki deney elemanında da aynı BEÇÇ ve çelik çerçeve kullanılmasına rağmen GDE-2'deki yatay yük kapasite artışı GDE-1'e göre göre oldukça fazla olmuştur.

GDE-3'te BEÇÇ'li çelik çerçeve ve betonarme yapı arasında sadece kiriş kotunda ankraj kullanılmış olup kolon boyunca ankraj kullanılmamıştır. Dolayısı ile GDE-3 ve GDE-2 arasındaki en belirgin fark BEÇÇ'li çerçeve-betonarme yapı arasında kolon boyunca ankraj uygulamasının olup olmamasıdır. Ayrıca GDE-3'te BEÇÇ-bayrak levhası arasındaki bağlantıda standart dairesel delikler kullanılmış olup GDE-1 ve GDE-2'de bu bağlantı oval delikler (slot) ile sağlanmıştır. GDE-3'te hem BEÇÇ elemanları hem de çelik çerçeve yeni imal edilmiş ve betonarme yapıya eklenmiştir. Deney sonuçlarına göre BEÇÇ elemanlarının plastikleştiği ve yatay yük kapasitesine katkı sağladığı görülmüştür. Deney esnasında birinci ve ikinci katlardaki BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla %2.596 ve %2.240 olarak elde edilmiştir ($\epsilon_{akma} = \%0.191$). BEÇÇ'li çerçevenin temelinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. GDE-3'ün yatay yük taşıma mekanizması GDE-2 ile aynıdır. GDE-3'te de tuğla duvarın yatay yüke katkısı azalmaya başladığında toplam yatay kapasitede düşme meydana gelmiştir. Ancak güçlendirilen yapının yatay yük kapasitesi BEÇÇ'li çelik çerçeve tarafından baskın şekilde kontrol edildiğinden kapasite düşüşü sınırlı kalmış olup %3.0 GKÖO'ya kadar hemen hemen stabil kalmıştır. GDE-3 ve GDE-2'de betonarme yapının %3.0 GKÖO'dan sonra ağır hasar aldığı görülse de yatay yük taşıma kapasitesinde düşüş sınırlı kalmıştır. GDE-3'te GDE-2'ye göre en belirgin davranış farkı ise ikinci kattaki BEÇÇ'lerin birim uzama değeri %2.24 olarak ölçülmesidir. Birim uzama miktarındaki bu artışın özellikle betonarme yapıda meydana gelen hasarın artması ile birlikte olduğu görülmüştür. Ayrıca GDE-3'te BEÇÇ-bayrak levhasındaki bağlantının slot delikler yerine standart dairesel delikler kullanılarak yapılması plakalar arası kayma miktarını sınırlandırmıştır. GDE-2'de BEÇÇ-bayrak levhası bağlantısında birinci katta yaklaşık 5.7 mm kayma görülürken (Şekil 8.32) bu değer GDE-3'te yaklaşık 0.1 mm civarındadır (Şekil 8.36). Her iki deney elemanında BEÇÇ sisteminin tasarlandığı şekli ile performans sağladığı görülmüştür.

5.2. BEÇÇ ile Güçlendirme Tasarımı

BEÇÇ'li çelik çerçeveler ile güçlendirilen yapıların tasarımında ilk olarak mevcut yapı modellenmelidir. Mevcut yapı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2019) ilgili kısmındaki modelleme esaslarına göre modellenebilir. Mevcut yapının TBDY (2019)'a göre performansı yeterli değilse güçlendirme çalışmasına başlanmalıdır. Mevcut yapı sistemine eklenecek olan BEÇÇ'li çelik çerçevelerin yerleri ve dolayısı ile sayısı belirlenmelidir. BEÇÇ'lerin ÇE en kesitleri belli olmadığı için deneme yanılma yöntemi ile ÇE enkesitleri belirlenmelidir. Bunun için ilk olarak bir ÇE en kesit alınmalı ve TBDY (2019)'a göre performans analizi yapılarak yapının yeterli performansa sahip olup olmadığı saptanmalıdır. Bu işlem çok uzun süreceği için ÇE enkesit alanının başlangıç tercihi şu şekilde yapılabilir: İlk olarak $R=1.5-3$ (Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) 1a ve 2a için $R=1.5$, DTS 1, 2, 3, 3a, 4, 4a için $R=3$ alınabilir) arasında bir değer ile TBDY (2019)'a göre yapıya gelecek olan toplam kesme kuvveti $S_{ae}(T)=S_{DS}$ kabulü yapılarak belirlenmelidir. Bu kesme kuvvetinin tamamının BEÇÇ'li çelik çerçeve tarafından taşındığı varsayılarak her bir BEÇÇ'li çerçevenin taşıması gerekli olan yatay yük değeri belirlenmelidir. Çelik çerçeve kolon-kiriş bağlantısının mafsallı olacak şekilde tasarlanması durumunda BEÇÇ'li çerçeveye gelen yatay yükün sadece BEÇÇ'ler tarafından taşındığı varsayımı yapılarak ÇE için ilk enkesit alanı tayin edilmiş olacaktır. Bu işlem ardından yapının performans analizi yapılacak ve yeterli performansa sahip olup olmadığı belirlenecektir. Bu işlem yapı

yeterli performansa sahip olana kadar tekrarlanacaktır. Gerekli ÇE enkesit belirlendikten sonra BEÇÇ üretimine geçilecektir. Bu üretim esnasında kullanılacak olan malzeme kalitesinin tasarımda belirlenen malzeme ile aynı olmasına özen gösterilmelidir. Ayrıca eğer mümkünse üretilecek olan BEÇÇ sayısı güçlendirme için gerekli sayıdan fazla olmalıdır. Üretimden sonra rastgele alınacak BEÇÇ elemanın beklenen histeretik davranış gösterdiğinden emin olunması için BEÇÇ elemanı eleman bazında veya çerçeve benzeri sistem içerisinde test edilmelidir. Çelik çerçeve tasarımı TBDY (2019) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (ÇYTHYE 2018) uygun olması yeterlidir. Bu tasarımda ilk olarak bayrak levhası tasarımı Eşdeğer Kuvvet Metoduna (AISC 1994), Uniform Force Method) göre yapılabilir. Bayrak levhası tasarımında bayrak levhasının BEÇÇ'lerin aksel çekme ve basma istemleri altında stabil kalabilmesi için Whitmore (1952) ve Thornton (1984) çalışmalarından faydalanılabilir. BEÇÇ ile bayrak levhası arasında bağlantıda montaj problemi olmayacak ise standart dairesel delikler kullanılabilir eğer sorun olma durumu var ise oval delik (slot) tercih edilebilir. Bu durumda sürtünme etkili birleşim hesaplarında sürtünme katsayısı için alınan değer ile bağlantıda kullanılan plaka yüzeylerinin aynı olmasına dikkat edilmelidir. BEÇÇ elemanları hem basma hem de çekme istemleri altında benzer davranış gösterdikleri için BEÇÇ'li çerçeve modelinde makas/çapraz (truss member) olarak tanımlanabilir. Analiz sonuçlarında BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme değerlerinin BEÇÇ üretimde test edilmiş elemanlar tarafından da yeterli histeretik performansı sağladıklarından emin olunması gerekmektedir. BEÇÇ'li çelik çerçeve tasarımdan sonra temel tasarımı yapılmalıdır, mümkünse ek yeni temel yapılması daha uygundur. BEÇÇ'li çelik çerçeve ve betonarme yapı arasındaki bağlantı bina kat kotu seviyesinde ve kolonlar boyunca yapılabilir. Ankraj sayısı BEÇÇ'li çelik çerçevenin yatay yük kapasitesine göre yapılabilir. Ankraj derinliği ve sayısında ankraj çubuğunun kesme kapasitesi ile ankraj deliğinde beton ezilmesi değerlerinden küçük olan dikkate alınacak ve belirlenen kuvvete (BEÇÇ'li çelik çerçevenin yatay yük kapasitesine) göre hesaplanacaktır. Son olarak BEÇÇ'li çelik çerçeve ile betonarme yapı arasında kalan hacimsel boşluklar C25 ve üzeri beton ile doldurulacaktır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında depreme karşı kusurlu binaların yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik gibi özelliklerini iyileştirmek için yeni bir güçlendirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu nedenle biri güçlendirilmemiş (referans), diğer üçü ise güçlendirilmiş olmak üzere toplamda dört adet deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanları, ülkemizde mevcut kusurlu yapıları temsil edebilmek adına, düşük dayanımlı betona (5-12 MPa), sargısız kolon ve kirişlere, sargısız kolon-kiriş birleşimine, 90 derece bükülmüş etriyelere, düz boyuna donatı ve güçlü kiriş zayıf kolon uygulaması ve yetersiz bindirme boyuna sahip olacak şekilde üretilmişlerdir. Deney elemanlarının gözlemlenen davranışlarına dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Depreme karşı kusurlu betonarme yapı, %1.0 GKÖO'ya kadar önemli ölçüde hasar almıştır. Aslında, dolgu duvarın hasarı, yatay yük taşıma kapasitesinin düşmesini hızlandırmıştır. Ayrıca, test sırasında yetersiz bindirme boyundan dolayı betonarme kolonların alt kısmında ağır hasar gözlemlenmiştir. Bu hasarlardan dolayı oluşacak can ve mal kaybını önlemek için betonarme yapıların uygun bir teknikle güçlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

- BEÇÇ'li çelik çerçeveler, depreme karşı kusurlu betonarme yapının yatay rijitliğini, yatay yük taşıma kapasitesini ve enerji sönümleme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca, BEÇÇ'li sistemlerde artan GKÖO'larında yatay yük taşıma kapasitesindeki düşüş BEÇÇ'ler tarafından kontrol edilmiştir. Ek olarak, BEÇÇ'ler, betonarme yapıda aşırı plastik deformasyon meydana gelmeden önce önemli ölçüde plastikleşmişlerdir. Dolayısıyla bu sonuç, güçlendirilmiş yapının enerji sönümleme kapasitesini artırmıştır.

- BEÇÇ'li çelik çerçevelerin uygulaması, yapıyı boşaltma ihtiyacı duyulmaksızın betonarme yapının dışında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, bu sistemler, depreme karşı kusurlu betonarme binaların güçlendirilmesi için aday bir teknik olarak görünmektedir.

- BEÇÇ'li çelik çerçeveler ve betonarme yapılar arasında önerilen bağlantı detayları, betonarme yapıda önemli bir hasar olmadan kritik noktalarda (BEÇÇ'lerin ÇE'si) plastik deformasyonu sağlamakta başarılı olmuştur.

- Analizlerde önerilen modelleme stratejisi, deney elemanlarının makul bir mühendislik doğruluğu ile simüle etmede başarılı olmuştur. BEÇÇ'lerin çubuk elemanlar olarak modellenmesinin uygun bir simülasyon stratejisi olduğu görülmüştür. Dolgu duvarlar için eleman kaldırma algoritmasının kullanılması, analiz sonuçlarını iyileştirmiştir. Ayrıca, analiz sonuçları, analiz sırasında taban plakasının düşey hareketinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

- BEÇÇ elemanlarının tasarımı ve bağlantı detayları yeterli histeretik performans sergilediklerini göstermiştir. BEÇÇ'lerin ÇE'si basınç yükü altında, bayrak levhası ve ankraj çubuklarında herhangi bir yerel ve global hasar olmadan, %2.5 birim şekil değiştirme değerine kadar çıkmıştır.

Sonuç olarak, sünek olmayan betonarme yapılar için BEÇÇ'li çelik çerçeve sistemlerinin kullanımı etkili, hızlı ve ekonomik bir güçlendirme tekniği olarak

görülmektedir. Bu sistemlerin uygulaması, mimari kaygı olmaksızın az ve orta katlı binalar için de uygun olabilir. Özellikle deprem bölgelerinde bulunan gelişmekte olan ülkeler için dış güçlendirme uygulamalarının sayısı arttırılmalıdır.



7. KAYNAKLAR

- ACI 318-14 2014. Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- AISC 1994. Manual of Steel Construction Load&Resistance Factor Design.
- ASCE/SEI41-06 2007. Seismic rehabilitation of existing buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ASTM-E8/E8M 2007. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- Badoux, M. and Jirsa, J.O. 1990. Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting. *Journal of Structural Engineering*, 116(1): 55-74.
- Bahadır, F. 2012. Düzlem dışı perde duvarla güçlendirilmiş deprem davranışı yetersiz betonarme çerçevelerin davranışına pencere boşluklarının etkisi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Balkaya, C. 2017. Invention: Seismic Retrofitting By Exterior Steel Brace Structural Building Jacketing System, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, pp. 679-688, Baku, Azerbaijan.
- Binici, B. 2010. Betonarme çerçevelerin yapısal çelik elemanlarla güçlendirilmesi için tasarım metotları geliştirilmesi. 106M493, TÜBİTAK.
- Bush, T.D. Jones, E.A. and Jirsa, J.O. 1991. Behavior of RC frame strengthened using structural steel bracing. *Journal of Structural Engineering*, 117(4): 1115-1126.
- Cagatay, I.H. 2005. Experimental evaluation of buildings damaged in recent earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 12(3): 440-452.
- Cao, X.-Y., Feng, D.-C. and Wu, G. 2019. Seismic performance upgrade of RC frame buildings using precast bolt-connected steel-plate reinforced concrete frame-braces. *Engineering Structures*, 195: 382-399.
- Cao, X.-Y., Feng, D.-C. and Wu, G. 2021. Pushover-based probabilistic seismic capacity assessment of RCFs retrofitted with PBSPC BRBF sub-structures. *Engineering Structures*, 234.
- Dhakal, R.P. and Maekawa, K. 2002. Modeling for postyield buckling of reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, 128(9): 1139-1147.
- Dogangun, A. 2004. Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, 26(6): 841-856.
- Ecemis, A.S., Korkmaz, H.H. and Dere, Y. 2021. Seismic performance improvement of RC buildings with external steel frames. *Computers and Concrete*, 27(4): 43-353.
- FEMA 273, 1997. Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency: Volume I, Redwood City, California, USA.
- Formisano, A., Massimilla, A., Di Lorenzo, G. and Landolfo, R. 2020. Seismic retrofit of gravity load designed RC buildings using external steel concentric bracing

- systems. *Engineering Failure Analysis*, 111.
- Furukawa, T. et al. 2004. Experimental study on seismic retrofit of RC buildings using external steel portal frames. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Gorgulu, T., Tama, Y.S., Yilmaz, S., Kaplan, H. and Ay, Z. 2012. Strengthening of reinforced concrete structures with external steel shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 70: 226-235.
- Görgülü, A.T. 2008. Mevcut yapıların güçlendirilmesinde dış çelik konstrüksiyon perde uygulanması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Hsiao, F.-P. et al. 2013. Field test for school building retrofitted by external steel-framing system. 5th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Taipei, Taiwan.
- Islam, S., Huang, S., Skokan, M. and Mostafa, K. 2006. Performance based seismic retrofit of a high-rise tower using buckling restrained braced frames. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA.
- Jung, J.-S., Kim, K.-H. and Lee, K.-S. 2021. Seismic performance of two-story RC frame retrofitted using external steel frame equipped with length-adjustment device by pseudodynamic test. *Journal of Earthquake Engineering*: 1-27.
- Jung, J.-S. and Lee, K.-S. 2020. Pseudodynamic testing of buildings retrofitted with external steel reinforced concrete frames to increase lateral strength for earthquake damage prevention. *Shock and Vibration*, 2020: 1-21.
- Kaltakci, M.Y., Arslan, M.H., Yilmaz, U.S. and Arslan, H.D. 2008. A new approach on the strengthening of primary school buildings in Turkey: An application of external shear wall. *Building and Environment*, 43(6): 983-990.
- Kaltakci, M.Y., Ozturk, M. and Arslan, M.H. 2010. An experimental investigation for external RC shear wall applications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9): 1941-1950.
- Kamanlı, M., Korkmaz, H.H., Balık, F.S. and Bahadır, F. 2011. Sünek olmayan B/A çerçevelerin, çelik çaprazlarla, B/A dolgu duvarlarla ve çelik levhalar ile güçlendirilmesi. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, ss. 1-9, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Kaplan, H., Yilmaz, S., Cetinkaya, N. and Atımtay, E. 2011. Seismic strengthening of RC structures with exterior shear walls. *Sadhana*, 36(1): 17-34.
- Karsan, I.D. and Jirsa, J.O. 1969. Behavior of concrete under compressive loadings. *Journal of Structural Division (ASCE)*, ST12(95): 2543-2563.
- Kent, D.C. and Park, R. 1971. Flexural members with confined concrete. *Journal of Structures Division (ASCE)*, ST7(97): 1969-1990.
- Liu, C., Shi, J., Hiroshi, K., Taguchi, T. and Kamiya, T. 2016. Experiment study on RC frame retrofitted by the external structure. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(3): 563-574.
- López, O.A., Hernández, J.J., Del Re, G. and Puig, J. 2006. Seismic risk reduction of

- school buildings in Venezuela. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA.
- López, O.A., Hernández, J.J., Del Re, G., Puig, J. and Espinosa, L. 2007. Reducing seismic risk of school buildings in Venezuela. *Earthquake Spectra*, 23(4): 771-790.
- Maziliguney, L., Yaman, I.O. and Azili, F. 2008. In-situ concrete compressive strength of residential, public and millitary structures. 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus.
- Mazzoni, F.M., McKenna, H., Scott, M.H. and Fenves, G.L. 2007. OpenSees Command Language Manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Mowrtage, W. 2013. Parallel steel frame technique for seismic strengthening of rc structures: case study. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 07(05).
- Ozcelik, R. 2016b. Buckling restrained braces. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3): 160-170.
- Ozcelik, R., Binici, B. and Akpinar, U. 2013. Seismic retrofit of non-ductile reinforced concrete frames with chevron braces. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 166(7): 326-341.
- Ozcelik, R., Binici, B. and O., K. 2012. Pseudo dynamic testing of an RC frame retrofitted with chevron braces. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(4): 515-539.
- Ozcelik, R., Dikiciasik, Y. and Erdil, E.F. 2017. The development of the buckling restrained braces with new end restrains. *Journal of Constructional Steel Research*, 138: 208-220.
- Ozcelik, R. and Erdil, E.F. 2019. Pseudodynamic test of a deficient RC frame strengthened with buckling restrained braces. *Earthquake Spectra*, 35(3): 1163-1187.
- Ozkok, M.E. 2010. Seismic upgrade of deficient reinforced concrete frames using external systems. Msc Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Ozkok, M.E., Ozcelik, R. and Binici, B. 2009. Performance comparisons of external strengthening methods for deficient RC frames. ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, pp. 926-936, San Francisco, California.
- Özçelik, R. 2016a. Burkulması engellenmiş çelik çaprazların geliştirilmesi ve betonarme binaların depreme karşı güçlendirilmesinde kullanımının araştırılması. 118M820, Ankara, Turkey.
- Öztürk, M. 2010. Deprem dayanımı yetersiz betonarme çerçevelerin bağ kirişli dış perde duvar uygulaması ile güçlendirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Pincheria, J.A. and Jirsa, J.O. 1995. Seismic response of RC frames retrofitted with steel braces or walls. *Journal of Structural Engineering*, 121(8): 1225-1235.

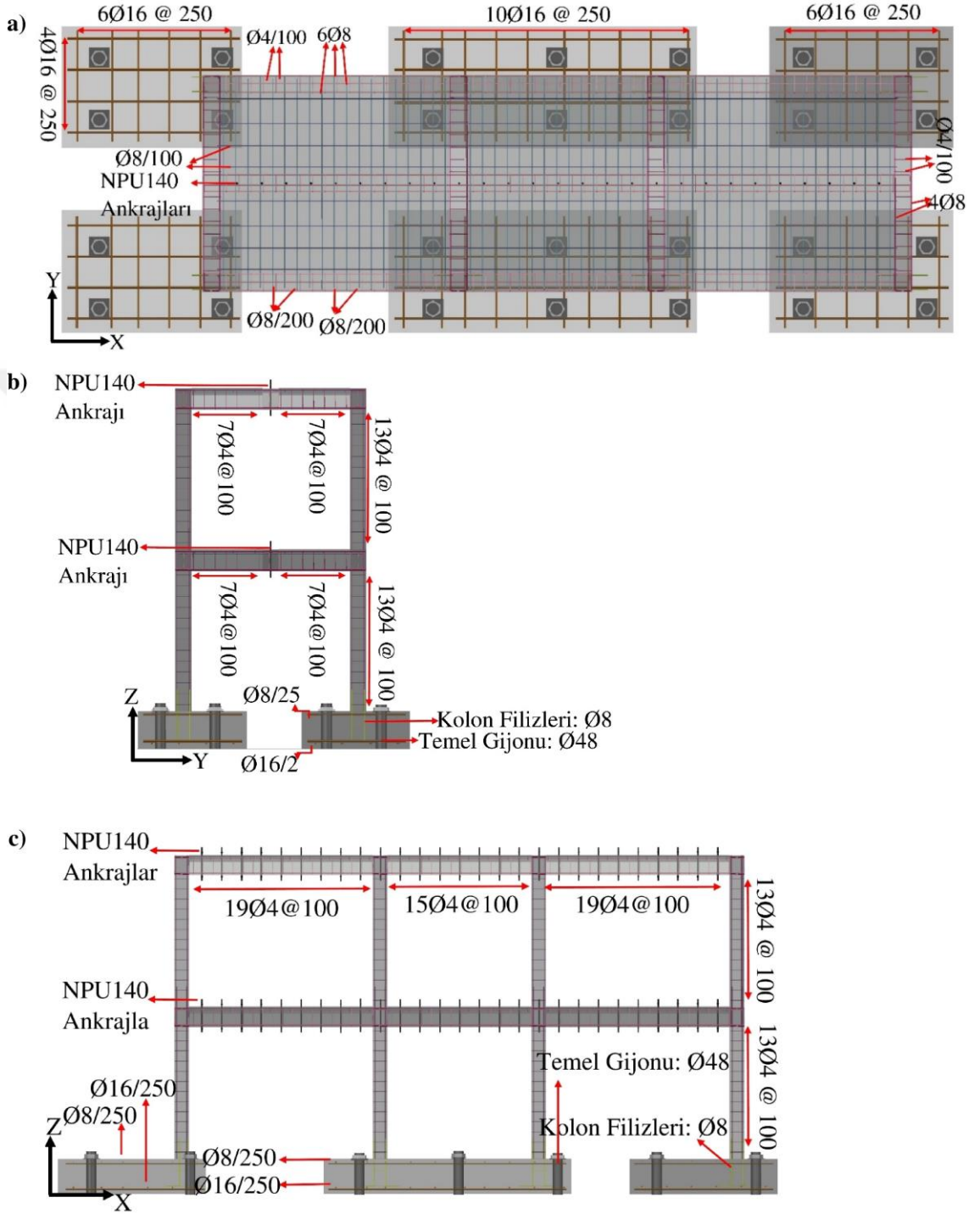
- Popovics, S. 1973. A numerical approach to the complete stress strain curve for concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5): 1804-1825.
- Reggio, A., Restuccia, L., Martelli, L. and Ferro, G.A. 2019. Seismic performance of exoskeleton structures. *Engineering Structures*, 198: 1-11.
- Shih, C.T. et al. 2015. In situ test of school buildings retrofitted with external steel-framing systems. *Journal of Structural Engineering*, 141(1).
- Silva, J.F. and Hoeler, M.S. 2007. Seismic design provisions for anchors in the U.S. 2nd International Symposium on Connections between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Germany
- Sucuoglu, H. et al. 2006. Developing retrofit solutions for the residential building stocks in Istanbul. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
- Sutcu, F. et al. 2020. Experimental and analytical studies of sub-standard RC frames retrofitted with buckling-restrained braces and steel frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(5): 2389-2410.
- Talaat, M. and Mosalam, K.M. 2008. Computational modeling of progressive collapse in reinforced concrete frame structures. 2007/10, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Tasdemir, M.A., Özkul, M.H. and Atahan, H.N. 1999. Recent earthquakes in Turkey and concrete. 2nd National Urban Infrastructure Symposium, pp. 9-19, Adana, Turkey.
- ÇYTHYE 2016. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, Türkiye.
- TDY 1998. Afet bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Ankara.
- TDY 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Ankara.
- Tezcan, S.S. and Ipek, M. 1996. A reconnaissance report: 1995 Dinar, Turkey, earthquake. *Engineering Structures*, 18(12): 906-916.
- Timler, P.A. and Sherstoboff, J.G., 1995. Externally mounted ductile frame, seismic retrofit for the British Coloumbia Institute of Technology SW1 Main Building. 7th Canadian Conference on Earthquake Engineering, pp. 903-910, Montreal.
- Thornton, W.A. 1984. Bracing connections for heavy construction. *Engineering Journal of AISC*, 21: 139-148.
- TS EN 12390-1 2013. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. Türk Standartları enstitüsü, Ankara.
- TS 500 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartları enstitüsü, Ankara.
- TS 708 2016. Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği. Türk Standartları enstitüsü, Ankara.
- Unal, A. and Kaltakci, M.Y. 2016. Seismic behavior of concentrically steel braced frames and their use in strengthening of reinforced concrete frames by external application. *Steel and Composite Structures*, 21(4): 687-702.

- Unal, A. et al. 2013. Strengthening of reinforced concrete frames not designed according to TDY2007 with external shear walls. *Advanced Materials Research*, 747: 433-436.
- Whitmore, R.E. 1950. Experimental investigation of stresses in gusset plates. Msc Thesis, University of Tennessee, Knoxville, USA.



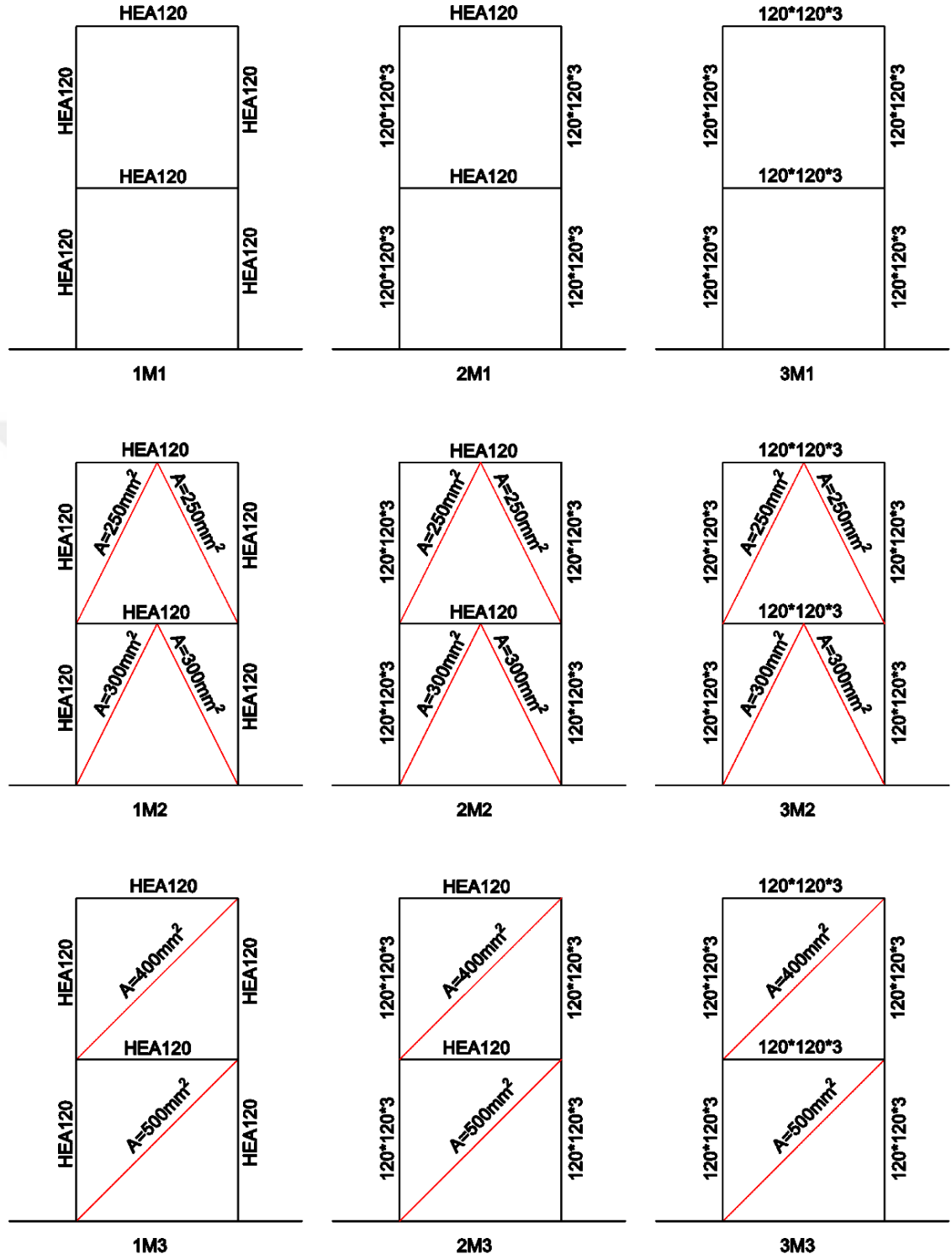
8. EKLER

EK-1. Deney Elemanlarına ait Donatı Detayları

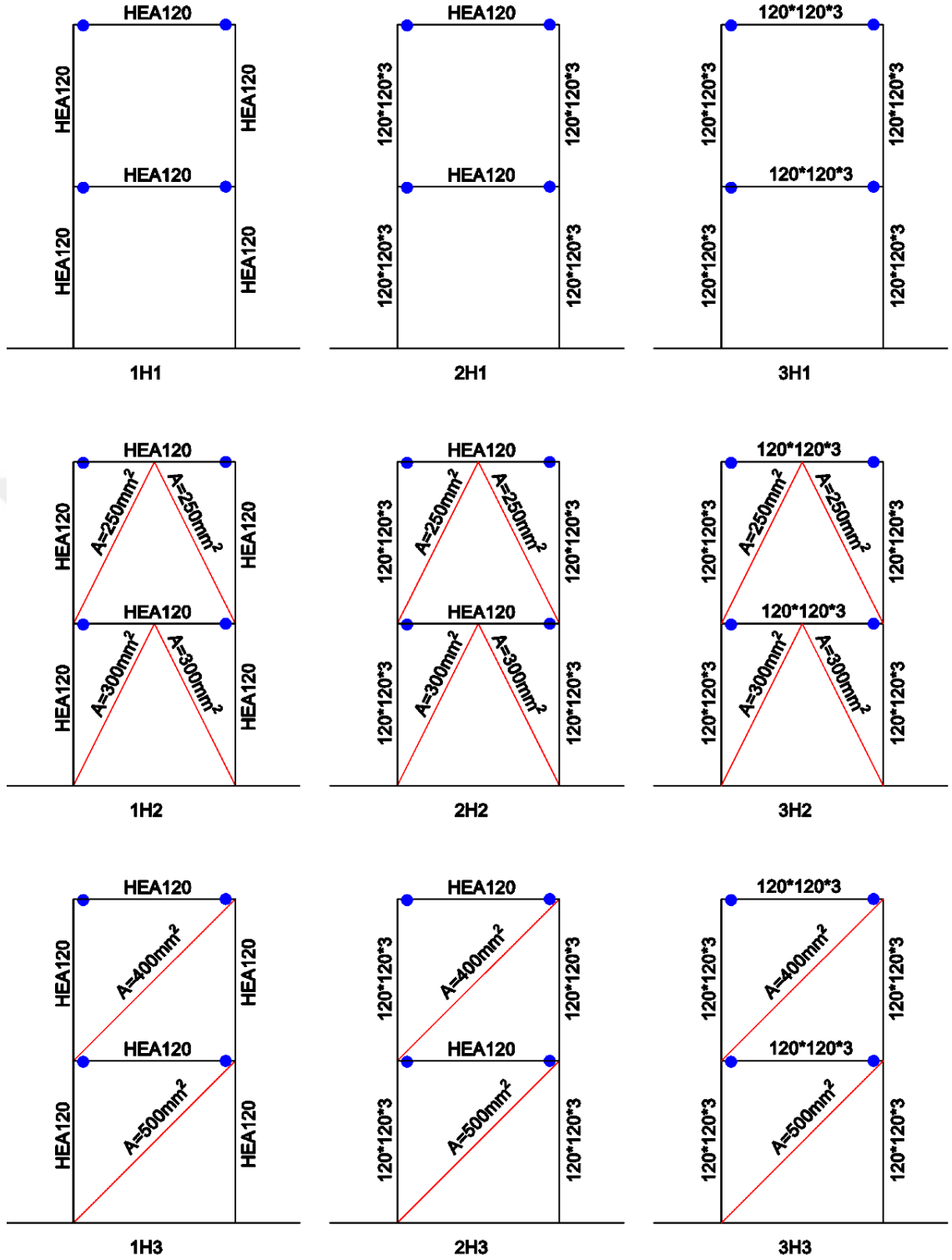


Şekil 8.1. Deney elemanlarına ait donatı detayları **a)** üst görünüş; **b)** sol ve sağ görünüş; **c)** ön görünüş

EK-2. Çelik Çerçeve Ön Tasarımı



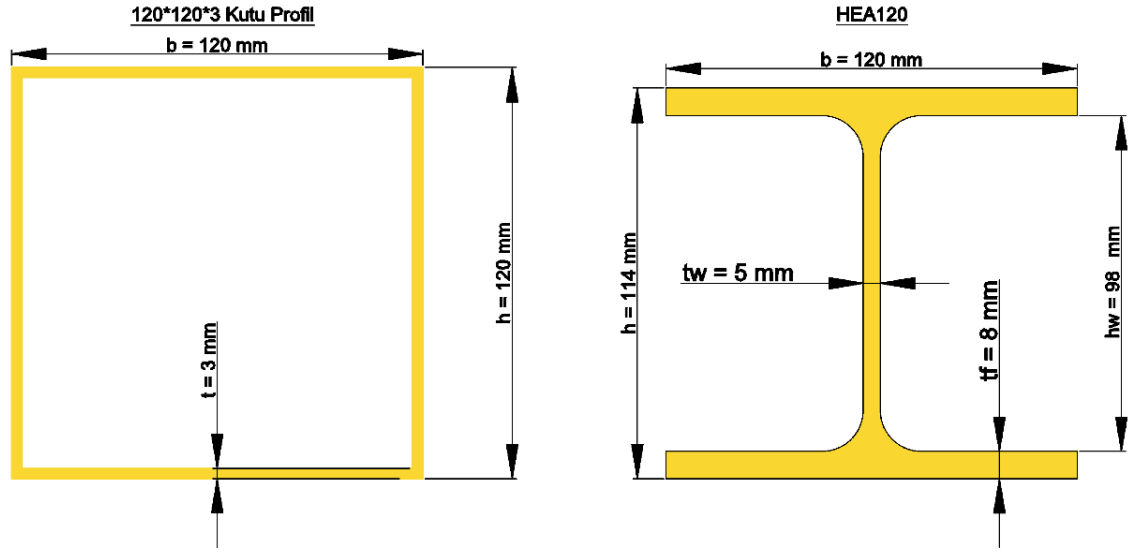
Şekil 8.2. Ön tasarım çerçeveleri (moment aktaran çerçeveler)



Şekil 8.3. Ön tasarım çerçeveleri (moment aktarmayan çerçeveler)

Çizelge 8.1. Çerçevelere ait ağırlık ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri

Çerçeve	Ağırlık (kg)	Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)
1H1	179.00	24.04
2H1	125.89	9.57
3H1	99.84	9.58
1H2	179.00	120.72
2H2	125.89	111.96
3H2	99.84	111.81
1H3	179.00	142.23
2H3	125.89	128.20
3H3	99.84	129.01
1M1	179.00	68.32
2M1	125.89	31.72
3M1	99.84	30.60
1M2	179.00	159.20
2M2	125.89	122.85
3M2	99.84	122.83
1M3	179.00	143.01
2M3	125.89	139.15
3M3	99.84	137.79



Şekil 8.4. Ön tasarım çerçevelerinde kullanılan profillere ait kesitler

EK-3. BEÇÇ'lere ait ÇE'lerin Enkesit Alanının Hesabı

Tuğla duvar özellikleri

Basınç kapasitesi:

$$f_{dc} = 3764 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kalınlığı: $t_{\text{duvar}} = 0.125 \text{ m}$

Yüksekliği: $h_{\text{duvar}} = 1.3 \text{ m}$

Uzunluğu: $L_{\text{duvar}} = 1.45 \text{ m}$

Elastisite Modülü:

$$E_m = 550 \times f_{dc} \quad (\text{E3.1})$$

$$E_m = 550 \times 3764 = 2070200 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Betonun Elastisite Modülü:

$$E_c = 24277400 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kolon brüt atalet momenti:

$$I_g = \frac{1}{12} \times b \times (h^3) \quad (\text{E3.2})$$

$$I_g = \frac{1}{12} \times (0.15^4) = 4.218 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Kolon efektif atalet momenti:

$$I_{\text{kolon}} = 0.5 \times I_g \quad (\text{E3.3})$$

$$I_{\text{kolon}} = 2.109 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Duvarın diyagonal uzunluğu:

$$R_{\text{duvar}} = \sqrt{h_{\text{duvar}}^2 + L_{\text{duvar}}^2} \quad (\text{E3.4})$$

$$R_{\text{duvar}} = 1.95 \text{ m}$$

Duvarın diyagonal açısı:

$$\theta_{\text{duvar}} = \arctan\left(\frac{h_{\text{duvar}}}{L_{\text{duvar}}}\right) \quad (\text{E3.5})$$

$$\theta_{\text{duvar}} = 42$$

Kolon ortası ve kat ortası arasındaki diagonal uzunluk:

$$L_{\text{diya}} = \sqrt{h_{\text{kolon}}^2 + L_{\text{kolon}}^2} \quad (\text{E3.6})$$

$$L_{\text{diya}} = 2.193 \text{ m}$$

Kiriş-kolon arasındaki diyaagonal açı:

$$\theta_{\text{diya}} = \arctan\left(\frac{h_{\text{kolon}}}{L_{\text{kolon}}}\right) \quad (\text{E3.7})$$

$$\theta_{\text{diya}} = 43.15$$

Duvar eşdeğer basınç alanı hesabı:

$$\lambda_{\text{duvar}} = \sqrt{\frac{E_m \times t_{\text{duvar}} \times \sin(2\theta_{\text{duvar}})}{E_{fc} \times I_{\text{kolon}} \times h_{\text{duvar}}}} \quad (\text{E3.8})$$

$$\lambda_{\text{duvar}} = 3.13$$

Duvar eşdeğer basınç genişliği:

$$a_{\text{duvar}} = 0.175 \times (\lambda \times h_{\text{kolon}})^{-0.4} \times r_{\text{duvar}} \quad (\text{E3.9})$$

$$a_{\text{duvar}} = 0.18355$$

Duvar eksenel rijitliği:

$$k_{\text{duvar}} = \frac{a \times t_{\text{duvar}} \times E_m}{r_{\text{duvar}}} \quad (\text{E3.10})$$

$$k_{\text{duvar}} = 24389.6$$

Duvar eşdeğer elemanın alanı:

$$A_{\text{duvar}} = \frac{k_{\text{duvar}} \times L_{\text{diya}}}{E_m} \quad (\text{E3.11})$$

$$A_{\text{duvar}} = 0.026 \text{ m}^2$$

Bu durumda tuğla duvarın eksenel olarak taşıyabileceği yük kapasitesi

$$P_{\text{duvar}} = f_{dc} \times A_{\text{duvar}} \quad (\text{E3.12})$$

$$P_{\text{duvar}} = 3764 \times 0.026 = 97.864 \text{ kN}$$

olarak hesaplanmıştır.

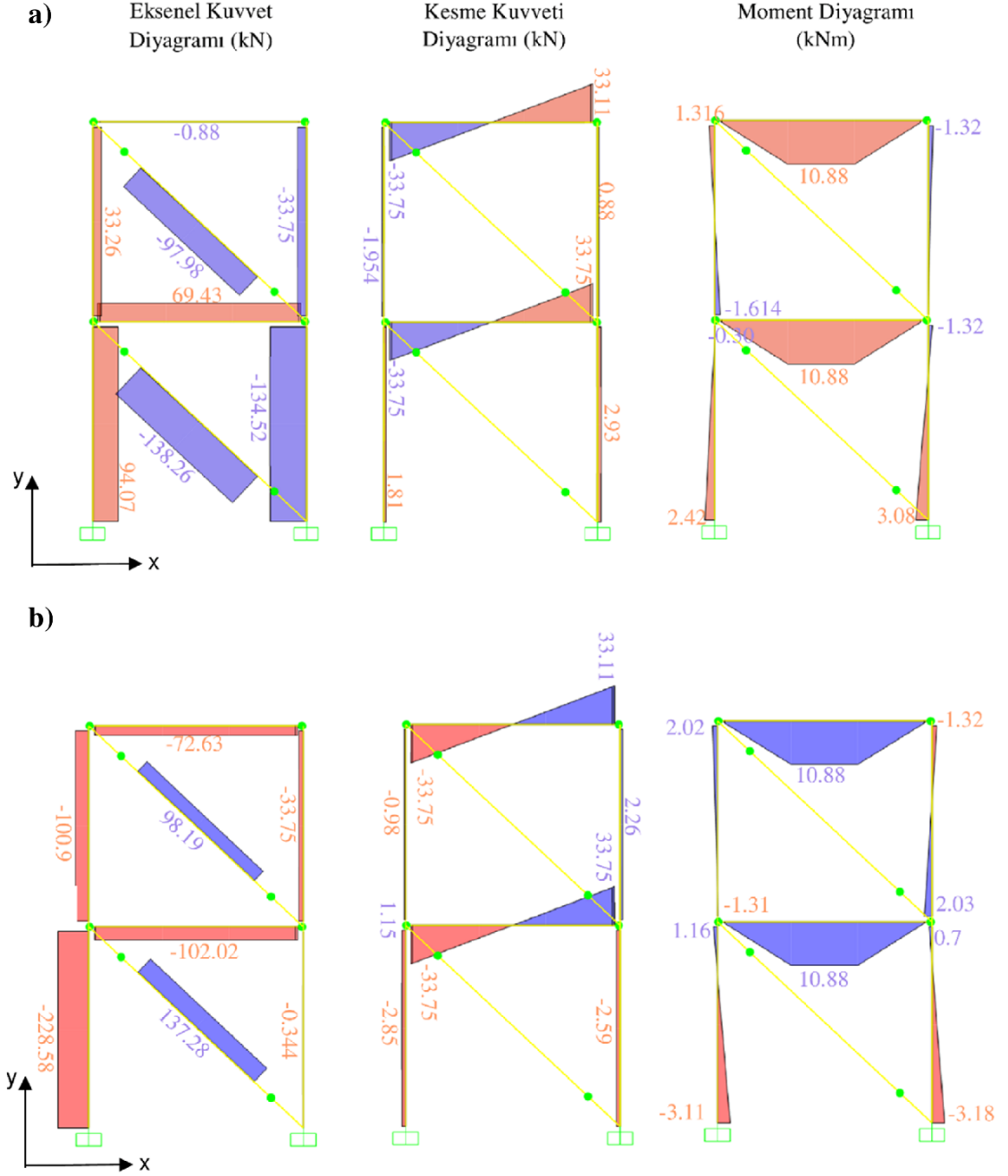
Bu hesaplara göre birinci kat BEÇÇ'leri için ÇE en kesit alanı bu yüke göre hesaplanırsa,

$$A_{\text{ÇE}} = \frac{P_{\text{duvar}}}{f_y} \quad (\text{E3.13})$$

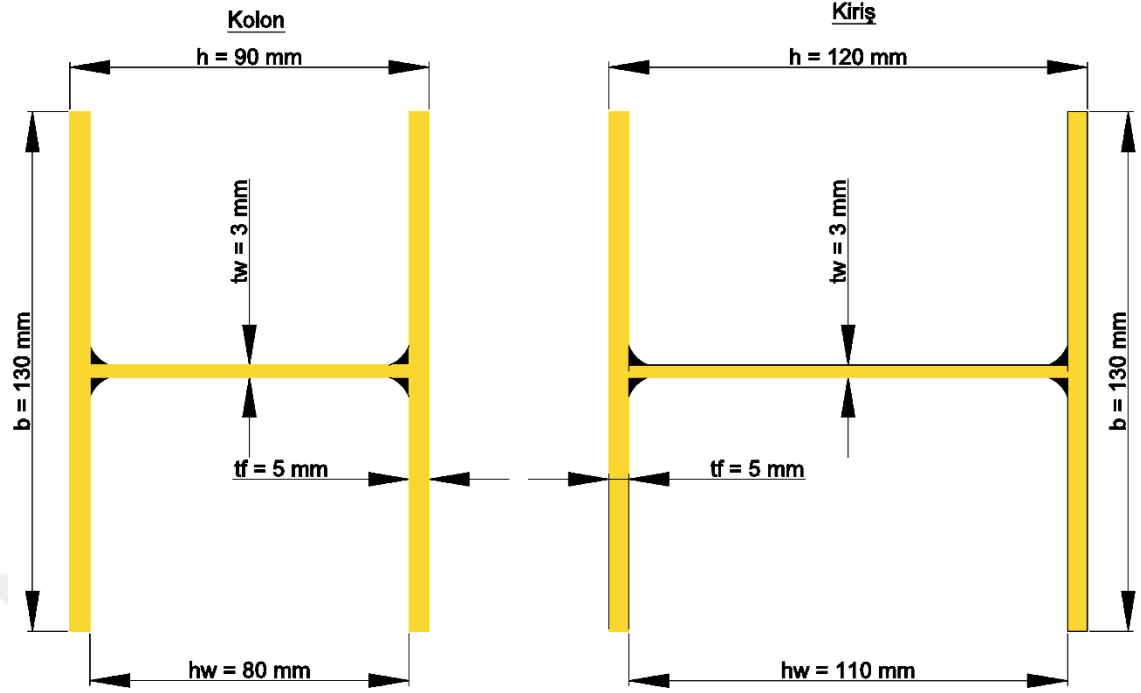
$$A_{\text{ÇE}} = \frac{97.864}{235000} = 0.000416 \text{ m}^2$$

EK-4. BEÇÇ'li ÇÇ'ye Ait Kesin Tasarım Hesaplamaları

GDE'lerde kullanılan ÇÇ hesapları aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.5. Çelik çerçeveye ait SAP2000 analiz sonuçları **a)** +x yönünde yükleme durumu; **b)** -x yönünde yükleme durumu



Şekil 8.6. Yapma profillere ait kesitler

Çizelge 8.2. Yapma profilden imal edilen çerçevelere ait ağırlık ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri

Çerçeveler	Maksimum Taban Kesme Kuvveti(kN)	
	Boş Çerçeve	BEÇÇ'li Çerçeve
1H3_b80	7.1342	127.104
1H3_b100	9.3744	133.618
1H3_b120	11.7072	139.741

Çelik Kolonların Tasarımı:

Çelik kolonların ebatları Şekil 8.6'da verilmiştir.

Başlık genişliği : $b_{kolon} = 130 \text{ mm}$

Yükseklik : $h_{kolon} = 90 \text{ mm}$

Gövde kalınlığı : $t_{wkolon} = 3 \text{ mm}$

Başlık kalınlığı : $t_{fkolon} = 5 \text{ mm}$

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları'nda (ÇYTHYE 2016) yer alan Tablo 5.1A'daki kompaktlık koşullarına göre;

Kolon başlığı kompaktlık kontrolü:

$$\frac{b_{\text{kolon}}}{t_{f\text{kolon}}} < \lambda = 0.64 \times \sqrt{k_c \times \frac{E}{f_y}} \quad (\text{Tablo 5.1A} - 2. \text{ durum}) \quad (\text{E4.1})$$

$$13 < 16.4 \checkmark$$

Kolon gövdesi kompaktlık kontrolü:

$$\frac{h_{\text{kolon}}}{t_{w\text{kolon}}} < \lambda = 1.49 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Tablo 5.1A} - 5. \text{ durum}) \quad (\text{E4.2})$$

$$26.67 < 43.46 \checkmark$$

Kolon kesiti kompakttır.

$$\text{Kesit Alanı: } A_{\text{kolon}} = 1540 \text{ mm}^2$$

Atalet Momenti:

$$h_{w\text{kolon}} = h_{\text{kolon}} - 2 \times t_{f\text{kolon}} \quad (\text{E4.3})$$

$$h_{w\text{kolon}} = 80 \text{ mm}$$

$$I_{x\text{kolon}} = \frac{1}{12} \times t_w \times (h_w)^3 + 2 \times \frac{1}{12} \times b \times (t_f)^3 + 2 \times b \times t_f \times \bar{y}^2 \quad (\text{E4.4})$$

$$I_{x\text{kolon}} = 2478833 \text{ mm}^4$$

$$I_{y\text{kolon}} = \frac{1}{12} \times h_w \times (t_w)^3 + 2 \times \frac{1}{12} \times t_f \times (b)^3 \quad (\text{E4.5})$$

$$I_{y\text{kolon}} = 1831013 \text{ mm}^4$$

Atalet Yarıçapı:

$$i_{x\text{kolon}} = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (\text{E4.6})$$

$$i_{x\text{kolon}} = 40.12 \text{ mm}$$

$$i_{y\text{kolon}} = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (\text{E4.7})$$

$$i_{y\text{kolon}} = 34.48 \text{ mm}$$

Narinlik:

$$\lambda = k \frac{L_{\text{kolon}}}{i_{\min}} < \lambda = 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{E4.8})$$

$$43.5 < 137.405 \checkmark$$

Kolon Basınç Kapasitesi:

Elastik burkulma gerilmesi

$$F_{\text{ekolon}} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} \quad (\text{E4.9})$$

$$F_{\text{ekolon}} = 234455 \text{ N/mm}^2$$

Kritik burkulma gerilmesi

$$F_{\text{crkolon}} = 0.658 \frac{F_y}{F_e} \times F_y \quad (\text{E4.10})$$

$$F_{\text{crkolon}} = 234.901 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı

$$P_{\text{nkolon}} = F_{\text{crkolon}} \times A_{\text{kolon}} \quad (\text{E4.11})$$

$$P_{\text{nkolon}} = 361.748 \text{ N}$$

$$\emptyset P_{\text{nkolon}} = 325.57 \text{ kN} \quad (\text{E4.12})$$

$\emptyset = 0.9$ (YDKT: Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım Yöntemi)

$$P_r = 228.58 \text{ kN (SAP2000)}$$

$$\emptyset P_{\text{nkolon}} > P_r \quad (\text{E4.13})$$

$$325.573 \text{ kN} > 228.58 \text{ kN} \checkmark$$

Kolon Moment Kapasitesi:

$$c_{xkolon} = 65 \text{ mm}$$

$$c_{ykolon} = 45 \text{ mm}$$

Mukavemet Momenti:

$$w_{xkolon} = \frac{I_{xkolon}}{c_{xkolon}} \quad (E4.14)$$

$$w_{xkolon} = 38135.9 \text{ mm}^3$$

$$w_{ykolon} = \frac{I_{ykolon}}{c_{ykolon}} \quad (E4.15)$$

$$w_{ykolon} = 40689.19 \text{ mm}^3$$

$$M_{pxkolon} = F_{ykolon} \times w_{xkolon} \quad (E4.16)$$

$$M_{pxkolon} = 8961936 \text{ Nmm} = 8.96 \text{ kNm}$$

$$M_{pykolon} = F_{ykolon} \times w_{ykolon} \quad (E4.17)$$

$$M_{pykolon} = 9561959 \text{ Nmm} = 9.56 \text{ kNm}$$

$$\emptyset M_{pxkolon} > M_{rkolon} \quad (E4.18)$$

$$\emptyset = 0.9 \text{ (YDKT)}$$

$$8065742 \text{ Nmm} = 8.065 \text{ kNm} \geq 3.18 \text{ kNm (SAP2000)} \checkmark$$

Kolon Çekme Kapasitesi:

Akma Sınır Durumu:

Karakteristik çekme kuvveti dayanımı

$$T_{nkolon} = F_y \times A_{kolon} \quad (E4.19)$$

$$T_{nkolon} = 361900 \text{ N} = 361.9 \text{ kN}$$

$$\emptyset = 0.9 \text{ (YDKT)}$$

$$\emptyset T_{nkolon} = 325.710 \text{ kN}$$

Kırılma Sınır Durumu:

$$\emptyset_{bulon} = 12 \text{ mm}$$

$$n_{\text{bulon}} = 6$$

$$A_{\text{netkolon}} = A - (4 \times t_f + 2 \times t_w) \times (\phi_{\text{bulon}} + 2) \quad (\text{E4.20})$$

$$A_{\text{netkolon}} = 1176 \text{ mm}^2$$

$$t_{\text{plaka}} = 6 \text{ mm}$$

$$l_{\text{plaka}} = 36 \text{ mm}$$

$$U = 1$$

$$A_{\text{ekolon}} = U \times A_{\text{net}} \quad (\text{E4.21})$$

$$A_{\text{ekolon}} = 1176 \text{ mm}^2$$

$$T_{\text{nkolon}} = F_u \times A_e \quad (\text{E4.22})$$

$$T_{\text{nkolon}} = 423360 \text{ N} = 423.36 \text{ kN}$$

$$\phi T_{\text{nkolon}} > T_r \quad (\text{E4.23})$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$317200 \text{ N} = 317.2 \text{ kN} > 94.07 \text{ kN (SAP2000)} \checkmark$$

Kolon Kesme Kapasitesi:

$$A_{\text{wkolon}} = t_{\text{wkolon}} \times h_{\text{wkolon}} \quad (\text{E4.24})$$

$$A_{\text{wkolon}} = 240 \text{ mm}^2$$

$$c_{v1} = 1$$

$$V_{\text{nkolon}} = V_{\text{nkolon}} = 0.6 \times F_y \times A_{\text{wkolon}} \times c_{v1} \quad 0.6 \times F_y \times A_{\text{wkolon}} \times c_{v1} \quad (\text{E4.25})$$

$$V_{\text{nkolon}} = 33840 \text{ N} = 33.84 \text{ kN}$$

$$\phi V_{\text{nkolon}} > V_{r\text{kolon}} \quad (\text{E4.26})$$

$$\phi = 1.0 \text{ (YDKT)}$$

$$33840 \text{ N} = 33.84 \text{ kN} > 2.93 \text{ kN (SAP2000)} \checkmark$$

Kolon Bulon Kesme:

Eksenel basınç kuvveti dayanımı:

$$\phi P_n = 33840 \text{ N}$$

$$A_{\text{netkolon}} = 1176 \text{ mm}^2$$

$$\phi_{\text{bulon}} = 12 \text{ mm}$$

$$A_{\text{bulon}} = 113.04 \text{ mm}^2$$

$$n_{\text{bulon}} = 12$$

$$\text{Kayma düzlemi sayısı: } n_{\text{sp}} = 2$$

$$\text{Karakteristik kayma gerilmesi dayanımı: } F_{\text{nvbulon}} = 350 \text{ N/mm}^2 \text{ (8.8 Bulon)}$$

$$\text{Karakteristik çekme gerilmesi dayanımı: } F_{\text{ntbulon}} = 600 \text{ N/mm}^2 \text{ (8.8 Bulon)}$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı:

$$R_{\text{nvbulon}} = n_{\text{spkolon}} \times n_{\text{bulon}} \times A_{\text{bulon}} \times F_{\text{nvbulon}} \quad (\text{E4.27})$$

$$R_{\text{nvbulon}} = 949536 \text{ N}$$

$$\phi R_{\text{nv}} > \phi T_n \quad (\text{E4.28})$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$712152 \text{ N} = 712.152 \text{ kN} > 317.52 \text{ kN} \checkmark$$

Kolon Bulon Deliği Ezilme Kuvveti Dayanımı:

$l_c = 31 \text{ mm}$ (Kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki net uzaklık)

$$t_{\text{plaka}} = 5 \text{ mm}$$

$$R_{\text{nkolon}} = 2 \times 1.2 \times l_c \times t_{\text{plaka}} \times F_u \quad (\text{E4.29})$$

$$R_{\text{nkolon}} = 133920 \text{ N}$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi R_{\text{nv}} > \phi T_n / 3 \quad (\text{E4.30})$$

$$100440 \text{ N} = 100.44 \text{ kN} > 105.84 \text{ kN} \checkmark$$

Celik Kirişlerin Tasarımı:

Çelik kirişlerin ebatları Şekil 8.6'da verilmiştir.

$$\text{Başlık genişliği: } b_{\text{kiriş}} = 130 \text{ mm}$$

Yükseklik : $h_{kiriş} = 120 \text{ mm}$

Gövde kalınlığı : $t_{wkiriş} = 3 \text{ mm}$

Başlık kalınlığı : $t_{fkiriş} = 5 \text{ mm}$

Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarında yer alan Tablo 5.1A'daki kompaktlık koşullarına göre

Kiriş başlığı kompaktlık kontrolü:

$$\frac{b_{kiriş}}{t_{kiriş}} < \lambda = 0.64 \sqrt{k_c \times \frac{E}{f_y}} \quad (\text{Çelik şartnamesi Tablo 5.1A – 2. durum}) \quad (E4.31)$$

13 < 15.17 ✓ Kompakt

Kolon gövdesi kompaktlık kontrolü:

$$\frac{h_{kiriş}}{t_{wkiriş}} < \lambda = 1.49 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Çelik şartnamesi Tablo 5.1A – 5. durum}) \quad (E4.32)$$

36.67 < 43.46 ✓ Kompakt

Kiriş kesiti kompakttır.

Kesit Alanı: $A_{kiriş} = 1630 \text{ mm}^2$

Atalet Momenti:

$$h_{wkiriş} = h - 2 \times t_{fkiriş} \quad (E4.33)$$

$$h_{wkiriş} = 110 \text{ mm}$$

$$I_{xkiriş} = \frac{1}{12} \times t_{wkiriş} \times (h_{wkiriş})^3 + 2 \times \frac{1}{12} \times b_{kiriş} \times (t_{fkiriş})^3 + 2 \times b_{kiriş} \times t_{fkiriş} \times \bar{y}^2 \quad (E.4.34)$$

$$I_{xkiriş} = 4633583 \text{ mm}^4$$

$$I_{ykiriş} = \frac{1}{12} \times h_{wkiriş} \times (t_{wkiriş})^3 + 2 \times \frac{1}{12} \times t_f \times (b_{kiriş})^3 \quad (E4.35)$$

$$I_{ykiriş} = 1831081 \text{ mm}^4$$

Atalet Yarıçapı:

$$i_{xkiriş} = \sqrt{\frac{I_{xkiriş}}{A_{kiriş}}} \quad (E4.36)$$

$$i_{xkiriş} = 53.32 \text{ mm}$$

$$i_{ykiriş} = \sqrt{\frac{I_{ykiriş}}{A_{kiriş}}} \quad (E4.37)$$

$$i_{ykiriş} = 33.52 \text{ mm}$$

Narinlik:

$$\lambda_{kiriş} = k \frac{L_{kiriş}}{i_{min}} < \lambda_{kiriş} = 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (E4.38)$$

$$35.35 < 137.405 \quad \checkmark$$

Kiriş Basınç Kapasitesi:

$$F_{ekiriş} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} \quad (E4.39)$$

$$F_{ekiriş} = 1577.51 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{cr} = 0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \times F_y \quad (E4.40)$$

$$F_{cr} = 220.795 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{nkiriş} = F_{cr} \times A \quad (E4.41)$$

$$P_{nkiriş} = 382880 \text{ N}$$

$$\phi P_{nkiriş} > P_r \quad (E4.42)$$

$$\phi = 0.9 \text{ (YDKT)}$$

$$323906 \text{ N} = 323.906 \text{ kN} > 102.02 \text{ kN (SAP2000)} \quad \checkmark$$

Kiriş Moment Kapasitesi:

$$c_{xkiriş} = 65 \text{ mm}$$

$$c_{ykiriş} = 60 \text{ mm}$$

Mukavemet Momenti:

$$w_{xkiriş} = \frac{I_{xkiriş}}{c_{xkiriş}} \quad (E4.43)$$

$$w_{xkiriş} = 71285.9 \text{ mm}^3$$

$$w_{ykiriş} = \frac{I_{ykiriş}}{c_{ykiriş}} \quad (E4.44)$$

$$w_{ykiriş} = 30518 \text{ mm}^3$$

$$M_{pxkiriş} = F_y \times w_{xkiriş} \quad (E4.45)$$

$$M_{pxkiriş} = 16750000 \text{ Nmm} = 16.75 \text{ kNm}$$

$$M_{pykiriş} = F_y \times w_{ykiriş} \quad (E4.46)$$

$$M_{pykiriş} = 7171733 \text{ Nmm} = 7.17 \text{ kNm}$$

$$\phi = 0.9 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi M_{pxkiriş} > M_r \quad (E4.47)$$

$$15077000 \text{ Nmm} = 15.077 \text{ kNm} > 10.88 \text{ kNm (SAP2000)} \checkmark$$

Kiriş Çekme Kapasitesi:

Akma Sınır Durumu:

$$T_{nkiriş} = F_y \times A \quad (E4.48)$$

$$T_{nkiriş} = 383050 \text{ N}$$

$$\phi = 0.9 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi T_{nkiriş} = 344745 \text{ N} \quad (E4.49)$$

Kırılma Sınır Durumu:

$$\phi_{bulon} = 12 \text{ mm}$$

$$n_{bulon} = 2$$

$$A_{net} = A - (4 \times t_f + 2 \times t_w) \times (\phi_{bulon} + 2) \quad (E4.50)$$

$$A_{net} = 1558 \text{ mm}^2$$

$$t_{plaka} = 6 \text{ mm}$$

$$l_{\text{plaka}} = 36 \text{ mm}$$

$$U = 0.79$$

$$A_e = U \times A_{\text{net}} \quad (\text{E4.51})$$

$$A_e = 1233.42 \text{ mm}^2$$

$$T_{\text{nkiriş}} = F_u \times A_e \quad (\text{E4.52})$$

$$T_{\text{nkiriş}} = 444030 \text{ N} = 444.03 \text{ kN}$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi T_n > T_r \text{ (SAP2000)} \quad (\text{E4.53})$$

$$333022.5 \text{ N} = 333.023 \text{ kN} > 69.43 \text{ kN (SAP2000)} \checkmark$$

Kiriş Kesme Kapasitesi:

$$A_{\text{wkiriş}} = t_w \times h_w \quad (\text{E4.54})$$

$$A_{\text{wkiriş}} = 330 \text{ mm}^2$$

$$c_{v1} = 1$$

$$V_{\text{nkiriş}} = 0.6 \times F_y \times A_w \times c_{v1} \quad (\text{E4.55})$$

$$V_{\text{nkiriş}} = 46530 \text{ N}$$

$$\phi = 1.0 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi V_{\text{nkiriş}} > V_r \quad (\text{E4.56})$$

$$46530 \text{ N} = 46.53 \text{ kN} > 33.75 \text{ kN (SAP2000)} \checkmark$$

Kiriş Bulon Hesabı:

$$\phi_{\text{bulon}} = 12 \text{ mm}$$

$$A_{\text{bulon}} = 113.04 \text{ mm}^2$$

$$n_{\text{bulon}} = 6$$

$$n_{\text{sp}} = 2$$

$$F_{\text{nv}} = 450 \text{ N/mm}^2 \text{ (10.9 Bulon Tablo 13.7)}$$

$$F_{nt} = 750 \text{ N/mm}^2 \text{ (10.9 Bulon Tablo 13.7)}$$

$$R_{ntkiriş} = n_{bulon} \times A_{bulon} \times F_{nt} \quad (E4.57)$$

$$R_{ntkiriş} = 508680 \text{ N}$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi R_{ntkiriş} > \phi T_n \quad (E4.58)$$

$$381510 \text{ N} = 381.51 \text{ kN} > 333.023 \text{ kN} \checkmark$$

Bulon Deliği Ezilme Kuvveti Dayanımı:

$$l_c = 44 \text{ mm}$$

$$t_{plaka} = 13 \text{ mm}$$

$$R_n = 2 \times 1.2 \times l_c \times t_{plaka} \times F_u \quad (E4.59)$$

$$R_n = 494208 \text{ N}$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi R_{nv} > \phi T_n \quad (E4.60)$$

$$370656 \text{ N} = 370.656 \text{ kN} > 333.023 \text{ kN} \checkmark$$

Yan Ek Plakalar

$$t = 8 \text{ mm}$$

$$L = 105 \text{ mm}$$

$$A = 1232 \text{ mm}$$

$$P_y = 2 \times L \times t \times F_y \quad (E4.61)$$

$$P_y = 394800 \text{ N}$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi P_y > \phi T_n \quad (E4.62)$$

$$355320 \text{ N} = 355.32 \text{ kN} > 333.023 \text{ kN} \checkmark$$

$$P_u = A \times F_u \quad (E4.63)$$

$$P_u = 443520 \text{ N}$$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi P_y = 332640 \text{ N} = 332.64 \text{ kN} > \phi T_n = 333.023 \text{ kN} \checkmark$$



EK-5. Bayrak Levhalarının Boyut Hesabı (Uniform Force Method)

Bayrak levhalarının boyutlarının hesaplanmasında “Uniform Force Method” adlı yöntem (AISC, 1994) kullanılmıştır. Bu yöntem bağlantı ara yüzlerinde (bayrak levhası-kiriş, bayrak levhası-kolon ve kolon-kiriş) moment sıfıra eşit olacak şekilde bağlantı geometrisinin seçilmesine dayanır. Bu metoda göre bayrak levhası bağlantısında momentin sıfırlanması için

$$\alpha - \beta \tan \theta = e_b \tan \theta - e_c \text{ koşulu sağlanmalıdır (Çizelge 8.3).}$$

Bu denklemde e_b kiriş kesit yüksekliğinin yarısı, e_c kolon kesit yüksekliğinin yarısı, α kolon yüzünden bayrak levhasının merkezine olan uzaklık, β kiriş yüzünden bayrak levhası merkezine olan uzaklıktır. Bayrak levhasına etki eden kuvvetler aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$V_c = \frac{\beta}{r} (P) \quad (E5.1)$$

$$H_c = \frac{e_c}{r} (P) \quad (E5.2)$$

$$H_b = \frac{\alpha}{r} (P) \quad (E5.3)$$

$$V_b = \frac{e_b}{r} (P) \quad (E5.4)$$

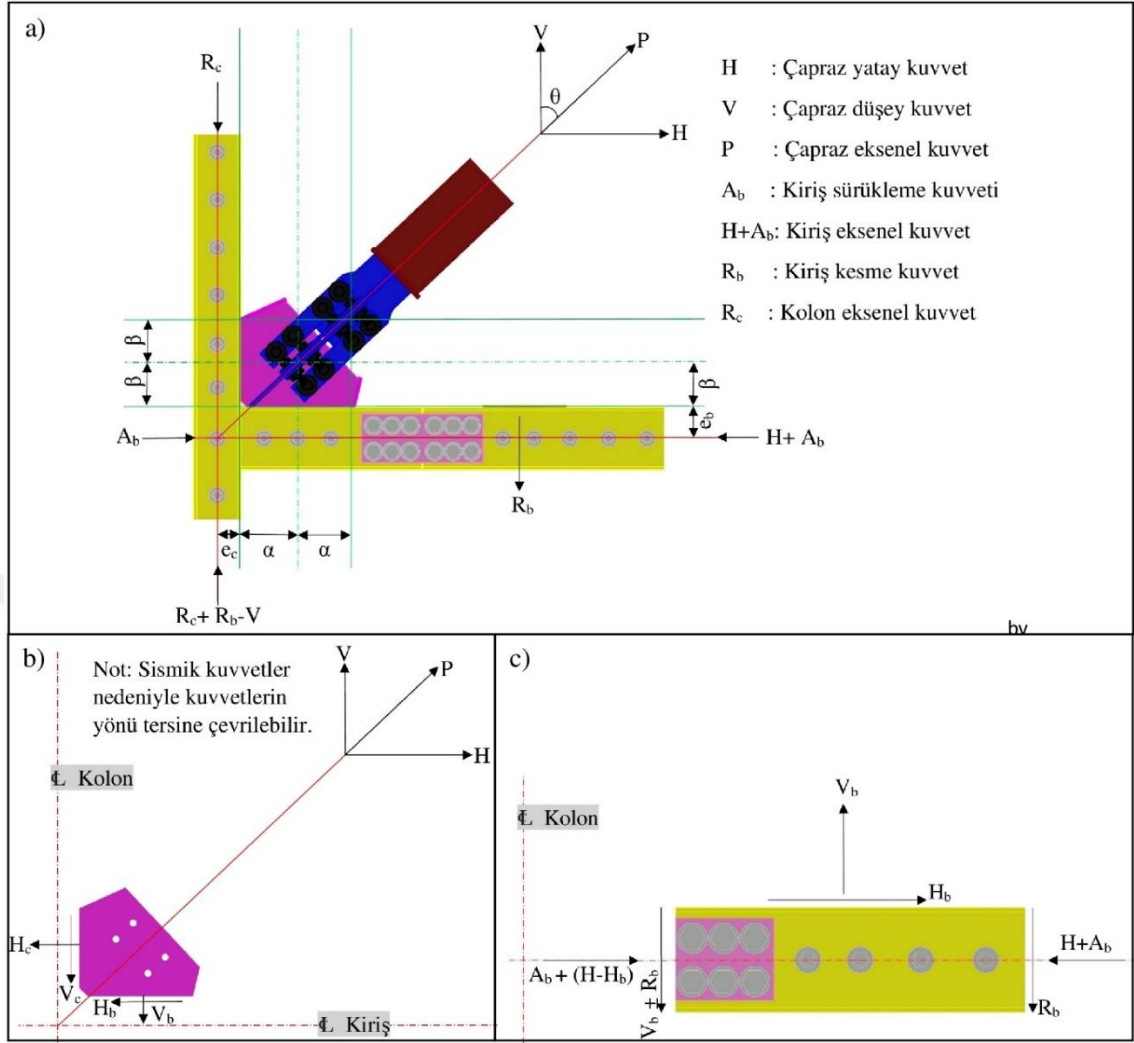
$$r = \sqrt{(\alpha + e_c)^2 + (\beta + e_b)^2} \quad (E5.5)$$

$P_{BEÇÇ}$: BEÇÇ'nin eksenel yük kapasitesi olup

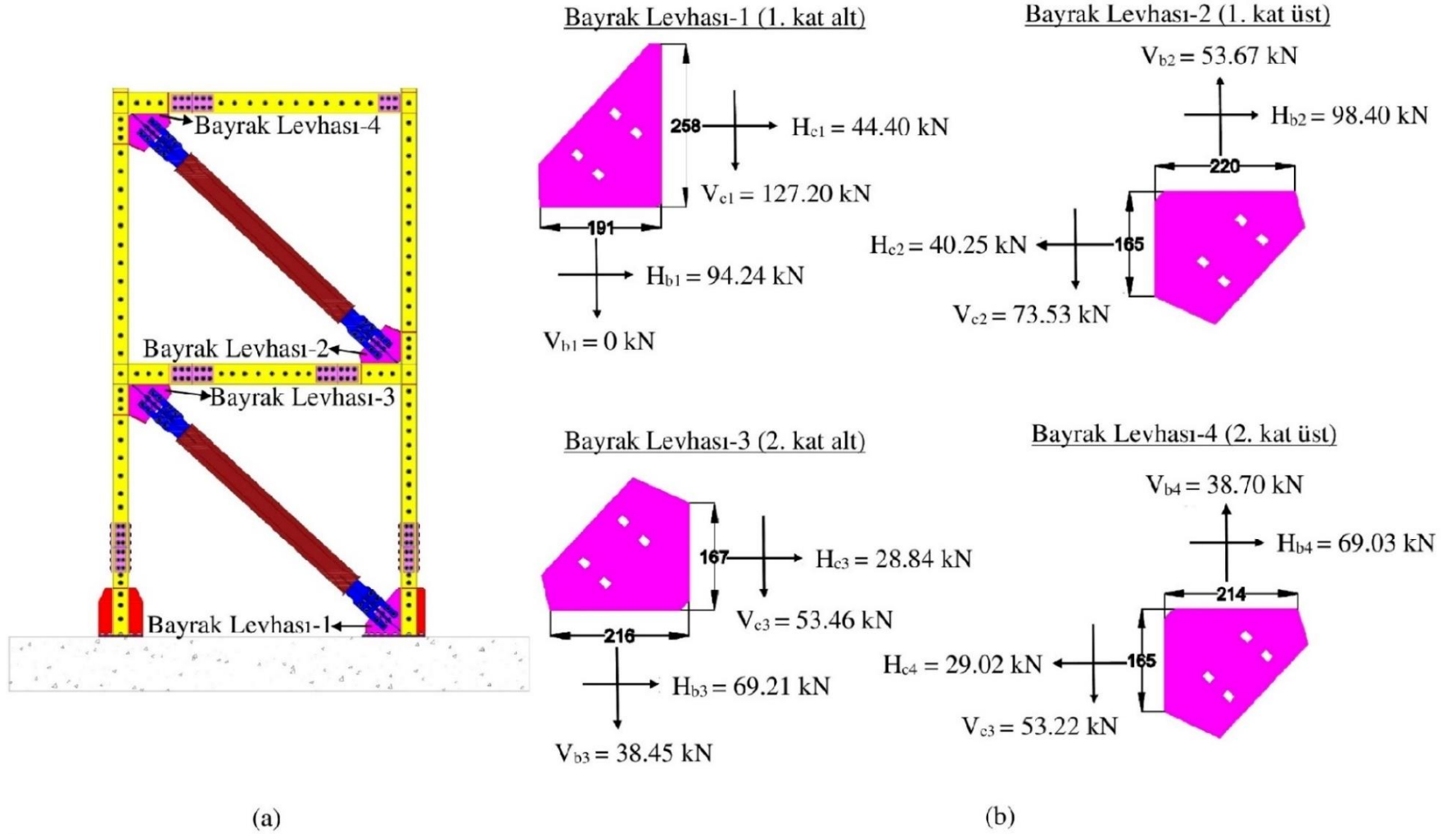
$$P_{BEÇÇ} = 1.4 \times A \times F_y \quad (E5.6)$$

$$P_{BEÇÇ} = 1.4 \times 420 \times 235 \times 10^{-3} = 138.18 \text{ kN}$$

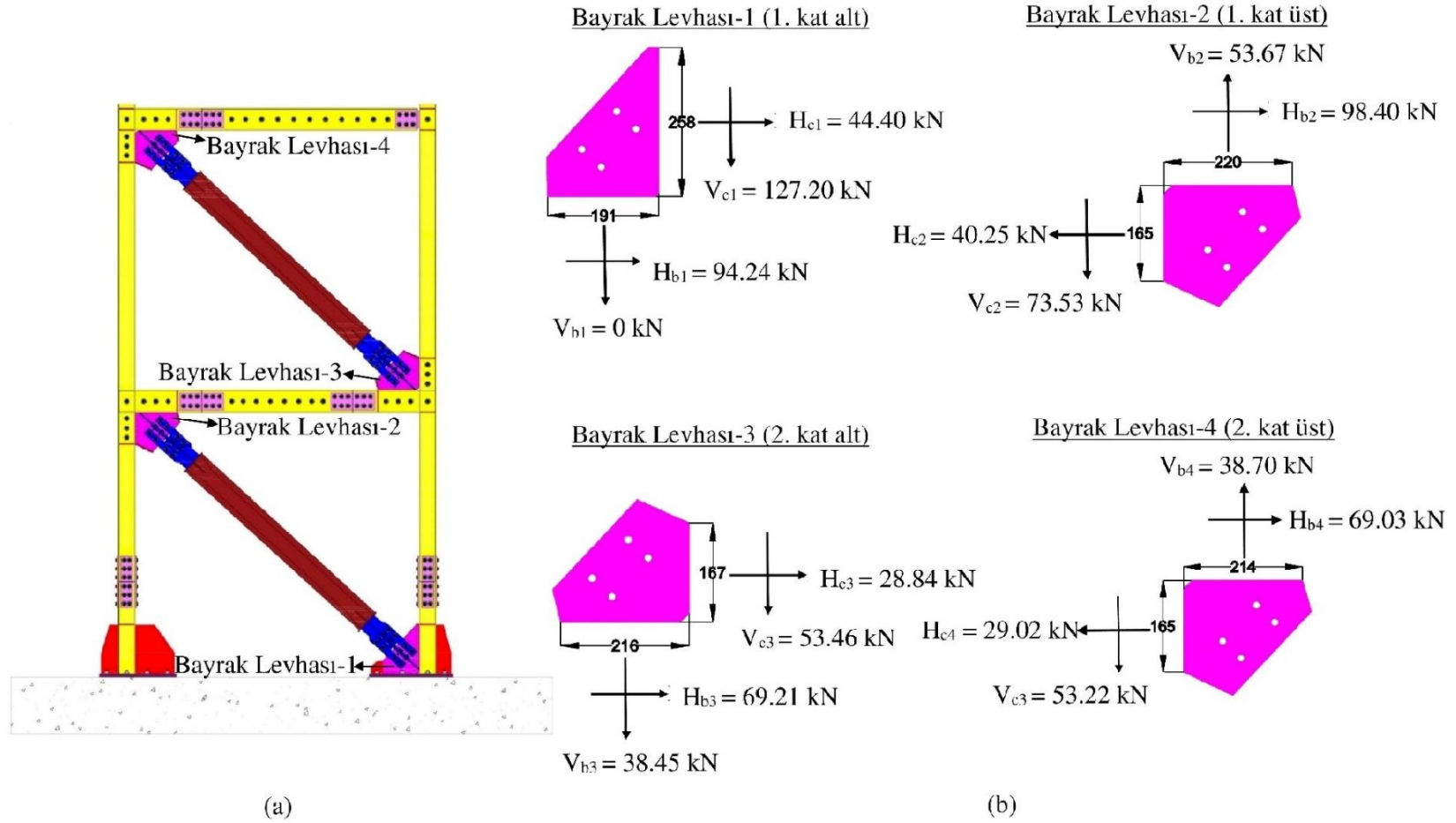
Çizelge 8.3'te hesaplamaları verilmiştir. Böylece BEÇÇ bağlantı ve serbest cisim diyagramları Şekil 8.7, 8.8, 8.9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 8.7. a) Diyagonal çapraz bağlantısı ve dış yükler; b) bayrak levhası serbest cisim diyagramı; c) kiriş serbest cisim diyagramı



Şekil 8.8. GDE-1 ve GDE-2'ye ait bayrak levhalarına ait serbest cisim diyagramları



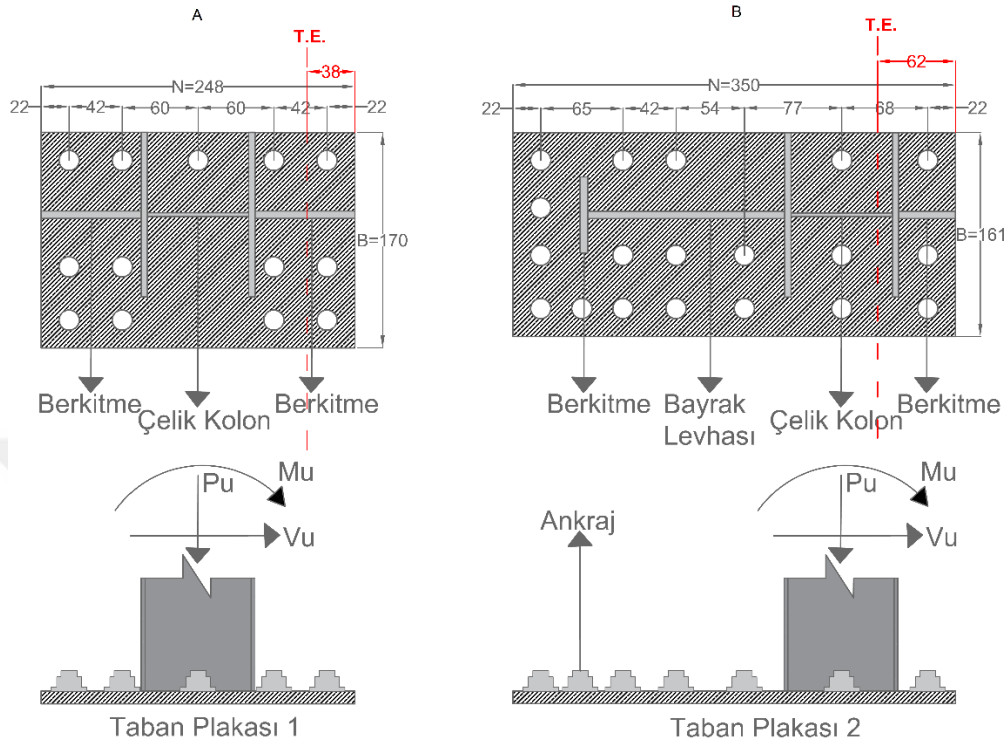
Şekil 8.9. GDE-3'e ait bayrak levhalarına ait serbest cisim diyagramlar

Çizelge 8.3. Bayrak levhalarının boyut hesabı

Bayrak Levhaları	Bayrak Levhası-1 (1'inci kat alt)	Bayrak Levhası-2 (1'inci kat üst)	Bayrak Levhası-3 (2'nci kat alt)	Bayrak Levhası-4 (2'nci kat üst)
$\alpha - \beta \tan \theta - (e_b \tan \theta - e_c) =$	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓
$\tan \theta =$	1.09	1.09	1.07	1.07
$e_b =$	0	60	60	60
$e_c =$	45	45	45	45
$\alpha =$	191	220	216	214
$\beta =$	258	164	167	165
$r_1 =$	190.67	210.35	209.71	208.36
$A_{brace} =$	420	420	300	300
$F_y =$	320	320	320	320
$P_{brace} =$	188.16	188.16	134.4	134.4
$V_c =$	127.20	73.53	53.46	53.21
$H_c =$	44.40	40.25	28.84	29.03
$V_b =$	0	53.67	38.45	38.70
$H_b =$	94.24	98.39	69.21	69.03
$\sin \theta =$	0.74	0.74	0.73	0.73
$\cos \theta =$	0.68	0.68	0.68	0.68
Check:				
$TotalH = H_c + H_b - P_b * \sin \theta =$	0.0 ✓	0.0 ✓	0.0 ✓	0.0 ✓
$TotalV = V_c + V_b - P_b * \cos \theta =$	0.0 ✓	0.0 ✓	0.0 ✓	0.0 ✓

EK-6. Taban Plakalarının Hesabı

EK-6.1. GDE-1'e ait kolon taban plakası tasarımı



Şekil 8.10. GDE-1 için tasarlanan çelik kolon taban plakalarına ait detaylar

Taban Plakası 1:

Şekil 8.10'da görülen taban plakası için seçilen plaka boyutları $t = 10 \text{ mm}$, $N = 248 \text{ mm}$ ve $B = 170 \text{ mm}$ 'dir.

Öncelikle taban levhası için çekme ve basınç alanlarının dengesinden tarafsız eksen belirlenmiştir (Şekil 8.10).

Çekme bölgesi için atalet momenti: $I = 7.7 \times 10^5 \text{ mm}^4$ olarak hesaplanmıştır.

$$d_a = 12 \text{ mm}$$

$$A_a = 113 \text{ mm}^2$$

$$n_a = 12$$

SAP2000 analiz sonuçlarından taban plakasına gelen yükler:

$$\text{Basınç} : P_u = 228.58 \text{ kN}$$

$$\text{Moment: } M_u = 3.11 \text{ kNm}$$

Kesme : $V_u = 2.85 \text{ kN}$

Çekme Kuvveti:

$$P_\zeta = \frac{M \times y}{I} \times A_a \quad (\text{E6.1})$$

$$P_\zeta = \frac{3.11 \times 10^6 \times 38}{7.7 \times 10^5} \times 113 = 17343.3 \text{ N} = 17.34 \text{ kN}$$

Çekme Kapasitesi:

Ankraj karakteristik çekme gerilmesi dayanımı: $f_{nt} = 300 \text{ N/mm}^2$

$\phi = 0.75$ (YDKT)

$$\phi T_n = 0.75 \times A_a \times f_{nt} \quad (\text{E6.2})$$

$$P_\zeta = \frac{3.11 \times 10^6 \times 38}{7.7 \times 10^5} \times 113 = 17343.3 \text{ N} = 17.34 \text{ kN}$$

$$\phi T_n > P_\zeta \quad (\text{E6.3})$$

$$0.75 \times (113 \times 12) \times 300 = 305100 \text{ N} = 305.1 \text{ kN} > 17.34 \text{ kN} \checkmark$$

Kesme Kapasitesi:

Ankraj karakteristik kayma gerilmesi dayanımı: $f_{nv} = 180 \text{ N/mm}^2$

$\phi = 0.75$ (YDKT)

$$\phi V_n = 0.75 \times A_a \times f_{nv} \quad (\text{E6.4})$$

$$P_\zeta = \frac{3.11 \times 10^6 \times 38}{7.7 \times 10^5} \times 113 = 17343.3 \text{ N} = 17.34 \text{ kN}$$

$$\phi V_n > V_{rkolon} \quad (\text{E6.5})$$

$$0.75 \times (113 \times 12) \times 180 = 183.06 \text{ kN} > 33.84 \text{ kN} \checkmark$$

Basınç Gerilmesi

$$\sigma_\zeta = \frac{P_\zeta}{A_a} \quad (\text{E6.6})$$

$$\sigma_\zeta = \frac{16660}{113 \times 12} = 12.29 \text{ MPa}$$

Kayma Gerilmesi

$$\tau = \frac{\phi V_n}{A_a} \quad (E6.7)$$

$$\tau = \frac{183060}{113 \times 12} = 135 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_c}{f_{nt}} + \frac{\tau}{f_{nv}} = 0.79 < 1 \quad \checkmark \quad (E6.8)$$

Taban Plakası 2:

Şekil 8.10'da görülen taban plakası için seçilen plaka boyutları $t = 10 \text{ mm}$, $N = 351 \text{ mm}$ ve $B = 161 \text{ mm}$ 'dir.

Öncelikle taban levhası için çekme ve basınç alanlarının dengesinden tarafsız eksen belirlenmiştir (Şekil 8.9).

Çekme bölgesi için atalet momenti: $I = 6.7 \times 10^6 \text{ mm}^4$ olarak hesaplanmıştır.

$$d_a = 12 \text{ mm}$$

$$A_a = 113 \text{ mm}^2$$

$$n_a = 19$$

SAP2000 analiz sonuçlarından taban plakasına gelen yükler:

$$\text{Basınç: } P_u = 134.52 \text{ kN}$$

$$\text{Moment: } M_u = 3.18 \text{ kNm}$$

$$\text{Kesme Kuvveti: } V_u = 2.93 \text{ kN}$$

Çekme Kuvveti:

$$P_c = \frac{M \times y}{I} \times A_a \quad (E6.9)$$

$$P_c = \frac{3.18 \times 10^6 \times 62}{6.7 \times 10^5} \times 113 = 33252.35 \text{ N} = 33.25 \text{ kN}$$

Çekme Kapasitesi:

$$T_{na} = A_a \times f_{nta} \quad (E6.10)$$

Ankraj karakteristik çekme gerilmesi dayanımı: $f_{nt} = 300 \text{ N/mm}^2$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi T_n > P_\zeta \quad (E6.11)$$

$$0.75 \times (113 \times 19) \times \frac{300}{1000} = 483 \text{ kN} > 33.25 \text{ kN} \checkmark$$

Kesme Kapasitesi:

$$V_{na} = A_a \times f_{nv} \quad (E6.12)$$

Ankraj karakteristik kayma gerilmesi dayanımı: $f_{nv} = 180 \text{ N/mm}^2$

$$\phi = 0.75 \text{ (YDKT)}$$

$$\phi V_n > V_{rkolon} \quad (E6.13)$$

$$0.75 \times (113 \times 19) \times \frac{180}{1000} = 289.85 \text{ kN} > 3.84 \text{ kN} \checkmark$$

Basınç Gerilmesi

$$\sigma_\zeta = \frac{P_\zeta}{A_a} \quad (E6.14)$$

$$\sigma_\zeta = \frac{33250}{113 \times 19} = 15.48 \text{ MPa}$$

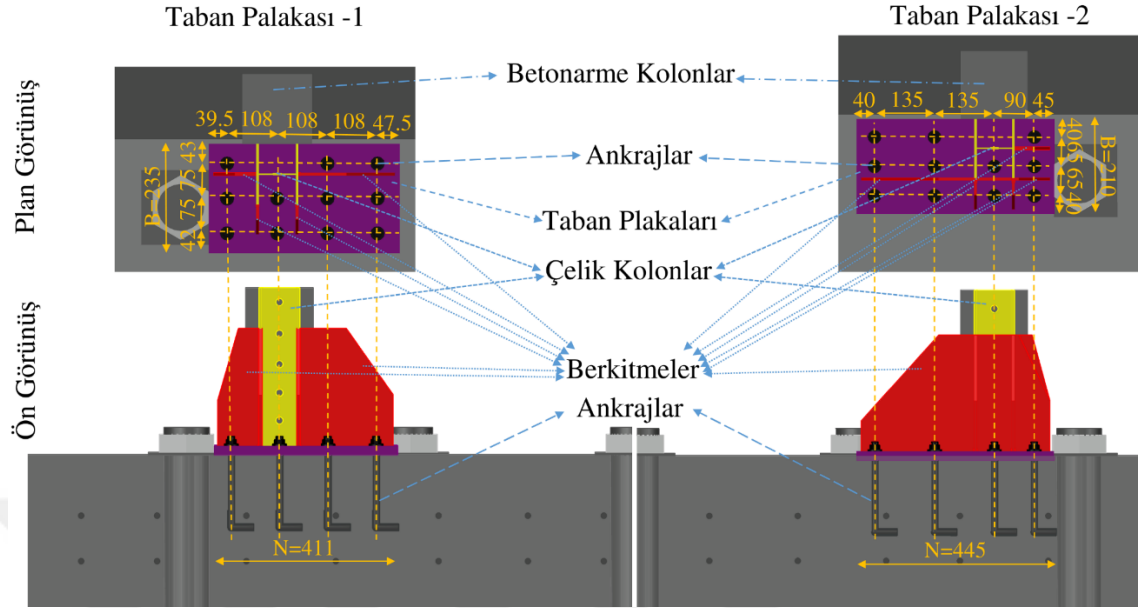
Kayma Gerilmesi

$$\tau = \frac{\phi V_n}{A_a} \quad (E6.15)$$

$$\tau = \frac{289850}{113 \times 19} = 135 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_\zeta}{f_{nt}} + \frac{\tau}{f_{nv}} = 0.8 < 1 \checkmark \quad (E6.16)$$

EK-6.2. GDE-2 ve GDE-3'e ait kolon taban plakası tasarımı



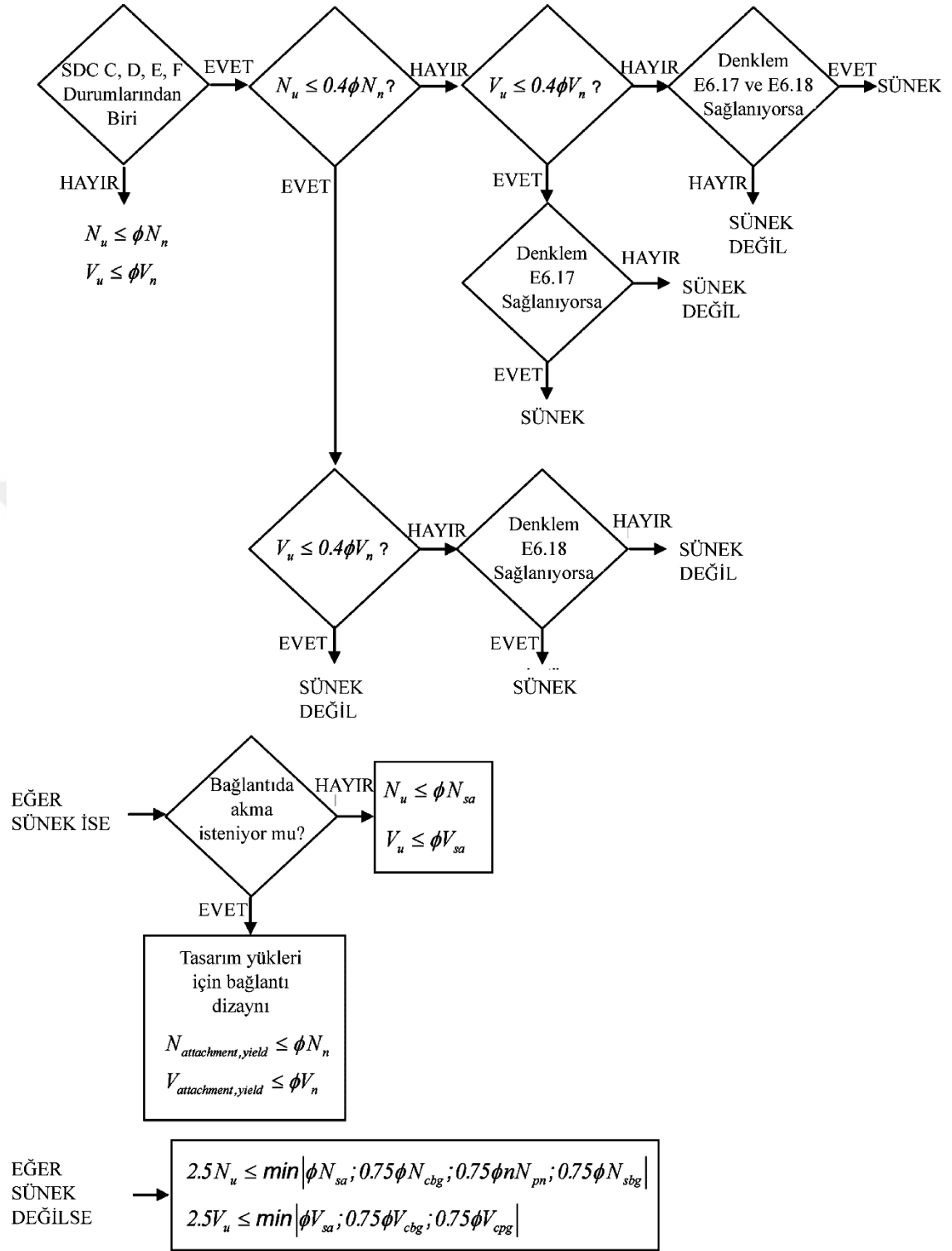
Şekil 8.11. GDE-2 ve GDE-3'e ait taban plakalarına ait detaylar (birimler milimetre cinsindendir)

Şekil 8.11'de görülen GDE-2 ve GDE-3'e ait taban plakalarının tasarımı Amerikan standardına (ACI, 2014) göre yapılmıştır. Hesap detayları aşağıda verilmiştir.

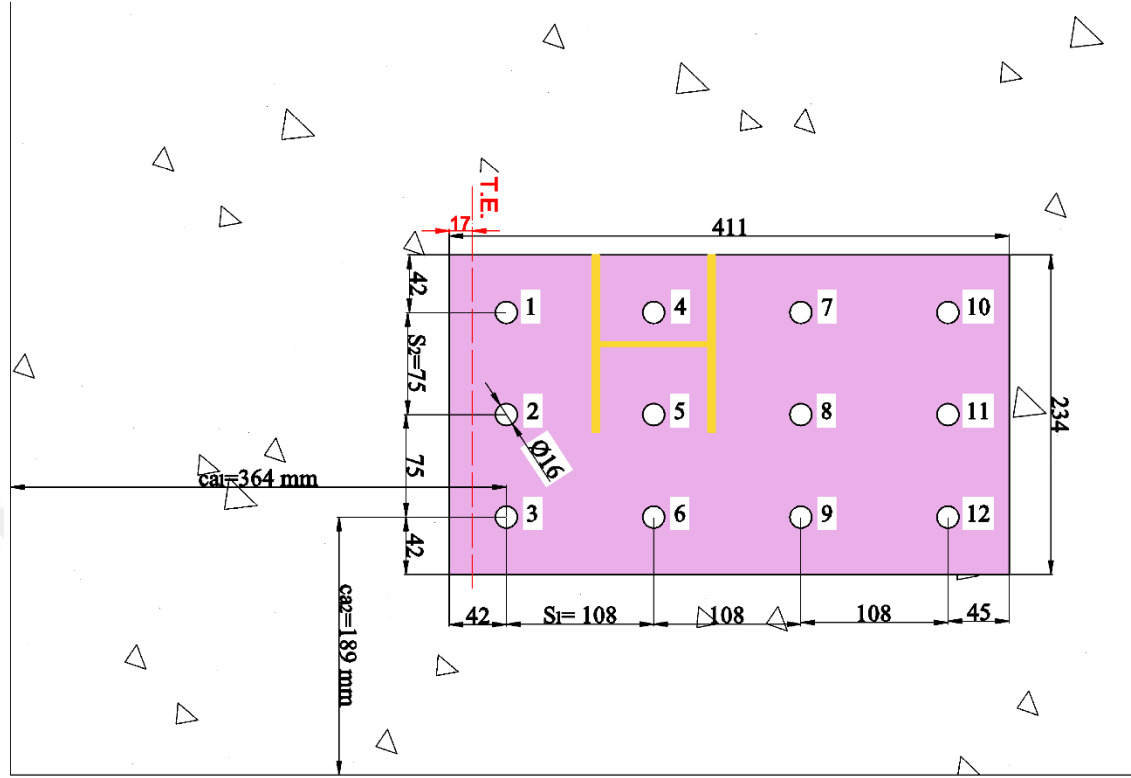
Taban plakalarının boyutları Amerikan standardında (ACI, 2014) verilen şartlara ve sınırlandırmalara göre seçilmiştir. Daha sonra Şekil 8.12'de verilen akış şemasına göre tahkikler yapılmıştır.

$$\phi \times N_{sa} \leq 0.75 \times \min[\phi \times N_{cbg}; \phi \times n \times N_{pn}; \phi \times N_{sbg}] \quad (E6.17)$$

$$\phi \times V_{sa} \leq 0.75 \times \min[\phi \times V_{cbg}; \phi \times V_{cpg}] \quad (E6.18)$$



Şekil 8.12. Ankraj tasarımı için akış şeması (Silva ve Hoehler, 2007)

Taban Plakası 1:**Şekil 8.13.** GDE-2 ve GDE-3'e ait Taban Plakası-1

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad (E6.19)$$

$$E_c = 21019 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (E6.20)$$

$$A_b = 154 \text{ mm}^2$$

OPENSEES analiz sonuçlarından taban plakasına gelen yükler:

$$P = 95000 \text{ N}$$

$$M = 10 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$V = 43000 \text{ N}$$

$$235 \times \bar{y} \times \frac{\bar{y}}{2} = 3 \times 154 \times [(42 - \bar{y}) + (150 - \bar{y}) + (258 - \bar{y}) + (324 - \bar{y})] \times 9.5 \quad (E6.21)$$

$$117.5 \times \bar{y}^2 + 17556 \times \bar{y} - 339708.6 = 0$$

$$\bar{y} = 17 \text{ mm}$$

$$I = \frac{1}{3} \times 235 \times 17^3 + 3 \times 154 \times [(25)^2 + (133)^2 + (241)^2 + (307)^2] \quad (\text{E6.22})$$

$$I = 79222379.67 \text{ mm}^4$$

$$P_{10,11,12} = \frac{\frac{Mc}{I} A_b}{3} + \frac{P}{12} \quad (\text{E6.23})$$

$$P_{10,11,12} = \frac{\frac{10 \times 10^6 \times 205.5}{79222379.67} \times 154}{3} + \frac{95000}{12}$$

$$P_{10,11,12} = 9906 \text{ N}$$

$$P_{7,8,9} = 6.4796 \times 241 + 7916.667 \quad (\text{E6.24})$$

$$P_{7,8,9} = 9478.2506 \text{ N}$$

$$P_{4,5,6} = 6.4796 \times 133 + 7916.667 \quad (\text{E6.25})$$

$$P_{4,5,6} = 8778.4538 \text{ N}$$

$$P_{1,2,3} = 6.4796 \times 25 + 7916.667 \quad (\text{E6.26})$$

$$P_{1,2,3} = 8078.657 \text{ N}$$

$$P_{\text{emin}} = F_{\text{nt}} \times A_b > P_{10,11,12} \quad (\text{E6.27})$$

$$P_{\text{emin}} = 300 \times 154 = 46200 \text{ N} > 9906 \text{ N} \checkmark$$

$$P_{\text{kemin}} = \tau_{\text{emin}} \times A_b \quad (\text{E6.28})$$

$$P_{\text{kemin}} = 180 \times 154 = 27720 \text{ N}$$

$$P_{\text{kayma}} = \frac{43000}{12} = 3583.333 \text{ N} \quad (\text{E6.29})$$

$$P_{\text{kemin}} > P_{\text{kayma}} \quad (\text{E6.30})$$

$$27720 \text{ N} > 3583.333 \text{ N} \checkmark$$

Çekme Gerilmesi:

$$\sigma_{\zeta} = \frac{P_{\zeta}}{A} \quad (E6.31)$$

$$\sigma_{\zeta} = \frac{9906}{154} = 64.32 \text{ MPa}$$

Kayma Gerilmesi:

$$\tau = \frac{P_{\text{kayma}}}{A} \quad (E6.32)$$

$$\tau = \frac{3583.333}{154} = 23.27 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{\zeta}}{\sigma_{\text{emin}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{emin}}} \right)^2 < 1 \quad (E6.33)$$

$$\left(\frac{64.32}{300} \right)^2 + \left(\frac{23.27}{180} \right)^2 = 0.063 < 1 \checkmark$$

$$\sigma_{\text{nt}} = \sqrt{(\sigma_{\zeta})^2 + (\tau)^2} \quad (E6.34)$$

$$\sigma_{\text{nt}} = 68.4 \text{ MPa} < 180 \text{ MPa} \checkmark$$

$$N_u \leq 0.4 \times \phi \times N_n ?$$

$$N_u \leq 0.4 \times 0.7 \times 46200$$

$$N_u = 9906 \text{ N} \leq 12936 \text{ N} \checkmark$$

$$V_u \leq 0.4 \times \phi \times V_n ?$$

$$V_u \leq 0.4 \times 0.7 \times 27720$$

$$V_u = 3593.33 \text{ N} \leq 7761.6 \text{ N} \checkmark$$

$\Rightarrow$ sünek değil

Cekme Etkisindeki Ankrajların Dayanım Tahkiki



Şekil 8.14. Çekme etkisinde çeliğin kopması (ACI, 2014)

$$f_{uta} \leq \left(\frac{1.9 \times f_{ya}}{862 \text{ Mpa}} \right)_{\min} \quad (\text{E6.35})$$

$$f_{uta} = 420 \text{ MPa} \leq \left(\frac{446.5 \text{ MPa}}{862 \text{ Mpa}} \right)_{\min} = 446.5 \text{ MPa} \checkmark$$

$$N_{sa} = A_{se,N} \times f_{uta} \quad (\text{E6.36})$$

$$N_{sa} = 111.365 \times 420 = 46773.2 \text{ N}$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \times \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 \quad (\text{E6.37})$$

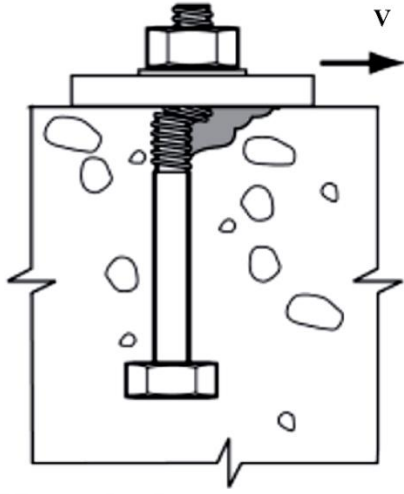
$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \times \left(0.55 - \frac{0.9743}{12} \right)^2 = 0.173 \text{ in}^2 = 111.365 \text{ mm}^2$$

$$\phi = 0.70 \text{ Koşul B (donatısız)}$$

$$N_u \leq 0.4 \times \phi \times N_{sa} \quad (\text{E6.38})$$

$$N_u = 9906 \text{ N} \leq 0.4 \times 0.7 \times 46773.2 = 13096.5 \text{ N} \checkmark$$

Kesme Etkisindeki Ankrajların Dayanım Tahkiki



Şekil 8.15. Çekme etkisinde çeliğin göçmesi (ACI, 2014)

$$V_u \leq 0.4 \times \phi \times V_{sa} \quad (E6.39)$$

$$V_{sa} = 0.6 \times A_{se,V} \times f_{uta} \text{ (Yerinde dökme ankrajlar için)} \quad (E6.40)$$

$$A_{se,V} = 92.9 \text{ mm}^2$$

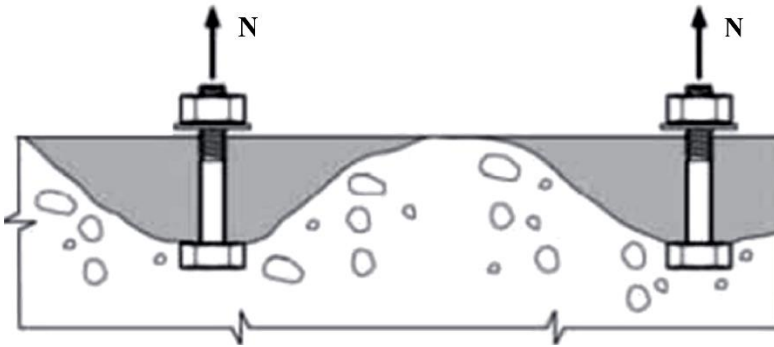
$$V_{sa} = 0.6 \times 92.9 \times 420 = 23410.8 \text{ N}$$

$$V_u \leq 0.4 \times 0.7 \times 23410.8 = 6555.024 \text{ N}$$

$$V_a \leq V_u \quad (E6.41)$$

$$\frac{43000}{12} = 3583.333 \text{ N} \leq 6555.024$$

Çekme Etkisinde Betonun Kopma Tahkiki



Şekil 8.16. Çekme etkisinde betonun kopması (ACI, 2014)

$$N_b = k_c \times \lambda_a \times \sqrt{f'_c \times h_{ef}^{1.5}} \quad (E6.42)$$

$$\lambda_a = 1$$

$$k_c = 10 \text{ (Yerinde dökme ankrajlar için)}$$

$$N_b = 10 \times 1 \times \sqrt{20 \times 280^{1.5}} = 209532.8 \text{ N}$$

$$c_{a1} \text{ ve } c_{a2} < 1.5 \times h_{ef} \quad (E6.43)$$

$$S_1 \text{ ve } S_2 < 3 \times h_{ef} \quad (E6.44)$$

$$A_{NC} = (c_{a1} + S_1 + 1.5 \times h_{ef}) \times (c_{a2} + S_2 + 1.5 \times h_{ef}) \quad (E6.45)$$

$$A_{NC} = (364 + 108 + 1.5 \times 280) \times (189 + 75 + 1.5 \times 280)$$

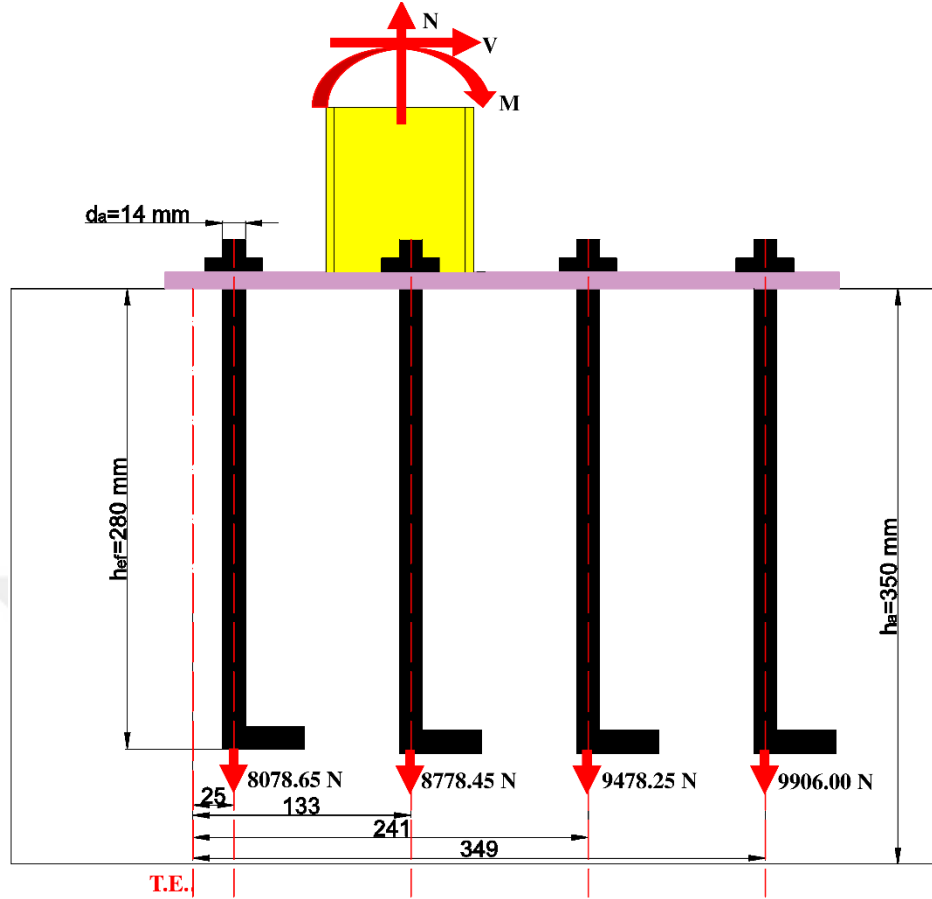
$$A_{NC} = 610128 \text{ mm}^2$$

$$A_{Nc0} = 9 \times h_{ef}^2 \quad (E6.46)$$

$$A_{Nc0} = 9 \times 280^2 = 705600 \text{ mm}^2$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \frac{2 \times e'_N}{3 \times h_{ef}}} \leq 1 \quad (E6.47)$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \frac{2 \times 196}{3 \times 280}} = 0.682 \leq 1 \checkmark$$



Şekil 8.17. Taban plakası-1 için çekme etkisinde betonun kopması tahkiki

$$e'_N = \frac{8078 \times 25 + 8778.45 \times 133 + 9478.25 \times 241 + 9906 \times 349}{8078.65 + 8778.45 + 9478.25} \quad (E6.48)$$

$$e'_N = 196.2 \text{ mm}$$

$$c_{a,min} < 1.5 \times h_{ef} \quad (E6.49)$$

$$c_{a,min} = 189 \text{ mm} < 1.5 \times 280 = 420 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \times \frac{c_{a,min}}{h_{ef}} \quad (E6.50)$$

$$\psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \times \frac{189}{280} = 0.835$$

$$\psi_{c,N} = 1.25 \text{ (Yerinde dökme ankrajlar için)}$$

$$\psi_{cp,N} = 1.00 \text{ (Yerinde dökme ankrajlar için)}$$

$$N_{cbg} = \frac{A_{NC}}{A_{NC0}} \times \psi_{ec,N} \times \psi_{ed,N} \times \psi_{c,N} \times \psi_{cp,N} \times N_b \quad (E6.51)$$

$$N_{cbg} = \frac{610128}{705600} \times 0.682 \times 0.835 \times 1.25 \times 1 \times 209532.8$$

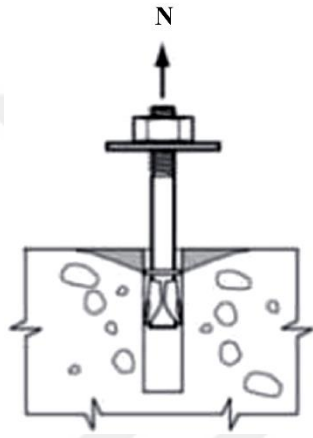
$$N_{cbg} = 128972 \text{ N}$$

$$0.75 \times \phi \times N_{cbg} = ? \quad (E6.52)$$

$$\phi = 0.70 \text{ Koşul B (donatısız)}$$

$$0.75 \times \phi \times N_{cbg} = 0.75 \times 0.70 \times 128972 = 67710.27 \text{ N}$$

Çekme Etkisindeki Ankrajların Betondan Sıyırılma Tahkiki



Şekil 8.18. Çekme etkisinde sıyırılma (ACI, 2014)

$$N_{pn} = \psi_c \times N_p \quad (E6.53)$$

Bir adet kancalı ankraj için

$$N_p = 0.9 \times f'_c \times e_h \times d_a \quad (E6.54)$$

$$N_p = 0.9 \times 20 \times 50 \times 14 = 12600 \text{ N}$$

$$3 \times d_a \leq e_h \leq 4.5 \times d_a \quad (E6.55)$$

$$3 \times 14 = 42 \text{ mm} \leq 50 \text{ mm} \leq 4.5 \times 14 = 63 \text{ mm}$$

Servis yükleri altında çatlama olmadığı durum için $\rightarrow \psi_{c,p} = 1.4$

$$N_{pn} = \psi_c \times N_p = 1.4 \times 12600 = 17640 \text{ N}$$

$$\phi_n = 0.70 \text{ (Donatısız)}$$

$$\phi_n \times N_{pn} = ? \quad (E6.56)$$

$$\phi_n \times N_{pn} = 0.70 \times 17640 = 12348 \text{ N}$$

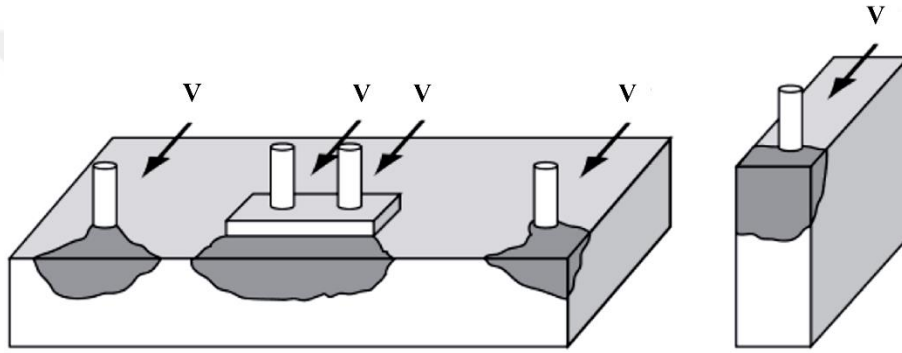
$$2.5 \times N_u \leq \left(\frac{\phi \times N_{sa}}{0.75 \times \phi \times N_{cbg}} \right)_{\min} \quad (\text{E6.62})$$

$$2.5 \times 9906 \leq \left(\frac{0.7 \times 39019.2768 = 27313.49}{0.75 \times 0.70 \times 128972 = 67710.27} \right)_{\min} \quad (\text{E6.63})$$

$$2.5 \times 9906 \leq \left(\frac{27313.49}{67710.27} \right)_{\min}$$

$$24765 \text{ N} \leq 27313.49 \text{ N} \checkmark \quad (\text{E6.64})$$

Kesme Etkisinde Betonun Kopma Tahkiki



Şekil 8.19. Kesme etkisinde beton kopması (ACI, 2014)

$$V_{cbg} = \frac{A_{vc}}{A_{vc0}} \times \psi_{ec,V} \times \psi_{ed,V} \times \psi_{c,V} \times \psi_{h,V} \times V_b \quad (\text{E6.65})$$

$$c_{a1} = 364 \text{ mm}$$

$$1.5 \times c_{a1} = 546 \text{ mm}$$

$$c_{a2} = 189 \text{ mm} < 1.5 \times c_{a1} = 546 \text{ mm}$$

$$h_a = 350 \text{ mm} < 1.5 \times c_{a1} = 546 \text{ mm}$$

$$S_1 = 75 \text{ mm} < 3 \times c_{a1} = 1092 \text{ mm}$$

$$A_{vc} = (1.5 \times c_{a1} + 2 \times S_1 + c_{a2}) \times h_a \quad (\text{E6.66})$$

$$A_{vc} = (1.5 \times 364 + 2 \times 75 + 189) \times 350$$

$$A_{vc} = 309750 \text{ mm}^2$$

$$A_{vc0} = 4.5 \times c_{a1}^2 \quad (\text{E6.67})$$

$$A_{vc0} = 4.5 \times 364^2 = 596232 \text{ mm}^2$$

Eksantrik yüklenmiş ankraj grubu için modifikasyon faktörü:

$$\psi_{ec,v} = \frac{1}{1 + \frac{2 \times e'_v}{3 \times c_{a1}}} \quad (\text{E6.68})$$

$$e'_v = \frac{V \times (42 + 117 + 192)}{3V} = 117 \text{ mm}$$

$$\psi_{ec,v} = \frac{1}{1 + \frac{2 \times 117}{3 \times 233.33}} = 0.749$$

$$c_{a2} = 189 \text{ mm} < 1.5 \times c_{a1} = 546 \text{ mm}$$

$$h_a = 350 \text{ mm} < 1.5 \times c_{a1} = 546 \text{ mm}$$

$$c_{a1} \leq \left(\begin{array}{c} \frac{c_{a2}}{1.5} \\ \frac{h_a}{1.5} \\ \frac{S}{3} \end{array} \right)_{\text{maks}} \quad (\text{E6.69})$$

$$c_{a1} = 364 \leq \left(\begin{array}{c} 126.00 \\ 233.33 \\ 25.00 \end{array} \right)_{\text{maks}}$$

$$\Rightarrow c_{a1} = 233.33 \text{ mm}$$

Modifikasyon faktörleri:

$$\psi_{ed,v} = 0.7 + 0.3 \times \frac{c_{a2}}{1.5 \times c_{a1}} \quad (\text{E6.70})$$

$$\psi_{ed,v} = 0.7 + 0.3 \times \frac{189}{1.5 \times 233.33} = 0.862$$

$$\psi_{c,v} = 1.4 \text{ (Betonda çatlama olmaması için)}$$

$$\psi_{h,v} = \sqrt{\frac{1.5 \times c_{a1}}{h_a}} \quad (\text{E6.71})$$

$$\psi_{h,v} = \sqrt{\frac{1.5 \times 233.33}{350}} = 1$$

$$V_b = 0.66 \times \left(\frac{l_e}{d_a}\right)^{0.2} \times \sqrt{d_a} \times \lambda_a \times \sqrt{f_c} \times (c_{a1})^{1.5} \quad (E6.72)$$

$$V_b = 0.66 \times \left(\frac{8 \times d_a}{d_a}\right)^{0.2} \times \sqrt{14} \times 1 \times \sqrt{20} \times (233.33)^{1.5} = 59661.864 \text{ N}$$

$$V_{cbg} = \frac{A_{VC}}{A_{VC0}} \times \psi_{ec,V} \times \psi_{ed,V} \times \psi_{c,V} \times \psi_{h,V} \times V_b \quad (E6.73)$$

$$V_{cbg} = \frac{309750}{596232} \times 0.749 \times 0.862 \times 1.4 \times 1 \times 59661.864$$

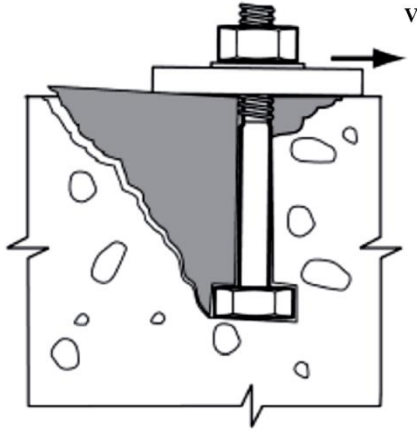
$$V_{cbg} = 28016.248 \text{ N}$$

$$V_b = 0.66 \times \left(\frac{l_e}{d_a}\right)^{0.2} \times \sqrt{d_a} \times \lambda_a \times \sqrt{f_c} \times (c_{a1})^{1.5} \quad (E6.74)$$

$$\phi \times V_{cbg} = ? \quad (E6.75)$$

$$\phi \times V_{cbg} = 0.7 \times 28016.248 = 19611.37 \text{ N}$$

Kesme Etkisinde Betonun Kaldıraç Etkisi Tahkiki



Şekil 8.20. Kesme etkisinde kaldıraç etkisi (ACI, 2014)

$$h_{ef} = 280 \text{ mm} \geq 63.5 \text{ mm} \Rightarrow k_{cp} = 2$$

$$N_{cpg} = N_{cbg} \text{ (Yerinde dökme ankrajlar için)} \quad (E6.76)$$

$$N_{cpg} = 128972 \text{ N}$$

$$V_{cpg} = k_{cp} \times N_{cpg} \quad (E6.77)$$

$$V_{cpg} = 2 \times 128972 = 257944 \text{ N}$$

$$0.75 \times \phi \times V_{cpg} = ? \quad (E6.78)$$

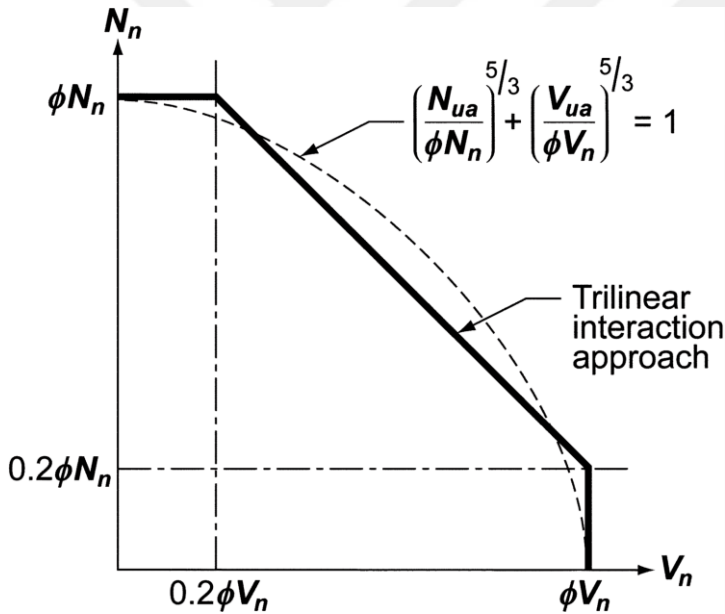
$$0.75 \times \phi \times V_{cpg} = 0.75 \times 0.70 \times 257944 = 135420.6 \text{ N}$$

$$2.5 \times V_u \leq \left(\begin{array}{c} \phi \times V_{sa} \\ 0.75 \times \phi \times V_{cbg} \\ 0.75 \times \phi \times V_{cpg} \end{array} \right)_{\min} \quad (E6.79)$$

$$2.5 \times 3583.333 = 8958.333 \text{ N} \leq \left(\begin{array}{c} 23410.80 \text{ N} \\ 14708.5275 \\ 135420.60 \text{ N} \end{array} \right)_{\min}$$

$$8958.333 \text{ N} \leq 14708.53 \text{ N} \checkmark$$

Çekme ve Kesme Kuvvetlerinin Etkileşimi



Şekil 8.21. Kesme ve çekme kuvvetleri etkileşim denklemi (ACI, 2014)

$$V_{ua} = 3583.333 \text{ N}$$

$$\phi \times V_n = 23410.8 \text{ N}$$

$$\frac{V_{ua}}{\phi \times V_n} = \frac{3583.333}{23410.8} = 0.15 \leq 0.2 \quad (E6.80)$$

$$N_{ua} = 9906 \text{ N}$$

$$\phi \times N_n = 27313.5 \text{ N}$$

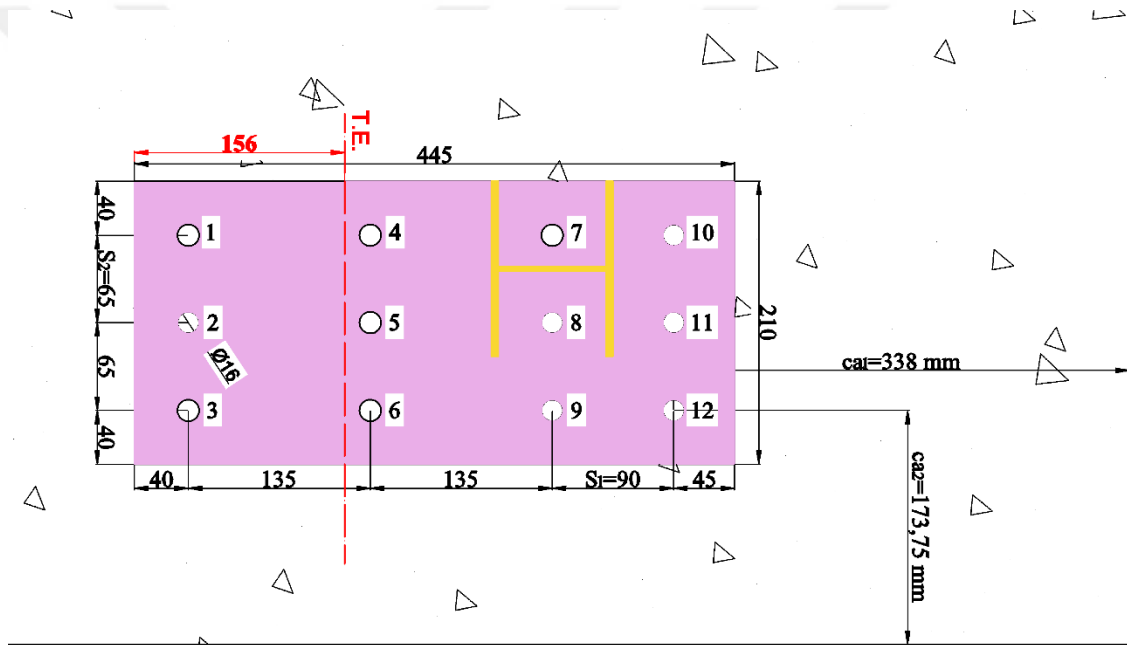
$$\frac{N_{ua}}{\phi \times N_n} > 0.2 \quad (\text{E6.81})$$

$$\frac{9906}{27313.5} = 0.36 > 0.2 \checkmark$$

$$\frac{V_{ua}}{\phi \times V_n} + \frac{N_{ua}}{\phi \times N_n} \leq 1.2 \quad (\text{E6.82})$$

$$0.15 + 0.36 = 0.51 \leq 1.2 \checkmark$$

Taban Plakası2:



Şekil 8.22. GDE-2 ve GDE-3'e ait Taban Plakası-2

GDE2 ve GDE-3'e ait Taban Plakası-2 için hesaplama prosedürü Taban Plakası-1 ile aynı olup burada detaylıca gösterilmesine gerek duyulmamıştır.

EK-7. Deney Elemanlarına ait Beton ve Çelik Malzemelerinin Mekanik Özellikleri**EK-7.1. RDE'ye ait malzemelerin mekanik özellikleri****Çizelge 8.4. RDE'ye ait beton malzemesinin mekanik özellikleri**

	Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Kat	1	10.76	10.04
	2	11.32	
	3	8.04	
2. Kat	1	9.77	9.59
	2	9.46	
	3	9.56	
Sıva	1	14.17	15.52
	2	16.86	
Tuğlalar arası sıva	1	13.68	14.36
	2	15.05	
Temel	1	6.48	6.64
	2	6.80	

Çizelge 8.5. RDE'ye ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri

	Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Ortalama Kopma Dayanımı (MPa)
Ø4	1	243.20	246.60	378.90	377.01
	2	250.00		375.12	
Ø8	1	324.00	323.50	472.45	470.03
	2	323.00		467.62	
Ankraj M12-8.8*	-	800		800	
Ankraj M14-8.8*	-	800		800	
NPU140 st37*	-	350		480	

EK-7.2. GDE-1'e ait malzemelerin mekanik özellikleri**Çizelge 8.6.** GDE-1'e ait beton malzemelerin mekanik özellikleri

Beton	Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Kat	1	6.56	7.29
	2	8.63	
	3	7.73	
	4	6.22	
2. Kat	1	7.70	7.15
	2	7.77	
	3	5.42	
	4	7.70	
Sıva	1	10.25	12.42
	2	14.59	
Tuğlalar Arası Sıva	1	11.38	14.03
	2	16.68	
Temel	1	7.22	7.22
BEÇÇ	1	22.27	20.77
	2	20.40	
	3	19.67	
	4	20.74	
Ara Beton*	1	20.74	20.74

*Betonarme ve çelik çerçeve arasına dökülen beton

Çizelge 8.7. GDE-1'e ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri

Çelik	Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)
Ø4	1	243.20	246.60	378.90	377.01
	2	250.00		375.12	
Ø8	1	324.00	323.50	472.45	470.03
	2	323.00		467.62	
Ankraj M12*	-	800	-	920	-
Ankraj M14*	-	810	-	900	-
Bulon M12 8.8	-	800	-	800	-
BEÇÇ	1	343.00	345.00	505.00	506
	2	347.00		507.00	
Kolon-Kiriş Gövde	1	235.00	235.00	295.00	295.00
Kolon-Kiriş Başlık	1	250.00	250.00	328.42	328.42

*Nominal Değerler

EK-7.3. GDE-2'e ait malzemelerin mekanik özellikleri**Çizelge 8.8.** GDE-2'ye ait beton malzemelerin mekanik özellikleri

Beton	Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Kat	1	10.65	10.22
	2	12.15	
	3	7.85	
2. Kat	1	10.65	9.86
	2	10.53	
	3	7.26	
	4	10.98	
Sıva	1	20.65	20.65
Tuğlalar Arası Sıva	1	23.69	23.69
Temel	1	8.42	8.42
Güçlendirilmiş Temel	1	30.66	30.66
BEÇÇ	1	20.76	20.76
Ara Beton*	1	25.35	25.35

*Betonarme ve çelik çerçeve arasına dökülen beton

Çizelge 8.9. GDE-2'ye ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri

Çelik	Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)
Ø4	1	220.00	227.50	373.12	364.56
	2	235.00		356.00	
Ø8	1	324.00	323.50	472.45	470.03
	2	323.00		467.62	
Ankraj M12*	-	800	-	920	-
Ankraj M14*	-	810	-	900	-
Bulon M12 8.8	-	800	-	800	-
Bulon M12 10.9	-	900	-	1000	-
BEÇÇ	1	343.00	345.00	505.00	506.00
	2	347.00		507.00	
Kolon-Kiriş Gövde	1	235.00	235.00	295.00	295.00
Kolon-Kiriş Başlık	1	250.00	250.00	328.42	328.42

*Nominal Değerler

EK-7.4. GDE-3'e ait malzemelerin mekanik özellikleri**Çizelge 8.10.** GDE-3'e ait beton malzemelerin mekanik özellikleri

Beton	Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Kat	1	12.54	13.18
	2	14.86	
	3	12.39	
	4	12.16	
	5	13.94	
2. Kat	1	4.89	6.04
	2	5.89	
	3	7.02	
	4	6.37	
Sıva	1	11.97	11.84
	2	11.70	
Tuğlalar Arası Sıva	1	12.82	13.77
	2	14.71	
Güçlendirilmiş Temel	1	35	35
BEÇÇ	1	23.46	26.20
	2	28.95	
Ara Beton*	1	34.71	34.71

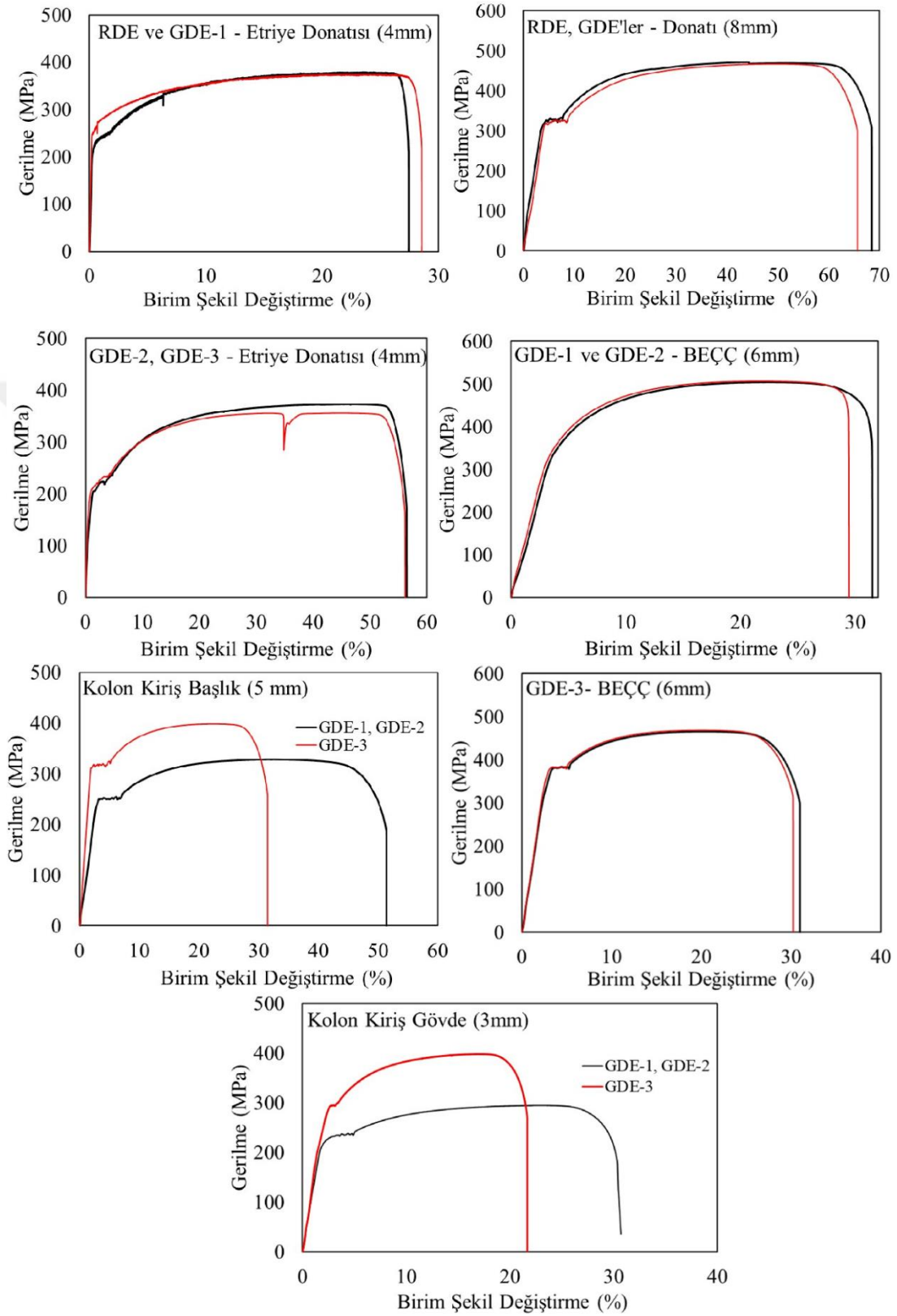
*Betonarme ve çelik çerçeve arasına dökülen beton

Çizelge 8.11. GDE-3'e ait çelik malzemelerin mekanik özellikleri

Çelik	Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Ortalama Kopma Dayanımı (MPa)
Ø4	1	220.00	227.50	373.12	364.56
	2	235.00		356.00	
Ø8	1	324.00	323.50	472.45	470.03
	2	323.00		467.62	
Ankraj M12*	-	800	-	920	-
Ankraj M14*	-	810	-	900	-
Bulon M12 8.8*	-	800	-	800	-
Bulon M12 10.9*	-	900	-	1000	-
BEÇÇ	1	381.00	381.5	465.72	467.41
	2	382.00		469.11	
Kolon-Kiriş Gövde	1	294.00	294.00	398.26	398.26
Kolon-Kiriş Başlık	2	316.00	316.00	398.73	398.73

*Nominal değerler

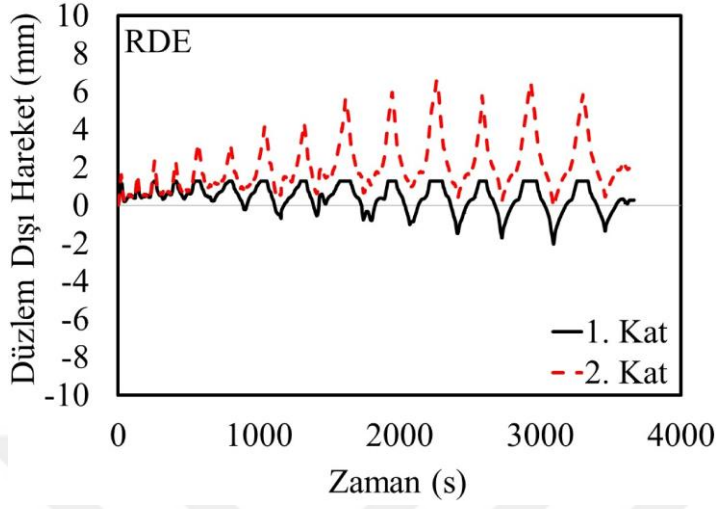
EK-7.5. Deney elemanlarına ait çelik malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri



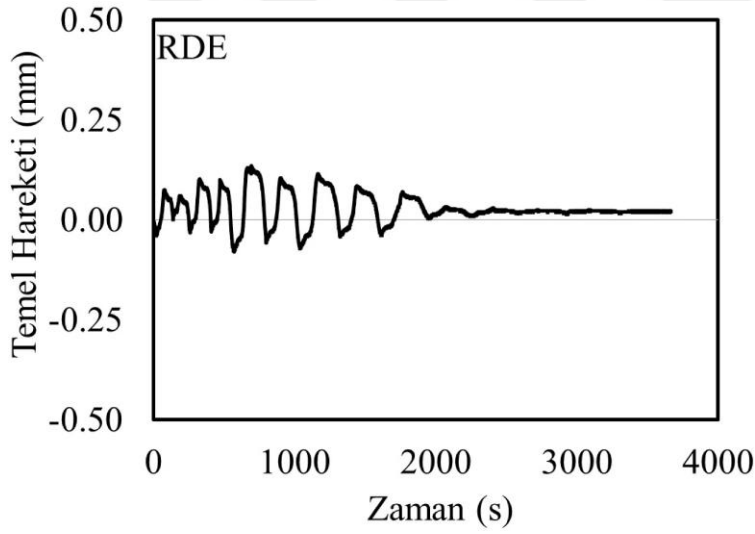
Şekil 8.23. Çelik malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

EK-8. Deney elemanlarına ait deney sonuçları

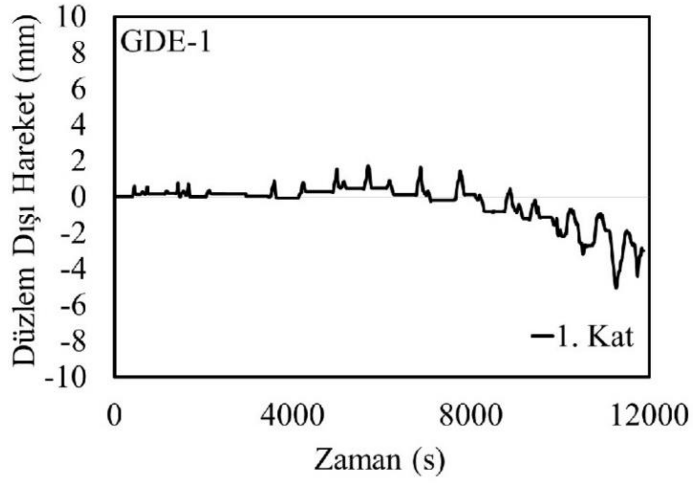
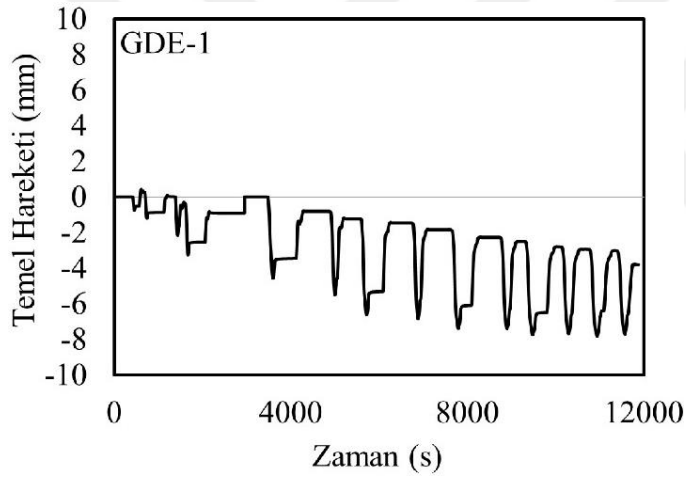
EK-8.1. RDE'ye ait Deney Sonuçları

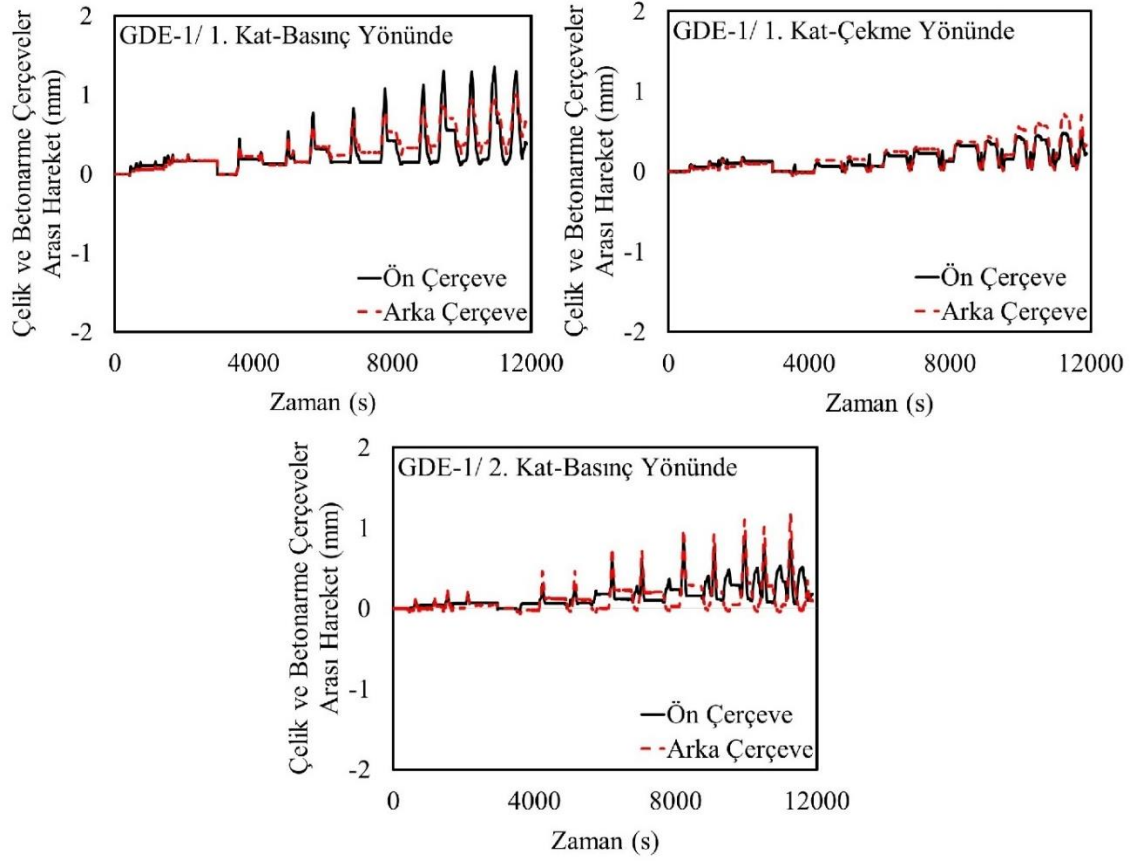


Şekil 8.24. RDE'ye ait düzlem dışı deplasmanlar



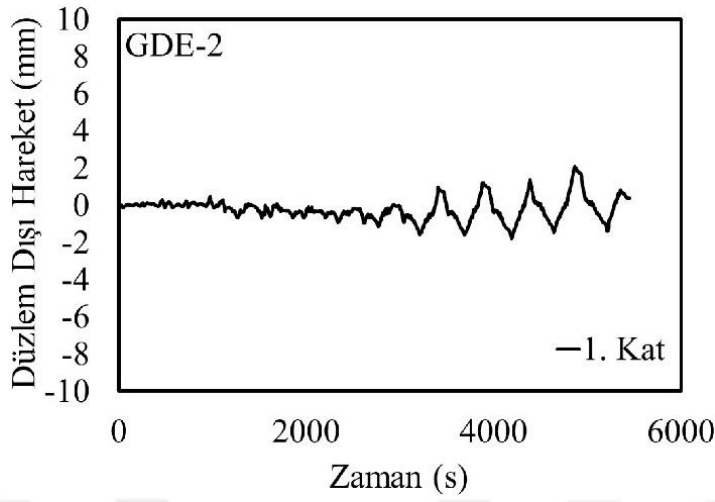
Şekil 8.25. RDE'ye ait temel deplasmanları

EK-8.2. GDE-1'e ait Deney Sonuçları**Şekil 8.26.** GDE-1'e ait düzlem dışı deplasmanlar**Şekil 8.27.** GDE-1'e ait temel deplasmanları

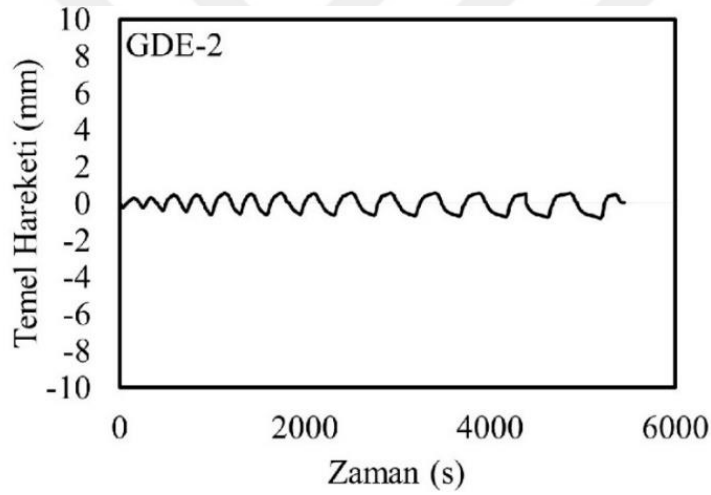


Şekil 8.28. GDE-1'e ait çelik ve betonarme çerçeveler arası göreceli deplasmanlar

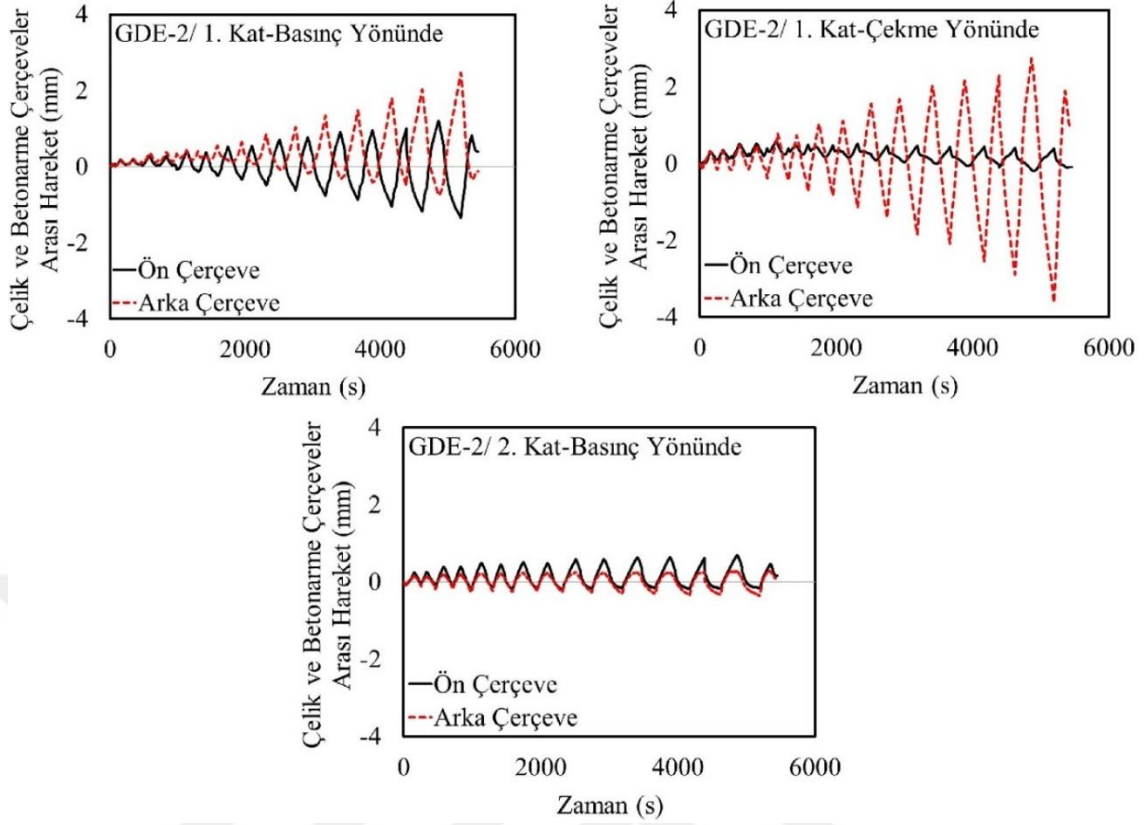
EK-8.3. GDE-2'ye ait Deney Sonuçları



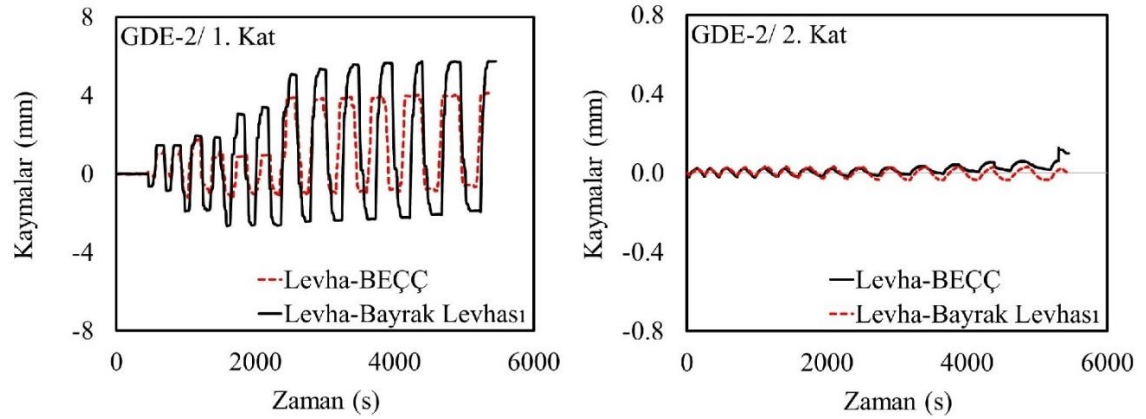
Şekil 8.29. GDE-2'ye ait düzlem dışı deplasmanlar



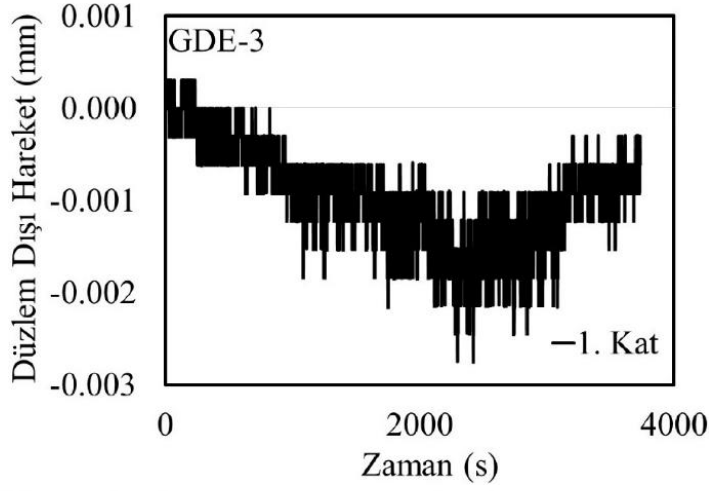
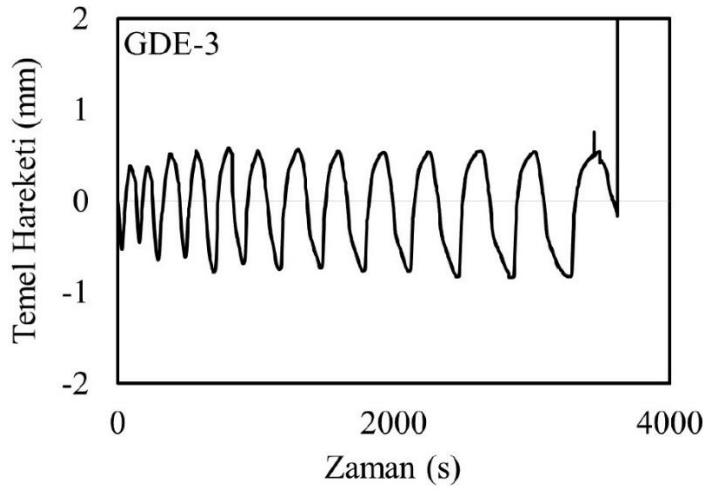
Şekil 8.30. GDE-2'ye ait temel deplasmanları

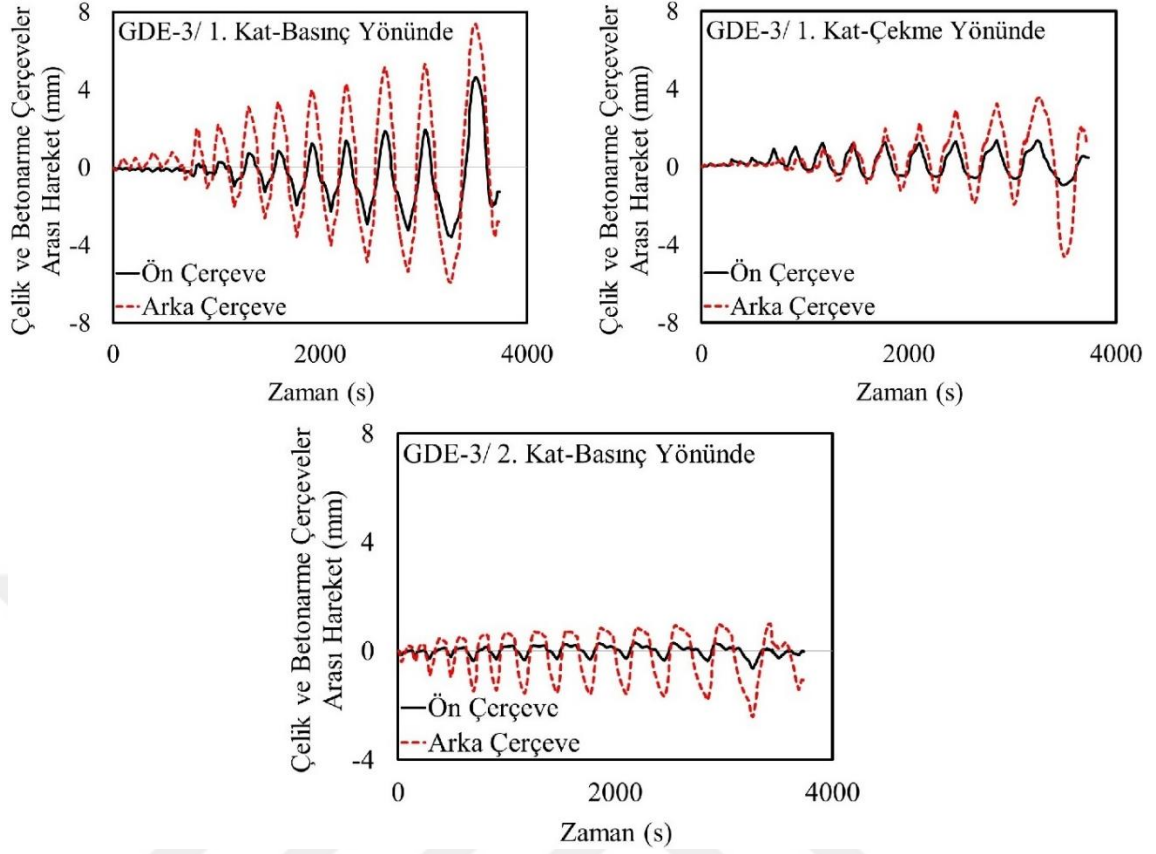


Şekil 8.31. GDE-2'ye ait çelik ve betonarme çerçeveler arası görelî deplasmanlar

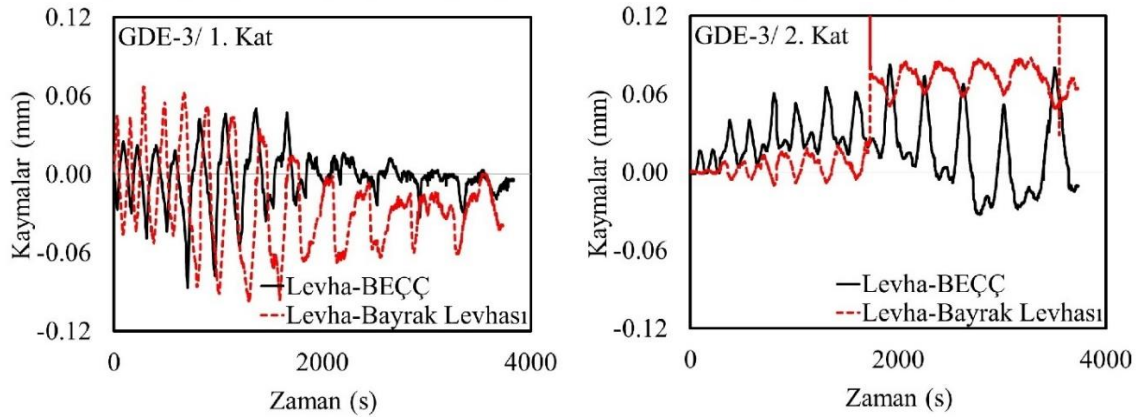


Şekil 8.32. GDE-2'ye ait kaymalar (slot delikten dolayı)

EK-8.4. GDE-3'e ait Deney Sonuçları**Şekil 8.33.** GDE-3'e ait düzlem dışı deplasmanlar**Şekil 8.34.** GDE-3'e ait temel deplasmanları



Şekil 8.35. GDE-3'e ait çelik ve betonarme çerçeveler arası görece deplasmanlar



Şekil 8.36. GDE-3'e ait Kaymalar (dairese delikten dolayı)

ÖZGEÇMİŞ

ELİF FİRUZE ERDİL

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2013-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2011-2013	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Antalya
Lisans	Gaziantep Üniversitesi
2003-2010	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi	Akdeniz Üniversitesi
2011-2022	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Özçelik, R., Dikiciaşık, Y., Erdil, E.F., Erdal, F. (2020). Design of buckling restrained braces with composite technique. Steel And Composite Structures, 35(5), 687-699. Doi: 10.12989/scs.2020.35.5.687.

2- Özçelik, R., Erdil, E.F. (2019). Pseudodynamic Test of a Deficient RC Frame Strengthened with Buckling Restrained Braces, Earthquake Spectra, 35(3), 1163-1187. Doi: 10.1193/122317eqs263m.

3- Özçelik, R., Dikicişik, Y., Erdil, E.F. (2017). The development of the buckling restrained braces with new end restrains, Journal Of Constructional Steel Research, 138, 208-220. Doi: 10.1016/j.jcsr.2017.07.008.

Diğer dergilerde yayımlanan makaleler

1- Özçelik, R., Erdil, E.F. (2017). Analysis of RC Structures Retrofitted with Buckling Restrained Braces. International Journal of Civil Engineering and Architecture, 3(1), 34-45.

2- Özçelik, R., Erdil, E.F. (2017). Nonlinear Time History Analysis of RC Frame Retrofitted with Buckling Restrained Braces. International Journal of Civil Engineering and Architecture, 3(1), 46-54.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Erdil, E.F., Çam M., Şener D., Özçelik R. (2019). The Design, Construction and Cyclic Testing of an Externally Retrofitted 3-Dimensional Reinforced Concrete Structure. 4th Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering (ECOCEE), İstanbul, Türkiye, 17 - 18 Haziran 2019, ss.647-658.

2- Çam M., Şener D., Erdil, E.F., Özçelik R. (2019). The Vibration Tests of a 3-Dimensional Deficient Reinforced Concrete Structure. 4th Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering (ECOCEE), İstanbul, Türkiye, 17 - 18 Haziran 2019, ss. 628-634.

3- Erdil, E.F., Özçelik R. (2018). The Cyclic Testing of a 3D Scaled Deficient Reinforced Concrete Structure. International Congress on Engineering and Architecture, Antalya, Türkiye, 14 - 16 Kasım 2018, ss.1433-1438.

4- Erdil, E.F., Özçelik R. (2018). The Effect of Masonry Infill Walls on the Numerical Modeling of Reinforced Concrete Structure. International Congress on Engineering and Architecture, Antalya, Türkiye, 14 - 16 Kasım 2018, ss. 1428-1432.

5- Özçelik R., Erdil, E.F. (2018). Buckling Restrained Braces with Composite Design Technique. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering, İzmir, Türkiye, 24 - 27 Nisan 2018, cilt.2, ss.638-647.

6- Özçelik R., Erdil, E.F. (2018). The Effect of Concrete Models on Dynamic Analysis of Deficient RC Structures. 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, Türkiye, 21 - 23 Eylül 2016, ss.80.

7- Özçelik R., Erdil, E.F., Civelek K.B. (2016). Pseudo Dynamic Test of RC Frame Retrofitted With Buckling Restrained Brace. 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, Türkiye, 21 - 23 Eylül 2016, ss.42.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Erdil, E.F., Acar, M.H. (2014). Yapı-Zemin Etkileşiminin Antalya İl Ölçeğinde İncelenmesi. 29. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 2. Özel Konulu Sempozyumu, Antalya, Türkiye, 24 - 25 Nisan 2014, ss.257-262

