GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DELİKLİ ÇELİK LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ TUĞLA DUVARLARIN ÇERÇEVE DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Eray ÖZBEK

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2015

Eray ÖZBEK tarafından hazırlanan "Delikli Çelik Levhalarla Güçlendirilmiş Tuğla Duvarların Çerçeve Davranışı Üzerindeki Etkisi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği (Mühendislik Fakültesi) Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

İkinci Danışman: Prof. Dr. Hüsnü CAN

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Başkan : Prof. Dr. Ahmet YAKUT

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Üye : Prof. Dr. Erdem CANBAY

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Üye : Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY

Mimarlık, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Üye : Prof. Dr. A. Samet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Üye : Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Tez Savunma Tarihi: 22/06/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Eray ÖZBEK

22.06.2015

DELİKLİ ÇELİK LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ TUĞLA DUVARLARIN ÇERÇEVE DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

(Doktora Tezi)

Eray ÖZBEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2015

ÖZET

Ülkemizdeki betonarme yapıların büyük bir kısmının taşıyıcı sistemi sadece kolon ve kirişlerden oluşmaktadır. Bu tür binaların depreme karşı güçlendirilmesi ise sıklıkla gündeme gelmektedir. Konuyla ilgili önerilen çeşitli güçlendirme yöntemleri olmasına rağmen bunların uygulanabilirliği çoğu zaman zor ve zaman alıcıdır. Birçok durumda ise binanın uzun bir süre için tahliye edilmesi gerekmektedir. Önerilen yöntemlerden biri de betonarme çerçeve içindeki mevcut tuğla duvarların güçlendirilmesidir. Bu konuda önemli sayılabilecek adımlar atılmış ve karbon lifli kumaş takviyesi üzerine yoğunlaşılmıştır. Ancak karbon lifli kumaş; yurt dışından ithal edilen, oldukça pahalı ve gevrek davranışa sahip bir malzeme olmakla birlikte, uygulamasında yine oldukça maliyetli ve yanıcı epoksi yapıştırıcıların kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada ise; diğer çalışmalardan farklı olarak, karbon lifli kumaşlara alternatif olabilecek hem ucuz, hem yerli üretim ve çok daha sünek davranabilen delikli çelik levhalar kullanılmıştır. Araştırma, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında deneysel olarak yürütülmüştür. Deney elemanları ½ ölçekli kolon, kiriş ve temelden oluşan betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Üretilen yalın elemanların dolgu duvarları ise çeşitli yöntemler kullanılarak delikli çelik levhalarla takviye edilmiştir. Çalışma kapsamında 2'si referans, 12 adet güçlendirilmiş olmak üzere 14 adet deney elemanı üretilmiş ve depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Çalışmada güçlendirilmiş tuğla duvar ile betonarme çerçeve beraber ele alınmış ve oluşturulan yeni sistemlerin deprem yükleri altındaki davranışı araştırılmıştır. Sonuçlar deney elemanlarının oldukça sünek davrandığını ve % 7,5 göreli kat ötelenme oranlarında dahi, dayanımda önemli bir kayıp olmadığını göstermiştir. Gelecekte birçok betonarme yapının hem kolay uygulanabilen, hem de maliyeti oldukça az olan bu yöntemle depreme karşı güçlendirilebileceği düşünülmüştür. Böylece olası göçmelerin önlenebileceği, can ve mal kayıplarının en aza indirilebileceği kanaatine varılmıştır.

Bilim Kodu : 911.1.145
Anahtar Kelimeler : Delikli çelik levha, Güçlendirilmiş tuğla duvarlar, Dolgu duvarlar
Sayfa Adedi : 176
Danışman : Doç. Dr. Sabahattin AYKAÇ
İkinci Danışman : Prof. Dr. Hüsnü CAN

THE EFECTS ON FRAME BEHAVIOUR OF BRICK WALLS STRENGTHENED WITH PERFORATED STEEL PLATES

(Ph. D. Thesis)

Eray ÖZBEK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2015

ABSTRACT

The structural systems of a great majority of structures in Turkey are composed of only columns and beams. Strengthening of these structures against earthquake is a significant cause of concern. Although various seismic strengthening techniques were proposed for RC frames, most of these techniques are difficult to apply and time consuming. In most of these applications, the structure need to be evacuated for long durations. Strengthening the brick infill walls of a RC frame is amongst the suggested seismic strengthening techniques. Numerous studies on wall strengthening has been investigated, mostly focused on the use of CFRP laminates and fabrics. Nonetheless, CFRP fabrics are quite costly materials since they are generally exported from other countries and they have quite brittle stress-strain behavior. Furthermore, epoxy, which is also a costly material and has low fire resistance is need to be used for bonding the CFRP fabrics and laminates to the infill walls. Different from these studies, perforated steel plates, which are less costly and much more ductile compared to FRP materials, were used for strengthening in the present study. The experimental study was conducted in the Structural Mechanics Laboratory of the Civil Engineering Department at the Faculty of Engineering, Gazi University, Ankara. The half-scale test specimens were composed of columns, a beam, a foundation and an infill wall. The infill walls of the specimens were strengthened with perforated steel plates through various application techniques. Two reference and twelve strengthened specimens were tested under reversed cyclic lateral earthquake loading. The aims of the present study are to investigate the seismic behavior of the RC frames with strengthened infills and the influence of wall strengthening on the overall behavior of the frames. The tests indicated that the strengthened specimens exhibited quite ductile behavior and did not experience reductions in the load-carrying capacity even at deformation levels as high as 7,5 % lateral drift of floor. Many structures can be strengthened with the help of this easy-to-apply and economical technique against earthquakes. The collapse of several structures can be prevented and the lives of the inhabitants can be saved in this way.

Science Code : 911.1.145
Key Words : Perforated steel plate, Strengthening of brick infill walls, Infill walls
Page Number : 176
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ
Co-Supervisor : Prof. Dr. Hüsnü CAN

TEŞEKKÜR

Bu tez, beni bugünlere getiren ve doktora çalışmam sırasında hayatını kaybeden annem Nazmiye ÖZBEK'e adanmıştır. Bana her zaman hayatın zorluklarına karşı duruşuyla güç veren anneme sonsuz teşekkürler. Hayatta kendisine ihtiyacım olduğu her anda beni yalnız bırakmayan babam Cengiz ÖZBEK, yine bu çalışma boyunca manevi desteğinden başka gerektiğinde yapı mekaniği laboratuarımızdaki çok zor çalışma şartlarımda bana yardım elini uzatmıştır. Babama ne kadar teşekkür etsem yine azdır. Bu araştırmayı planlayıp yöneten, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve ailemdeki birinden farklı görmediğim değerli hocam Doç. Dr. Sabahattin AYKAÇ'a teşekkür ederim. Kendisinin bana katkıları sadece bu çalışma kapsamında olmayıp, hayatın içindeki her konudadır. Okuldaki çalışma hayatım boyunca beni destekleyen değerli hocalarım Prof. Dr. Hüsnü CAN ve Doç. Dr. Bengi AYKAÇ bu tezim boyunca da bana yardım etmiş, beni yönlendirmiştir. Kendilerine çok teşekkür ederim. Araştırmamda önemli katkıları olan çalışma arkadaşlarım Arş.Gör. Meryem BÖCEK, Arş. Gör. Murat AYHAN ve Arş. Gör. Muhammed GÜMÜŞ'e ve Yapı Mekaniği Laboratuvarımızın sorumlusu Uzm. Faruk OGÜN'e çok teşekkür ederim. Laboratuar çalışmalarımın yükünü kaldırmamda bana yardım eden, özveriyle çalışan okulumuzun öğrencilerinden; Çağrı SEYMEN ve Neslihan KARACA' ya teşekkür ederim. Çalışmada kullanılan delikli sacları titizlikle hazırlayan ve bu konudaki teknik desteklerini esirgemeyen DELSAÇ Delikli Saç San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne ayrıca teşekkür ederim. Bu araştırma 113M437 kodlu, TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yapılmıştır. Ülkemizin bilime destek veren saygın kurumu TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Bu tezi oluşturmamda katkısı olan ve adını sayamadığım herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1

2. AMAÇ VE KAPSAM 3

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR 5

3.1. Dolgu Duvar Güçlendirme Yöntemleri 5

3.2. Altın, Anil, Kara ve Kaya'nın (2008) Çalışması 8

3.3. Erdem, Akyüz, Ersoy ve Özcebe'nin (2006) Çalışması 8

3.4. Özkaynak ve Diğerleri'nin (2011) Çalışması 9

3.5. Yüksel ve Diğerleri'nin (2010) Çalışması 9

3.6. Akın'ın (2011) Çalışması 10

3.7. Coza'nın (2009) Çalışması 11

3.8. Tateishi, Jinno, Kimoto ve Hattori'nin (2009) Çalışması 11

3.9. Papanicolaou, Triantafillou ve Lekka'nın (2011) Çalışması 12

3.10. Koutromanos ve Diğerleri'nin (2013) Çalışması 12

3.11. Kyriakides ve Billington'nın (2014) Çalışması 12

3.12. Baran, Aktaş ve Aykaç'ın (2014) Çalışması 13

Sayfa

3.13. Baran'ın (2005) Çalışması 13

3.14. Özbek ve Can'ın (2012) Çalışması 14

3.15. Altin, Anil, Kopraman ve Belgin'nin (2010) Çalışması 15

3.16. Choi ve Park'ın (2011) Çalışması 15

3.17. Özçelik'in (2011) Çalışması 16

3.18. Sevil'in (2010) Çalışması 17

3.19. Koutas, Bousias ve Triantafillou'nun (2014) Çalışması 17

3.20. Anıl ve Altın'nın (2014) Çalışması 17

3.21. Strepelias, Palios, Bousias ve Fardis'in (2014) Çalışması 18

3.22. Babayani'nin (2012) Çalışması 19

4. DENEYSEL ÇALIŞMA 21

4.1. Genel İlkeler 21

4.2. Güçlendirme Öncesi Deney Elemanları 22

4.2.1. Betonarme çerçeve ve dolgu duvar ebatları 22

4.2.2. Betonarme çerçevenin donatı detayı 23

4.2.3. Betonarme çerçevenin kalıbı ve beton dökümü 25

4.2.4. Tuğla dolgu duvar imalatı 26

4.3. Deney Elemanlarının Özellikleri 27

4.4. Delikli Levhalarla Güçlendirme Tekniği 29

4.5. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 32

4.5.1. Beton 32

4.5.2. Donatı çeliği 33

4.5.3. Tuğlalar 34

4.5.4. Sıva ve harç 35

Sayfa

4.5.5. Delikli çelik levhalar 36
4.5.6. Gijonlar ve çelik profiller 37
4.6. Yükleme Düzeneği 37
4.7. Ölçüm Düzeni ve Değerlendirmesi 40
4.7.1. Net yatay ötelenmenin hesabı 45
4.8. Deney Prosedürleri 46
5. DENEYSEL SÜREÇ 49
5.1. R1 Deneyi 49
5.2. R2 Deneyi 51
5.3. S1ZN200 Deneyi 54
5.4. S1ZN150 Deneyi 57
5.4.1. Materyal ve yöntem ilavesi 57
5.4.2. S1ZN150 deneyi sonuçları 60
5.5. S1ZY200 Deneyi 63
5.5.1. Güçlendirilmiş duvarı kolonlara bağlama yöntemi 63
5.5.2. S1ZY200 deneyi sonuçları 64
5.6. S1ZY150 Deneyi 67
5.7. S1.5ZN200 Deneyi 71
5.8. S1.5ZN150 Deneyi 74
5.9. S1.5ZY200 Deneyi 76
5.10. S1.5ZY150 Deneyi 79
5.11. S2ZN200 Deneyi 83
5.12. S2ZN150 Deneyi 86
5.13. S2ZY200 Deneyi 89

Sayfa

5.14. S2ZY150 Deneyi 93
5.15. Deneysel Süreç Özeti 96
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 97
6.1. Genel 97
6.2. Temel Ölçütlere Göre Değerlendirmeler 101
6.2.1. Dayanım 101
6.2.2. Süneklik 105
6.2.3. Ötelenme oranı 109
6.2.4. Rijitlik 121
6.2.5. Enerji dönüştürme 129
6.3. Güçlendirilmiş Deney Elemanları Arasında Sistematik Karşılaştırma 135
6.3.1. Delikli çelik levha kalınlıklarına göre karşılaştırma 135
6.3.2. Delikli çelik levhaların kolonlara bağlantısına göre karşılaştırma 138
6.3.3. Delikli çelik levhaları bulonlama aralığına göre karşılaştırma 141
6.4. Geçmişte CFRP Kullanılarak Yapılan Benzer Çalışmalarla Karşılaştırma 143
7. ANALİTİK YAKLAŞIM 151
7.1. Eşdeğer Basınç Çubuğu Modeli 154
7.2. R2 Deney Elemanı Üzerinde Analitik Çalışma 156
7.3. Güçlendirilmiş Deney Elemanları Üzerinde Analitik Çalışma 159
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 163
8.1. Sonuçlar 164
8.2. Öneriler 167
KAYNAKLAR 171
ÖZGEÇMİŞ 176

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. CFRP ile yapılan geçmiş çalışmalar ve ulaşılan en büyük ötelenme oranları 6

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri 27

Çizelge 4.2. İlave değişkenler 28

Çizelge 4.3. Beton karışım oranları 32

Çizelge 4.4. Ortalama beton basınç dayanımları 33

Çizelge 4.5. Donatı çekme dayanımları 34

Çizelge 4.6. Tuğla dayanımları 35

Çizelge 4.7. Sıva harcı hacimsel karışım oranları 36

Çizelge 4.8. Sıva harcı basınç dayanımları 36

Çizelge 6.1. Deney elemanlarının dayanım değerleri 102

Çizelge 6.2. Süneklik terimleri ve oranları 107

Çizelge 6.3. En yüksek ötelenme oranları 117

Çizelge 6.4. Göreli kat ötelenmesi sınırları 119

Çizelge 6.5. Dolgu duvarlarda göreli kat ötelemesi sınırları 120

Çizelge 6.6. Deney elemanlarının rijitlik değerleri 125

Çizelge 6.7. Deney elemanlarının R2'ye göre rijitlik değerleri 125

Çizelge 6.8. Dönüştürülen toplam enerji miktarları ve kümülatif plastik deformasyonlar 133

Çizelge 6.9. Güçlendirilmiş elemanların performans özetleri 136

Çizelge 6.10. Güçlendirilmiş elemanların karşılaştırmalı performans özetleri 138

Çizelge 6.11. Güçlendirilmiş elemanların gruplandırılmış performans özetleri 141

Çizelge 6.12. CFRP ile yapılan geçmiş çalışmalarda ötelenme oranları ve dayanım artışı 144

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Yatay yük- birinci kat ötelenme oranları 9

Şekil 3.2. Deney elemanları ve yük-kat ötelenme oranları 10

Şekil 3.3. Choi ve Park'ın (2011) çalışmasında yük-kat ötelenme oranları grafiği..... 16

Şekil 3.4. Monolitik ve sonradan oluşturulmuş perde yük-ötelenme oranı eğrileri..... 18

Şekil 4.1. Deney elemanlarının boyutları 23

Şekil 4.2. Donatı planı 24

Şekil 4.3. Delikli levhalarla güçlendirme detayı..... 31

Şekil 4.4. Delikli çelik levha geometrisi 37

Şekil 4.5. Ölçüm düzeni..... 41

Şekil 4.6. Kayma deformasyonları..... 44

Şekil 4.7. Yükleme programı akış şeması..... 47

Şekil 5.1. R1 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 51

Şekil 5.2. R2 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 53

Şekil 5.3. S1ZN200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 56

Şekil 5.4. Kolon ve birleşim bölgesi güçlendirme detayları..... 59

Şekil 5.5. S1ZN150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 62

Şekil 5.6. S1ZY200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 67

Şekil 5.7. S1ZY150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 70

Şekil 5.8. S1.5ZN200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 73

Şekil 5.9. S1.5ZN150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 76

Şekil 5.10. S1.5ZY200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 79

Şekil 5.11. S1.5ZY150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 83

Şekil 5.12. S2ZN200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi..... 86

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.13. S2ZN150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi 89

Şekil 5.14. S2ZY200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi 92

Şekil 5.15. S2ZY150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi 95

Şekil 6.1. Güçlendirilmiş elemanların R2 ile karşılaştırmalı yük-deplasman zarf eğrileri (a) 98

Şekil 6.2. Güçlendirilmiş elemanların R2 ile karşılaştırmalı yük-deplasman zarf eğrileri (b) 99

Şekil 6.3. R1 ve R2 referans elemanlarının yük-yatay deplasman zarf eğrileri 100

Şekil 6.4. R1 deney elemanında dayanımın bulunuşu 101

Şekil 6.5. S1ZN200'de akma ve süneklik deformasyonları analizi 106

Şekil 6.6. R1 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 110

Şekil 6.7. S1ZN200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 110

Şekil 6.8. S1ZN150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 111

Şekil 6.9. S1ZY200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 111

Şekil 6.10. S1ZY150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 112

Şekil 6.11. S1.5ZN200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 112

Şekil 6.12. S1.5ZN150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 113

Şekil 6.13. S1.5ZY200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 113

Şekil 6.14. S1.5ZY150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 114

Şekil 6.15. S2ZN200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 114

Şekil 6.16. S2ZN150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 115

Şekil 6.17. S2ZY200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 115

Şekil 6.18. S2ZY150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri 116

Şekil 6.19. S1ZN200'de en yüksek ötelenme oranı analizi 116

Şekil 6.20. Kesit hasar bölgeleri (DBYBHY, 2007) 119

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.21. S1ZN150'de rijitlik (K_{in}, K_{Pu}) analizi 123

Şekil 6.22. S1ZN150'de rijitlik ($K_{0.0035}$) analizi 124

Şekil 6.23. Enerji dönüştürme kapasite analizi hesap yöntemi 130

Şekil 6.24. Güçlendirilmiş elemanların referans elemanları ile karşılaştırmalı dönüştürülen enerji-plastik deplasman eğrileri (a) 131

Şekil 6.25. Güçlendirilmiş elemanların referans elemanları ile karşılaştırmalı dönüştürülen enerji-plastik deplasman eğrileri (b) 132

Şekil 6.26. Duvarın kolonlara bağlantısının olmadığı elemanların karşılaştırılması 135

Şekil 6.27. Duvarın kolonlara bağlantısı olan elemanların karşılaştırılması 136

Şekil 6.28. Güçlendirilmiş elemanların kolonlara bağlantı durumuna göre karşılaştırılması 139

Şekil 6.29. Güçlendirilmiş elemanların bulon aralığına göre karşılaştırılması 142

Şekil 6.30. R1 kolonu karşılıklı etkileşim diyagramı 147

Şekil 6.31. Ard-germe halatı ile yapılan eksenel yükleme düzeneği örneği 148

Şekil 6.32. Deneysel bir çalışmada CFRP uygulama örneği 149

Şekil 6.33. Deneysel başka bir çalışmada CFRP uygulama örneği 149

Şekil 6.34. Deneysel çalışmada CFRP uygulama örneği 150

Şekil 6.35. Deneysel bir çalışmada CFRP yapıştırma örneği 150

Şekil 7.1. Yatay yük altında duvarda oluşan basınç bölgesi ve eşdeğer basınç çubuğu 155

Şekil 7.2. Duvar köşeleri ezildikten sonra basınç çubuğunun yer değiştirmesi 156

Şekil 7.3. R1 elemanının göçme modu 160

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Duvar köşelerinin takviyesiyle bu bölgedeki ezilme önlenmiştir..... 15

Resim 3.2. S0,5-CL deney elemanı deney sonu hasar durumu 19

Resim 4.1. Betonarme çerçeve kalıbı ve beton dökümü..... 25

Resim 4.2. Sıvası tamamlanmış dolgu duvar 26

Resim 4.3. Delikli levhaları duvara bağlamakta kullanılan gijon..... 29

Resim 4.4. Köşe bölgelerde ezilmeye karşı önlem 30

Resim 4.5. Yatay delikli tuğlanın boyutları..... 34

Resim 4.6. Yükleme düzeneği 39

Resim 4.7. Düzlem dışı hareketi kısıtlayan düzenek 40

Resim 4.8. D_1 ve D_2 cihazları ölçüm düzeni 42

Resim 4.9. Sağ kolon alt uç eğrilik ölçümü hesabında kullanılan değişkenler..... 42

Resim 4.10. Kayma deformasyonu ölçümü alınan LVDT örnekleri 43

Resim 4.11.Temel-kolon arakesitinde rölatif ötelenme kontrolü 45

Resim 5.1. R1 deney elemanı 50

Resim 5.2. R1 deney elemanı göçme modu..... 50

Resim 5.3. R2 deney elemanı 52

Resim 5.4. R2 deney elemanı göçme modu..... 53

Resim 5.5. S1ZN200 deney elemanı..... 54

Resim 5.6. S1ZN200 deney elemanı göçme modu (arka yüz) 55

Resim 5.7. S1ZN200 deney elemanı göçme modu (ön yüz) 56

Resim 5.8. Kolonların mantolanması..... 57

Resim 5.9. Boşlukların seramik yapıştırıcı ile doldurulması..... 58

Resim 5.10. Birleşim bölgesi baskılanması ve kolonları bağlayan çubuk..... 60

Resim **Sayfa**

Resim 5.11. S1ZN150 deney elemanı..... 60

Resim 5.12. S1ZN150 deney elemanı göçme modu..... 62

Resim 5.13. Güçlendirilmiş duvarın kolonlara bağlanması..... 63

Resim 5.14. S1ZY200 deney elemanı..... 65

Resim 5.15. S1ZY200 deney elemanı göçme modu..... 66

Resim 5.16. S1ZY200' de tuğla duvar hasar durumu..... 66

Resim 5.17. Kolon-duvar bağlantı levhalarıyla köşe lamaları arasındaki kaynak..... 68

Resim 5.18. S1ZY150 deney elemanı..... 68

Resim 5.19. S1ZY150 deney elemanı göçme modu..... 70

Resim 5.20. S1ZY150'de tuğla duvar hasar durumu..... 71

Resim 5.21. S1.5ZN200 deney elemanı..... 72

Resim 5.22. S1.5ZN200 deney elemanı göçme modu..... 72

Resim 5.23. S1.5ZN200'de tuğla duvar hasar durumu..... 73

Resim 5.24. S1.5ZN150 deney elemanı..... 74

Resim 5.25. S1.5ZN150 deney elemanı göçme modu..... 75

Resim 5.26. S1.5ZN150'de tuğla duvar hasar durumu..... 75

Resim 5.27. S1.5ZY200 deney elemanı..... 77

Resim 5.28. S1.5ZY200 deney elemanı göçme modu..... 78

Resim 5.29. S1.5ZY200 deney elemanının düzlem dışı ötelenmesi..... 78

Resim 5.30. Düzlem dışı ötelenmeleri sınırlayan mekanizma..... 80

Resim 5.31. S1.5ZY150 deney elemanı..... 80

Resim 5.32. S1.5ZY150 deney elemanı göçme modu..... 82

Resim 5.33. S1.5ZY150'de tuğla duvar hasar durumu..... 82

Resim 5.34. S2ZN200 deney elemanı..... 84

Resim **Sayfa**

Resim 5.35. S2ZN200 deney elemanı göçme modu 85

Resim 5.36. S2ZN200'de tuğla duvar hasar durumu 85

Resim 5.37. S2ZN150 deney elemanı 87

Resim 5.38. S2ZN150 deney elemanı göçme modu 88

Resim 5.39. S2ZN150'de tuğla duvar hasar durumu 88

Resim 5.40. S2ZY200'de duvar kolon bağlantısında ilave kaynaklar 90

Resim 5.41. S2ZY200 deney elemanı 90

Resim 5.42. S2ZY200 deney elemanı göçme modu 91

Resim 5.43. S2ZY200'de tuğla duvar hasar durumu 92

Resim 5.44. S2ZY150 deney elemanı 93

Resim 5.45. S2ZY150 deney elemanı göçme modu 94

Resim 5.46. S2ZY150'de tuğla duvar hasar durumu 95

Resim 6.1. Karbon kumaşların sıyrılması ve yırtılması 144

Resim 6.2. Karbon kumaş şeritlerin yırtılması 145

Resim 6.3. Karbon kumaş şeritlerin kopması ve yırtılması 145

Resim 6.4. Ard-germe halatındaki kuvvetin bileşkeleri 148

Resim 7.1. Dolgu duvar nedeniyle kolonlarda oluşan kesme kırılmaları 151

Resim 7.2. Yatay derzlerde oluşan kayma hasarı 152

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_{net}	Net yüzey alanı
$A_{brüt}$	Brüt yüzey alanı
E_c	Betonun elastisite modülü
$E_{çer}$	Çerçeve betonunun elastisite modülü
E_{dolgu}	Dolgunun elastisite modülü
$K_{0.0035}$	%0,35 ötelenmede sekant rijitliği
K_{in}	Başlangıç rijitliği
K_{Pu}	En yüksek yükte sekant rijitliği
M_b	Denge durumunda moment kapasitesi
M_p	Plasik mafsalların moment kapasitesi
M_o	Kolon moment kapasitesi
N_b	Denge durumunda eksenel yük kapasitesi
N_o	Kolon eksenel yük kapasitesi
P_u	Maksimum dayanım
P_{uort}	Ortalama maksimum dayanım
V_{cr}	Betonarme kesitin çatlama dayanımı
V_{dolgu}	Dolgu duvar yük kapasitesinin yatay bileşeni
V_{gdolgu}	Güçlendirilmiş duvarın taşıyabildiği yatay kuvvet
a	Eğrilik hesabında kullanılan LVDT'ler arası mesafe
a_{dolgu}	Eşdeğer basınç çubuğu genişliği
b	LVDT'lerin temel üst yüzeyine mesafesi
b_w	Kesit genişliği
d	Kesit faydalı yüksekliği
$d_{0,85}$	Süneklik deformasyon değeri
d_d	Dolgu duvarın köşegen uzunluğu
d_i	d_i nolu LVDT ölçüm değeri
d_{ix}	d_i nolu LVDT ölçüm değerinin yatayda iz düşümü

Simgeler	Açıklamalar
d_x	Ortalama yatay kayma deformasyonu
d_y	Akma deformasyonu
f_c	Beton basınç dayanımı
f_{ck}	Karakteristik beton basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun tasarım çekme dayanımı
f_{ctk}	Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı
f_y	Çeliğin akma dayanımı
$f_{y\ dolgu}$	Dolgu duvarın yatay doğrultudaki dayanımı
f_u	Çeliğin kopma dayanımı
h_{dol}	Dolgu duvarın yüksekliği
h_{duvar}	Dolgu duvar uzunluğu
h_{kol}	Kolonun kiriş aksları arasındaki yüksekliği
I_{kol}	Kolonun atalet momenti
k_{dolgu}	Dolgu duvarın rijitliği
k_i	Eğrilik
l_{duvar}	Dolgu duvar uzunluğu
t_{dolgu}	Dolgu duvarın kalınlığı
α	Kayma deformasyonu ölçen LVDT'nin yatayla açısı
γ_i	D_i ölçüm değerinden hesaplanan kayma açısı
γ	Ortalama kayma açısı
θ	Dolgu duvar köşegeninin yatayla yaptığı açı (radyan)

Kısaltmalar	Açıklamalar
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
CFRP	Karbon lifli kumaş
DBYBHY	Dep. bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönet.
ECC	Çimento esaslı kompozit malzeme
FEMA	Federal Acil Durum Yönetim Kurumu
GÇ	Göçme sınırı
GV	Güvenlik sınırı
İÇÇ	İç çelik çerçeve
İTVÇÇ	İç ters V çelik çapraz
LVDT	Elektronik deplasman ölçer
MN	Minimum hasar sınırı
RC	Betonarme
TRM	Tekstil katkılı sıva harcı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UPS	Kesintisiz güç kaynağı

1. GİRİŞ

Ülkemizde sıkça yaşanan doğal afetlerden birisi depremdir. Bilindiği üzere bu afet sonucunda ülkemizdeki yapılar tamamen veya kısmen yıkılmakta, oldukça büyük çapta can ve mal kayıpları oluşmaktadır. Oluşabilecek bu kayıpları önlemenin yollarından birisi ise depreme karşı güvensiz mevcut yapıların güçlendirilmesidir. Ülkemizdeki ve dünyadaki araştırmacılar yıllardır çeşitli güçlendirme teknikleri üzerinde çalışmaktadır. Bunlar taşıyıcı elemanların veya taşıyıcı sistemin güçlendirilmesi şeklinde olmaktadır.

Sistem güçlendirmesi yöntemlerinden mevcut tuğla duvarın yıkılıp yerine çerçeveye kuvvet aktaran yeni bir betonarme perde duvar üretilmesi hemen akla gelen ilk yöntem olmakla beraber, uygulamada da sıkça kullanılmaktadır. Ancak başarısını kanıtlamış bu yöntemin uygulaması oldukça zahmetli, zaman alıcı ve maliyetlidir. Üstelik yapı içinde ikamet eden veya çalışanların aylarca sürecek bir çalışma için yapıyı boşaltmaları gerekmektedir. Bu da güçlendirme maliyetine fazladan bir külfet getirmektedir.

Yapı içerisinde kolon ve kirişlerden meydana gelen çerçevenin içi mimari nedenlerden ötürü çoğu zaman tuğla duvarlar ile kapatılmaktadır. Bu şekilde oluşturulmuş tuğla duvarlar hesaplarda taşıyıcı olarak kabul edilmese de deprem kuvvetleri altında boş çerçeveye oranla rijitliği ve dayanımı arttırdığını daha önce yapılan araştırmalar ortaya koymuştur [1-3].

Bu çalışmada betonarme çerçeve içindeki mevcut tuğla duvarlar değerlendirilerek delikli çelik levhalarla deprem yüklerine karşı güçlendirilmeye çalışılmıştır. Delikli çelik levhalar; yerli üretim, kolaylıkla edinilebilir, deliklerinden dolayı düz çeliğe göre çok daha sünek davranabilen, alternatif malzemelere göre daha ucuz, uygulamaya elverişli bir malzemedir. Ayrıca bütün bunların yanında malzemenin düzenli delikleri sayesinde mevcut tesisatlara zarar verilmeden uygulanabilmesi, tamirat vb. durumlarında sökülüp tekrar takılabilmesi, yapı kullanım hacminde önemli bir değişim olmadan alçı sıvayla gizlenebilmesi, %100 geri dönüşümlü olması, kanserojen kimyasallar içermemesi, düz levhalara göre %50 daha hafif olması gibi avantajlı ek özellikleri de mevcuttur.

Malzemenin etkinliği ilk olarak Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında kirişleri eğilmeye karşı güçlendirme çalışmalarında araştırılmış ve oldukça olumlu sonuçlar alınmıştır [4]. Yine bu malzemenin sadece yalın tuğla duvarlar üzerindeki etkisi iki adet yüksek lisans çalışmasında denenmiş ve oldukça umut veren sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan sınırlı sayıdaki deneysel çalışmalarda delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların monotonik ve tersinir yükler altındaki davranışları incelenmiş ve dayanımın yaklaşık 2,5 kat, dönüştürülen enerjinin ise yaklaşık 10 kat arttırılabildiği görülmüştür. Normalde oldukça gevrek davranış gösteren tuğla duvarların, önerilen yöntem ile güçlendirildiğinde şaşırtıcı ölçüde sünek davrandığı ve denge altı sünek bir kiriş ile kıyaslanabilecek ölçüde sünekleştiği görülmüştür [5-6].

Bu tez ise daha önce yapılmış bu çalışmaların devamı niteliğinde olup, çalışmada gerçek yapıdaki gibi güçlendirilmiş duvar ile betonarme çerçeve beraber ele alınarak, söz konusu yöntemlerle güçlendirilmiş tuğla duvarların, çerçevenin deprem davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Bu doğrultuda geniş kapsamlı deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deney elemanları ½ ölçekli olup; kolon, kiriş ve temelden oluşan betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Eleman üretiminde ülkemizdeki güçlendirme ihtiyacı doğan yapılarda sık rastlanan kusurların (düşük beton dayanımı, seyrek ve eksik etriye, özensiz duvar işçiliği) bulunmasına özen gösterilmiştir. Oluşturulan yalın elemanlar delikli çelik levhalarla takviye edilmiş ve depremi benzeştiren yükler altında test edilmiştir. Test edilen deney elemanlarından elde edilen sonuçlar taşıma gücü, süneklik, kat ötelenmesi, enerji dönüştürme, rijitlik, genel davranış bakımından değerlendirilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bütün bunlardan başka, mevcut çalışma geçmişte karbon lifli kumaşlarla yapılan benzer çalışmalarla da performans açısından kıyaslanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda en ideal yöntemler belirlenmiş, bunları gerçek yapılarda uygulayabilmek için mühendislerin tasarımda kullanabileceği yaklaşımlar oluşturmaya çalışılmıştır. Geliştirilen yeni güçlendirme yöntemi kullanılarak binaların kolaylıkla depreme karşı güçlendirilebileceği, olası göçmelerin önlenerek can ve mal kayıplarının en aza indirilebileceği düşünülmektedir.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Betonarme perde duvarların şiddetli depremlerde yapıların ayakta kalmasını sağlayan en önemli unsurlardan birisi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada; tuğla dolgu duvarlara sahip betonarme çerçeveler delikli çelik levhalar kullanılarak çeşitli tekniklerle güçlendirilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan yeni sistemlerin süneklik bakımından ideal bir betonarme perde duvar davranışına yaklaştırılabilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı ise; depreme karşı yetersiz olduğu belirlenen betonarme bir yapıyı (tuğla dolgu duvarlı) güçlendirebilmek veya en azından içinde bulunanların can güvenliğini sağlamak için, hem kolay uygulanabilecek hem de düşük maliyete sahip yerli üretim malzeme kullanarak alternatif bir yöntem araştırmak ve geliştirmektir.

Böylece deprem dayanımı yetersiz olan mevcut betonarme yapıların bu doğal afete karşı güçlendirilebileceği, ayrıca olası göçmelerin önlenerek can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi konusunda önemli bir yaklaşım oluşturulabileceği düşünülmüştür.

Bahsedilen ilkeler ve amaçlar doğrultusunda delikli çelik levhalar kullanarak bir dizi deney yapılmıştır. Laboratuvar olanakları göz önünde bulundurularak 14 deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanları ½ ölçekli kolon, kiriş ve temelden oluşan tek açıklıklı ve tek katlı betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Oluşturulan bu yalın elemanlar delikli levhalarla takviye edilmiş ve depremi benzeştiren yükler altında test edilmiştir.

Çalışma kapsamında;
a) delikli levha kalınlığı,
b) levhaların karşılıklı bulonlanmasında kullanılan aralıklar,
c) delikli levhanın kolonlara bağlantısının olup olmaması birincil değişkenler olarak ele alınmış ve her seferinde biri değiştirilerek sistematik bir çalışma yapılmıştır.

Bunların dışında deney elemanlarının test sürecinde kimi zaman zorunluluktan dolayı, kimi zaman ise davranışı biraz daha iyileştirmek adına ilave değişkenler konmuş ve bunlar da araştırma konusu içine girmiştir.

Sözü edilen ilave değişkenler;
a) kolonlara çelik manto yapılması,
b) iki kolonu birbirine bağlayan çelik çekme çubukları,
c) birleşim bölgesinin çelik plakalarla takviye edilmesi,
d) duvar köşelerinde bulunan kolon bağlantı elemanlarının yine duvar köşelerinde bulunan "L" şeklindeki mevcut çelik şeritlere kaynaklanması olarak sonradan tasarlanmıştır.

Bu doktora çalışması oldukça kapsamlı 113M437 kodlu TÜBİTAK 1001 projesinin bir bölümünü içermektedir. Deney elemanlarının kolonlarına verilecek eksenel yük miktarı TÜBİTAK 1001 projesinde parametre olarak ayrıca ele alınmış ancak bu tez kapsamında bunlardan yalnızca eksenel yüksüz olanlar araştırılmıştır.

Çalışma sonunda bu parametrelerin, deney elemanlarının davranışlarını, birbirlerine ve referans elemanlarına göre nasıl değiştirdiği araştırılmış, sonuçlar tartışılarak en ideal güçlendirme teknikleri önerilerle birlikte sunulmuştur. Mevcut çalışma geçmişte karbon lifli kumaşlarla yapılan benzer çalışmalarla da performans açısından kıyaslanmış ve aralarındaki temel farklılıklar ortaya konulmuştur. Ayrıca deney elemanları üzerinde analitik çalışmalar da yapılmış, güçlendirilmiş deney elemanlarında kullanılabilecek, yeni analitik yaklaşımlar oluşturulmaya çalışılmıştır.

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. Dolgu Duvar Güçlendirme Yöntemleri

Betonarme çerçeve içindeki tuğla duvarlar proje hesaplarında taşıyıcı olarak kabul edilmese de, deprem kuvvetleri altında boş çerçeveye oranla rijitliği ve dayanımı arttırdığını daha önce yapılan araştırmalar ortaya koymuştur [1-3].

Yapının deprem davranışına olumlu katkısı bulunan betonarme çerçeve içindeki mevcut tuğla duvarın çeşitli yöntem ve malzemelerle güçlendirilerek sünek betonarme perdeli sistem davranışına yaklaştırılabilmesi amacıyla oldukça fazla araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar genel olarak aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

- Karbon liflli kumaşlarla (CFRP) güçlendirme [7-16]
- Çeşitli polimer malzemelerle güçlendirme [17-24]
- Beton panellerle güçlendirme [25-29]
- Çelik yapı elemanları ile güçlendirme[30-36]
- Çelik lif katkılı sıva ile güçlendirme [37-39]

Bu yöntemlerden karbon lifli kumaşlarla güçlendirmede malzemenin yeni teknoloji, hafif, ince, yüksek çekme dayanımlı ve kısmen uygulaması kolay olması sebebi ile son yıllarda çalışmalar bu yönde yoğunlaşmıştır. İçerisinde tuğla duvar bulunan betonarme çerçevelerin bu malzeme ile güçlendirilmesini içeren birçok benzer araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların ortak özelliği ise dayanım ve rijitliği önemli ölçüde arttıran yöntemler bulunmuş olsa da süneklik açısından sınırlı kalındığının söylenebilecek olmasıdır. Bu durumu daha iyi açıklamak amacıyla benzer çalışmaların dayanımda en iyi performansı gösteren deney elemanına ait yük-deplasman grafiği incelenmiştir. Ortak değerlendirme yapılabilmesi açısından bu grafiklerden zarf eğrileri çizilerek maksimum dayanımda önemli bir kayıp (%15) olmadan yapılan deformasyondaki kat ötelenme oranları bulunmuş ve Çizelge 3.1'de topluca verilmiştir. Çizelge 3.1'de değerleri verilen deney elemanlarının dolgu duvar en-boy oranı (l_{duvar}/h_{duvar}) 0,5 ile 2 arasındadır. Şu ana dek yapılan araştırmalar, göreceli kat ötelenmelerinin en iyi ihtimalle %2'yi geçtiğinde güçlendirmede kullanılan karbon kumaşların genelde gevrek bir şekilde koptuğunu, yırtıldığını veya sıyrıldığını göstermiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. CFRP ile yapılan geçmiş çalışmalar ve ulaşılan en büyük ötelenme oranları

$0,5 > l_{duvar}/h_{duvar} > 2$	**Deney elemanı ölçeği**	**Betonarme çerçeve türü**	**Kolonların eksenel yük oranı**	**Ulaşılan en büyük ötelenme oranı (%)**
Altın, Anil, Kara, Kaya (2008) [7]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%10	0,85
Erdem, Akyüz, Ersoy, Özcebe (2006) [8]	1/3	İki katlı üç açıklıklı	%7	0,35
Ozkaynak, Yuksel, Buyukozturk, Yalcin, Dindar (2011) [11]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%0	2,30
Yüksel ve diğerleri (2010) [12]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%10	1,30
Akin (2011) [13]	1/2 - 1/3	İki katlı tek açıklıklı	%10	1,00-2,30
Coza (2009) [14]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%0	1,50

Ayrıca bu malzemenin yurt dışından ithal edilmesi, oldukça pahalı olması, gevrek davranış göstermesi, yine oldukça pahalı olan epoksilerle uygulanması gibi negatif bazı özellikleri, bu işle ilgilenen hemen herkes tarafından bilinmektedir. Bütün bunların dışında bu malzemenin kullanımını sınırlayan, kısıtlayan ve yalnızca güçlendirmeye odaklanmış uygulayıcılar ve araştırmacılar tarafından çoğu kez göz ardı edilen veya bilinmeyen özellikleri de bulunmaktadır. Bunlardan bazılarını maddeler halinde şöyle özetleyebiliriz.

a) Bu malzeme epoksi ile beraber uygulandığından yangın etkilerine karşı oldukça hassastır. Bu işte kullanılan bütün polimer kompozitler yeterli ısı verildiğinde yanmaktadır. Üstelik bu kompozitlerin sıkça içerdiği bilinen polyester, vinilester ve epoksinin yanmayı desteklediği ve beraberinde oldukça yoğun siyah duman çıkarttığı bilinmektedir. Ayrıca çıkan bu siyah dumanın son derece toksik kimyasallar (karbon monoksit, hidrojen florür, hidrojen sülfür, hidrojen klorür, hidrojen siyanür) içerdiğini yapılan araştırmalar belirtmektedir [40].

b) Yapılan araştırmalar sonunda bu kompozitin mekanik açıdan da ısıya karşıda oldukça hassas olduğu ortaya çıkmıştır. Karbon kumaşla beraber kullanılan epoksinin özelliğine göre, 60 °C ile 82 °C arasındaki bir sıcaklıkta karbon kumaşla beton arasındaki tutunmanın tamamen kaybolduğu gözlenmiştir. Tutunmanın tamamen kaybolduğu bu kritik sıcaklık

değerinde malzeme katı halden visko-elastik hale geçmektedir. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI)'nün yayınladığı ACI 440.2R-08 (2008) kodlu komite raporunda bu tür kompozit uygulamaların hizmet verebileceği en yüksek sıcaklığın bahsedilen kritik sıcaklık değerinden 15°C daha düşük olması gerektiği söylenmektedir [41].

c) Karbon kumaşın elektriği ilettiği bilinmektedir. Dolayısı ile yapılan uygulamalarda betonarme içindeki demirlerle, korozyonu önlemek açısından direk temasının bulunmaması gerekir [41].

d) Epoksinin uygulanacağı yüzeyin sıcaklığı da oldukça önemlidir. Uygulama yapılacak yüzeyin sıcaklığı +10 °C üzerinde olmalıdır [41].

e) Kullanılan epoksi zamanla ultraviole ışıktan olumsuz etkilenmektedir ve mutlaka ek önlemler alınmalıdır [41].

Bahsedilen diğer yöntemlerde de kısmen dayanım ve rijitlikte başarı elde edilmiş olsa da süneklik ve enerji dönüştürme kapasiteleri açısından yeterli düzeylere ulaşılamamıştır.

Bütün bunların dışında mevcut tuğla duvarın yıkılıp yerine çerçeveye kuvvet aktaran yeni bir betonarme perde duvar üretilmesi de sıkça uygulanan bir yöntemdir [42-45]. Ancak bu yöntemin de uygulaması oldukça zahmetli, zaman alıcı ve maliyetlidir. Ayrıca yapı içinde ikamet eden veya çalışanların aylarca sürecek bir çalışma için yapıyı boşaltmaları gerekmektedir. Bu da güçlendirme maliyetine fazladan bir külfet getirmektedir.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde mevcut güçlendirme yöntemlerinin hiçbirinde süneklik, düşük maliyet ve kolay uygulanabilirlik ölçütlerinin bir arada bulunmadığı gözlenmiştir. Bu alternatif güçlendirme yöntemi ihtiyacının giderilebilmesi veya en azından can güvenliğinin sağlanabilmesi için yerli üretim malzeme olan delikli çelik levhaların kullanılması düşünülmüştür. Bunun için bir ön çalışma programı hazırlanarak yöntemin sıvalı tuğla duvarlar üzerindeki etkisi iki adet yüksek lisans çalışmasında araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların monotonik ve tersinir yükler altındaki davranışları incelenmiş ve dayanımın yaklaşık 2,5 kat, enerji dönüştürmenin ise yaklaşık 10 kat arttırılabildiği gözlenmiştir. Deneylerin önemli bir kısmında, dayanımda önemli bir kayıp olmadan, %10'dan büyük ötelenme

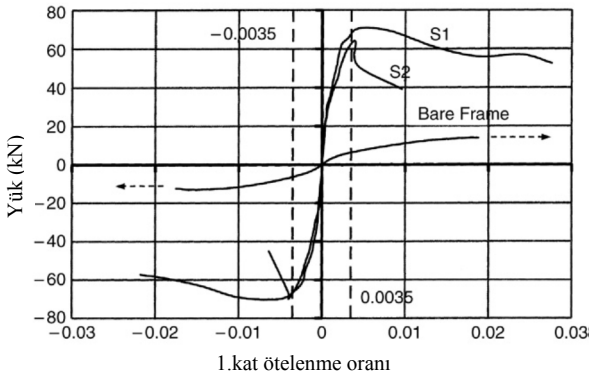
oranlarına ulaşılmıştır. Bu ötelenme oranlarında dahi güçlendirilmiş elemanların hiç birinde tuğla duvar bütünlüğü bozulmamıştır. Deneyin sonuna kadar duvarı çevreleyen çelik çerçeveye mekanik olarak destek sağlamışlardır [5,6]. Ön çalışmalarda ortaya çıkan bu büyük oranlar ve umut verici tablo mevcut çalışmanın temellerini oluşturmuştur.

3.2. Altın, Anil, Kara ve Kaya'nın (2008) Çalışması

Bu çalışmada, karbon lifli kumaş kullanarak güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla 1/3 ölçekli tek katlı, tek açıklıklı ve içerisinde tuğla dolgu bulunan on adet betonarme deney elemanı üretilmiş, güçlendirilmiş ve test edilmiştir. Kolonlara kapasitelerinin yaklaşık %10'u kadar eksenel yük ard-germe halatları ile verilmiştir. Kullanılan kumaşın boyutları ve kullanım şekilleri araştırmanın parametrelerini oluşturmuştur. Sonuçlar dayanım, rijitlik ve kat ötelemeleri açısından kıyaslanmıştır. Sonuçta karbon kumaş şeritlerinin dayanım ve rijitliği önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. %1 ile % 0,5 ötelenme oranları arasında bütün elemanların karbon kumaşlarında kopma ya da sıyrılma meydana gelmiştir. Her iki tarafın duvar yüzey alanına yaklaşık eşit miktarda karbon kumaş kullanarak güçlendirilmiş elemanda, referans elemana göre dayanımda 2,6, başlangıç rijitlik değerinde 6,4 kat artış sağlanmıştır. Yine bu elemanda ulaşılan en büyük dayanımda önemli bir kayıp (%15) olmadan yapılan deformasyondaki ötelenme oranı yaklaşık % 0,8 olmuştur [7].

3.3. Erdem, Akyüz, Ersoy ve Özcebe'nin (2006) Çalışması

Bu çalışmada iki adet 1/3 ölçekli, iki katlı ve üç açıklıklı betonarme çerçeve iki güçlendirme yöntemini karşılaştırmak amacıyla test edilmiştir. Her iki deney elemanı da Türkiye'de sık rastlanan yapı kusurlarını içerecek şekilde hazırlanmıştır. Deney elemanlarından birisi betonarme dolgu diğeri ise tuğla duvarıyla beraber karbon kumaşlarla güçlendirilmiştir. Elemanlar depremi benzeştiren yükler altında test edilmiş, dayanımları, rijitlikleri, kat ötelenmeleri değerlendirilmiştir. Sonuçta her iki elemanın dayanım ve rijitlik konusunda benzer davranışlar gösterdiği ancak dayanımda önemli bir kayıp olmadan ulaşılan ötelenme oranlarında betonarme dolgunun belirgin bir üstünlüğü görülmüştür. Şekil 3.1'de betonarme dolgulu (S1) elemanının ve karbon kumaşla güçlendirilmiş (S2) elemanının deneylerinden elde edilen zarf eğrileri gösterilmiştir. Grafikte düşey eksendeki yatay yüke karşılık yatay eksende birinci katın ötelenme oranı yer almaktadır [8].



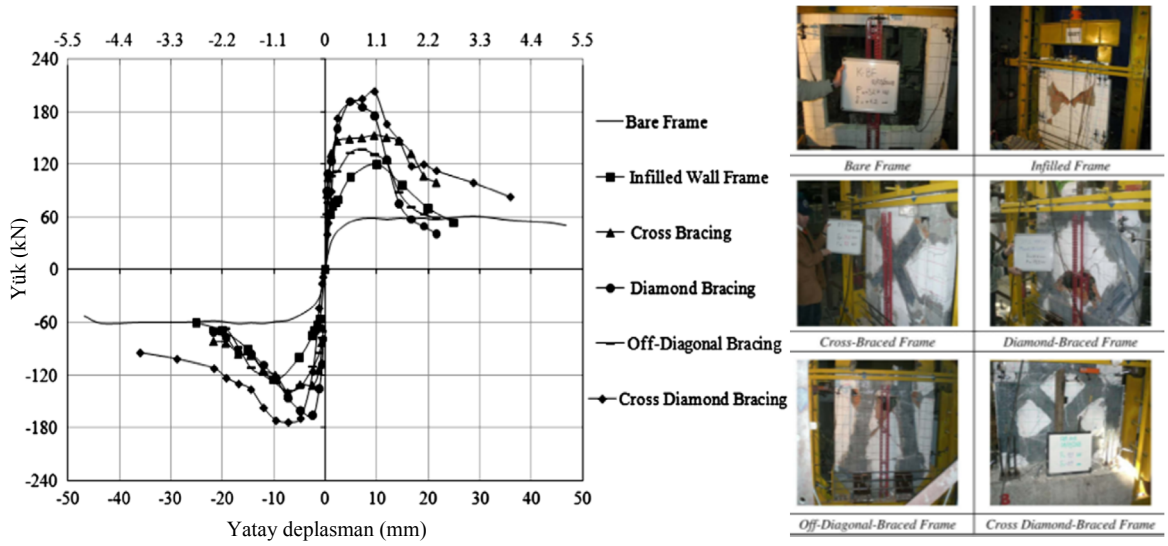
Şekil 3.1. Yatay yük- birinci kat ötelenme oranları [8]

3.4. Özkaynak ve Diğerleri'nin (2011) Çalışması

Bu çalışmada tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin karbon kumaşlarla güçlendirilmesinde yeni ve daha etkin olabileceği düşünülen yöntemler araştırılmıştır. Bu amaçla iki ayrı yöntem geliştirilmiş ve bunlar 1/3 ölçekli tek katlı, tek açıklıklı deney elemanlarına uygulanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde dört elemana tersinir-tekrarlanır yükleme, ikinci bölümünde ise yine aynı tekniklerle güçlendirilen sekiz elemana (pseudo-dynamic) benzeşik-dinamik yükleme yapılmıştır. Deney elemanlarının davranışları birbirleri ile karşılaştırılmış ve yükleme türünün buna etkisi tartışılmıştır. Sonuçta benzeşik-dinamik yükleme ile yapılan testlerde aynı özellikteki elemanların tersinir-tekrarlanır yüklemedekine oldukça benzer davranışlar gösterdiği gözlenmiştir. Geliştirilen tekniklerden birinin etkili olduğu ve yalın çerçeveyi göçme öncesi performans düzeyinden can güvenliği performans düzeylerine getirebildiği söylenmiştir [11]. Deneysel sonuçlar bir de Amerikan Federal Acil Durum Yönetim Kurumu (FEMA) 356 (2000) [46] kılavuzundaki analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve uyuşum içinde olduğu görülmüştür.

3.5. Yüksel ve Diğerleri'nin (2010) Çalışması

Bu çalışmada tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin karbon kumaşlarla güçlendirilmesinde farklı yapıştırma yöntemleri araştırılmıştır. Bu amaçla 1/3 ölçekli tek katlı ve tek açıklı altı adet deney elemanı üretilmiş ve bunların dört tanesi karbon kumaşlarla güçlendirilerek tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deney sonuçları tuğla dolgu duvarlı referans elemana göre dayanımda önemli artışlarla beraber göreceli kat ötelenmelerinde azalmaların olduğunu göstermiştir [12]. Şekil 3.2'de bu çalışmada test edilmiş elemanlar ile bu deneylerden elde edilen yatay yük ötelenme zarf eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.2. Deney elemanları ve yük-kat ötelenme oranları [12]

3.6. Akın'ın (2011) Çalışması

Bu çalışmada, karbon fiber lifli polimerler kullanılarak tuğla dolgu duvarların güçlendirilmesi ve yeni bir yanal taşıyıcı sistem oluşturmak amacıyla bunların mevcut yapıya ilave edilmesi amaçlanmıştır. Dolgu duvarların yüksekliğinin genişliğine oranı ve deney elemanlarının ölçeği, iyileştirme yöntemiyle sağlanan genel davranışa muhtemel etkileri bakımından incelenmiştir [13].

Çalışmanın deneysel kısmı iki aşamada yürütülmüştür: Birinci aşamada, güçlendirilmiş/güçlendirilmemiş duvarların diyagonal deprem yükleri altındaki davranışını anlayabilmek için on adet bağımsız panel test edilmiştir. İkinci aşamada ise, tasarım detaylarının belirlenmesi amacıyla, iki farklı en-boy oranına sahip sekiz adet 1/3 ve dört adet 1/2 ölçekli tek açıklıklı, iki katlı betonarme çerçeve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, deney elemanlarına ait yanal rijitlik, dayanım, ötelenme ve enerji sönüm karakteristikleri yardımıyla açıklanmıştır [13].

Analitik kısımda, güçlendirilmiş/güçlendirilmemiş çerçeve dolgu duvarlarının modellenmesi için eşdeğer gergi yaklaşımı kullanılmıştır. Çerçeve eleman modelleri için hesaplanan statik itme analiz sonuçları, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu analitik sonuçlara dayanarak, bahsi geçen güçlendirme yöntemi için gerekli tasarım kriterleri geliştirilmiştir [13].

3.7. Coza'nın (2009) Çalışması

Bu çalışmada; bitişik nizam, dolgu duvarlı çift taraflı sıva uygulamasının mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek yüz/çift yüz sıvanın etkisi ve dolgu duvarlı çerçeveye olan katkısı, çift taraflı güçlendirmenin mümkün olmadığı betonarme yapılarda, tek taraflı güçlendirmenin yapıda nasıl bir performans gösterebileceği yorumlanmıştır [14].

Çalışma kapsamında, uygulamada çok karşılaşılan betonarme yapıların özelliklerini yansıtan 6 adet, 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, tek katlı numuneler üzerinde, bu tür sistemlerin yatay yük taşıma kapasiteleri, rijitlik ve enerji sönümleme gibi özelliklerini karşılaştırmak amacıyla deneysel bir dizi çalışmalar tasarlanmıştır. Numuneler; boş çerçeve, dolgu duvarlı / tek yüzü ve çift yüzü sıvalı çerçeve, dolgu duvarlı tek sıvalı tek yüzü/çift yüzü CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve olarak üretilmiş, her numune üzerinde yer değiştirme kontrollü yük artırımı yöntemi uygulanarak, numuneler deneye tabi tutulmuşlardır [14].

Konunun genel olarak araştırılmasından ve deneysel çalışmalardan elde edilen sayısal ve gözleme dayalı veriler yorumlanmıştır. Karbon elyaf ile tek yüzü ve iki yüzü birden güçlendirilen sıvalı ve sıvasız dolgu duvarlı çerçeve modellerinin performansları ve yatay yük altındaki davranışları, enerji dönüştürme kapasiteleri ve rijitlik değişimleri, oluşan hasar dağılımları, genel göçme mekanizması yorumlanmış, başarılı bir uygulama için bazı prensipler, deneysel olarak ortaya konulmaya çalışılmıştır [14].

3.8. Tateishi, Jinno, Kimoto ve Hattori'nin (2009) Çalışması

Bu çalışmada karbon kumaş içerikli malzemeden betonarme çerçevelerin içine depreme karşı güçlendirme amaçlı dolgu sistemleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan karbon kumaşlı sistem betonarme çerçeveye çelik plakalarla beraber epoksi yardımıyla tutturulmuştur. Üç farklı yöntemle güçlendirilen betonarme çerçeveler, kolonlarına eksenel yük de verilerek tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Ankrajların bağlantıları ve ek yerlerinde plaka kullanılıp kullanılmaması deney parametrelerini oluşturmuştur. Deney sonuçları duvarların kesme kapasitesinin arttırıldığını göstermiştir. Süneklik açısından değerlendirme yapıldığında ise maksimum kat ötelenmeleri % 0,26 ile % 2 bandında kalmıştır [15].

3.9. Papanicolaou, Triantafillou ve Lekka'nın (2011) Çalışması

Bu çalışmada taşıyıcı tuğla ya da taş duvarların yük taşıma ve deformasyon kapasitesini arttırmak amacıyla dış yüzeyden bağlanan polimer hasırlar kullanılmıştır. Güçlendirilmiş elemanlara eksenel yükle beraber düzlemsel veya düzlem dışı tersinir tekrarlanır yükleme yapılmıştır. Deney parametrelerini; uygulanan katman sayısı (her iki yüzde de bir veya iki), kullanılan hasır tipi (karbon lifli, cam lifli, bazalt lifli, polipropilen veya polyester), yapıştırma malzemesi (epoksi reçine veya kompozit sıva harcı) ve eksenel yük düzeyi oluşturmuştur. Deney sonuçları hasır ve harç kullanılarak yapılan mantolamanın yığma yapıları depreme karşı güçlendirilmesinde etkili olabileceğini göstermiştir [17].

3.10. Koutromanos ve Diğerleri'nin (2013) Çalışması

Bu çalışmada sünek olmayan betonarme çerçeve içindeki dolgu duvarlar kompozit malzemelerle takviye edilerek sistemin deprem performansının arttırılmasına çalışılmıştır. Araştırmanın ilk kısmında çimento esaslı kompozit (ECC) kaplama kullanılmıştır. Bu amaçla 2/3 ölçekli, 3 katlı ve 2 açıklıklı betonarme çerçeve hazırlanmış ve tuğla duvarları örülmüştür. Birinci kattaki açıklıklardan birinde kapı boşluğu; ikinci ve üçüncü kattaki açıklıklardan birinde ise pencere boşluğu bırakılmıştır. Sonra sadece birinci katın boşluksuz duvarı çimento esaslı kompozit malzeme ile kaplanmış ve sarsıntı tablasında test edilmiştir. Güçlendirmenin etkinliği deneysel gözlemlere ve sonlu eleman analizlerine dayalı olarak araştırılmıştır. Deneyde ikinci kat duvarları hasar görmeye başladıktan sonra deneye ara verilerek bu duvarların çatlakları epoksi enjeksiyonu ile onarılmış ve cam elyaf polimer katmanla da güçlendirilmiştir. Deney sonuçları her iki yöntemin de çerçevenin deprem performansını arttırdığını ve betonarme kolonlarda kesme kırılmasını önlediğini göstermiştir [23].

3.11. Kyriakides ve Billington'nın (2014) Çalışması

Bu çalışmada sünek olmayan betonarme çerçeve içindeki dolgu duvarlar yeni bir yöntem kullanılarak depreme karşı güçlendirilmeye çalışılmıştır. Bu araştırmanın amacı kolonlardaki kesme kırılmasını geciktirebilecek ve sistemin sünekliğini arttırabilecek kolay uygulanabilir bir yöntem geliştirmek olmuştur. Malzeme olarak çimento esaslı püskürtülebilir kompozit (ECC) kullanılmıştır. Yöntemde öncelikle mevcut duvara tuğlalar arasındaki bağı kuvvetlendirmek için bir tür bant yapıştırılmış, sonra betonarme çerçeve

içine hasır çelik yerleştirilmiş ardından bazı elemanlarda kiriş ve temele kesme kuvveti aktarabilmek amacıyla kısa çelik çiviler epoksi ile ankre edilmiş ve ECC püskürtülmüştür. Bu çalışmada küçük ölçekli (yaklaşık 1/5) üçü güçlendirilmiş ve biri güçlendirilmemiş referans olmak üzere tek açıklıklı ve tek katlı dört deney elemanı üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Sonuçlar betonarme çerçevedeki kiriş ve temelden duvara kuvvet aktaran çivilerin sünekliği arttırmada oldukça etkili olduğunu göstermiştir [24].

3.12. Baran, Aktaş ve Aykaç'ın (2014) Çalışması

Bu çalışmada önerilen güçlendirme yönteminin prensibi yapıda var olan sıvanmış tuğla dolgu duvarların bazılarının, üzerine yapıştırılan şerit beton panellerle güçlendirilerek birer betonarme dolgu duvara dönüştürülmesidir. Bu amaçla, mevcut çalışma kapsamında ½ ölçeğe sahip toplam yedi adet sıvanmış tuğla duvar elemanı tersinir tekrarlanır yatay yükler altında test edilmişlerdir. Altı adet deney elemanı şerit beton/betonarme paneller yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney sonuçları, beton panel yapıştırma uygulamasının deney elemanlarının yatay yük taşıma kapasitelerini arttırdığını; ancak maksimum dayanımdan sonra yükte ani kayıpların oluşabileceğini ve sünekliğin oldukça sınırlı kalabileceğini göstermiştir [25].

3.13. Baran'ın (2005) Çalışması

Bu çalışmada önerilen tekniğin prensibi, yapıda bulunan boşluklu tuğla dolgu duvarların yüksek dayanımlı ön-üretimli beton paneller kullanılarak güçlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Tasarlanan yöntemin uygulama esnasında yapının boşaltılmasını gerektirmeyeceği ve böylece içinde yaşayanlara fazla rahatsızlık verilmeyeceği düşünülmektedir. Deney kapsamında ikisi referans on ikisi güçlendirilmiş olmak üzere toplam on dört adet boşluklu tuğla dolgu duvarlı çerçeve, deprem yükünü benzeştirecek tersinir tekrarlanır yatay yükler altında test edilmiştir. Deney elemanları altı değişik ön üretimli beton panel kullanılarak güçlendirilmişlerdir. Yapılan deneyler analiz edilmiş, deney elemanlarının dayanım, rijitlik, enerji dönüştürme ve kat ötelenme özellikleri irdelenmiştir. Deney sonuçları bu yöntemin tuğla dolgulu betonarme çerçevelerin dayanım ve rijitliğinin arttırılmasında etkili olduğunu göstermiştir. Bununla beraber deneylerde dayanımda önemli bir kayıp olmadan yapılan kat ötelenmeleri oranı en fazla % 1,5 olmuştur [26].

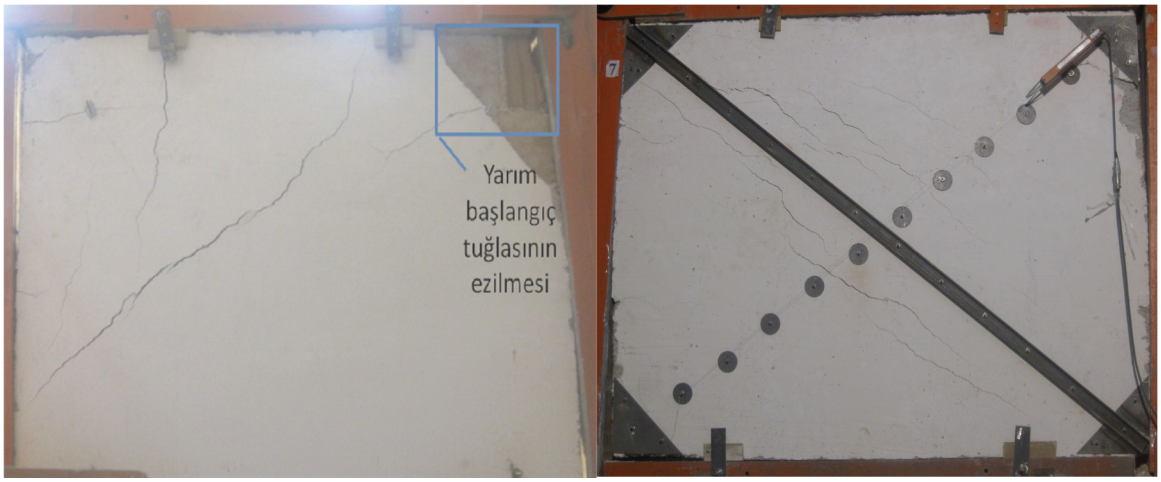
Kuramsal çalışma kısmında ise, yüksek dayanımlı ön üretimli beton paneller kullanılarak güçlendirilen boşluklu tuğla dolgu duvarlar hem eşdeğer çubuk elemanları ile hem de eşdeğer bir kalınlığa sahip perde duvarlar ile modellenmiştir. Ardından deney sonuçları, bahsedilen iki yaklaşımın kuramsal sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kuramsal çalışmanın sonuçlarına dayanarak, uygulamada bu yöntemle yapılacak güçlendirme işleminin tasarımı için pratik önerilerde bulunulmuştur [26].

3.14. Özbek ve Can'ın (2012) Çalışması [30]

Tuğla duvarların deprem yükleri altında göçme modlarından birisinin köşe bölgelerinin ezilmesi olduğunu daha önce yapılan araştırmalar ve gözlemler ortaya koymuştur [47]. Ülkemizde çoğu zaman uygulamada köşelere denk gelen tuğlalar duvar imalatı sırasında sığmadığı zaman kırılmakta ve delikleri yukarı bakacak şekilde yerleştirilmektedir. Böylece zaten kritik olan bu bölge deprem yükleri altında daha da zayıflamaktadır (Resim 3.1). Duvar köşelerinin bu şekilde ezilmesi oldukça tehlikeli olup depremlerde kolon uç bölgelerinin kısa konsol davranışı göstererek çerçevenin kesmeden göçmesine sebep olabilmektedir [48]. Bu çalışmanın amacı ise duvar köşelerinde yapılacak güçlendirme yöntemlerinin davranış üzerindeki etkisinin incelenmesi, hem pratik hem de ekonomik bir şekilde tuğla duvarların dayanım ve rijitliğinin arttırılmasıdır [30].

Bu kapsamda deneysel çalışma yapılmış ve biri referans, beşi güçlendirilmiş olmak üzere ½ ölçekli toplam 6 adet deney elemanı üretilmiştir. Üretilen sıvalı tuğla duvarlar çelik profiller ve köşelerde kullanılan ince üçgen sac levhalarla takviye edilmiştir. Deney elemanlarına dört köşesi mafsallı çelik çerçeve içinde tersinir tekrarlanır yükleme yapılmıştır. Köşelerde kullanılan ikizkenar dik üçgen sac boyutu (100×100 veya 200×200 mm), üçgen levhanın uygulama yüzeyi (tek taraf veya karşılıklı) deney parametrelerini oluşturmuştur [30].

Sonuçta kullanılan üçgen levhanın, o bölgede sargılama basıncını da arttırdığı ve köşelerdeki tuğlaların ezilmesini önlediği görülmüştür (Resim 3.1). Üçgen levhaların boyutları ve sayısı arttıkça dayanımda da artış olmuştur. Kullanılan levhalarla birlikte dayanım 3,5 kat; rijitlik ise 3 kat arttırılabilmiştir [30].



Resim 3.1. Duvar köşelerinin takviyesiyle bu bölgedeki ezilme önlenmiştir [30]

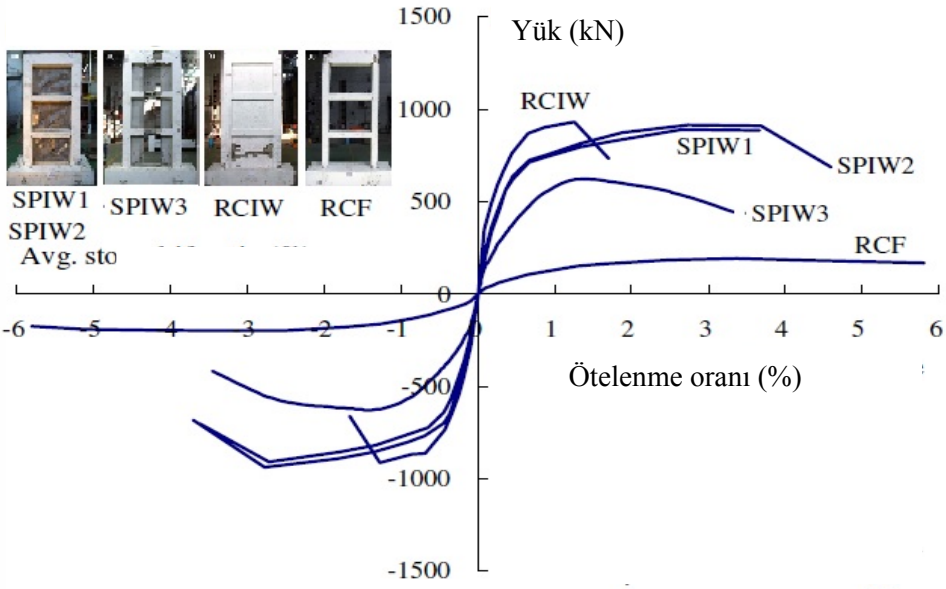
3.15. Altin, Anil, Kopraman ve Belgin'nin (2010) Çalışması

Bu çalışmada betonarme çerçeveye sahip tuğla dolgu duvarların depreme karşı hasır çelik ve sıva ile tek yüzden güçlendirme yönteminin etkinliği araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında 1/3 ölçekli, tek katlı, tek açıklıklı beş eleman imal edilmiş ve tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Hasır çeliğin, kesme kuvveti aktaran çiviler kullanılmadan direk betonarme çerçeveye ankre edilmesinin, dayanımı arttırmada etkili rol oynadığı görülmüştür. Kaplama sıvanın dayanımı arttıkça dayanım da artarak referans elemanının 2,5 katına ulaşmıştır [31].

3.16. Choi ve Park'ın (2011) Çalışması

Bu deneysel çalışmada betonarme çerçeve içerisine ince çelik levha tutturularak oluşturulan sistemlerin davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla üç katlı, tek açıklıklı ve 1/3 ölçekli beş deney elemanı tersinir tekrarlanır yükler altında kolonlara eksenel yük verilmeden test edilmiştir. Deney parametrelerini kolonlardaki boyuna donatı oranı (%3,7, %5,1) ve çelik levhada bırakılan boşluk (var, yok) oluşturmuştur. Takviyeli elemanların dışında karşılaştırma için bir adet betonarme çerçeve (RCF) ve bir adette betonarme perde duvar (RCIW) üretilmiştir. İnce çelik levhalarla elde edilen sistemlerin (SPIW1, SPIW2, SPIW3) teorik dayanımları betonarme perde duvara (RCIW) yaklaşık eşit olacak şekilde tasarlanmıştır. Sonuçta bu deney elemanları deneyde de yaklaşık aynı dayanımları göstermiş ancak farklı olarak, çelik levhalarla takviye edilen elemanlarda dayanımın yanı sıra deformasyon kapasitesinde de büyük artışlar gözlenmiştir. Deneylerin Şekil 3.3'deki yük-ötelenme oranı zarf eğrilerine bakıldığında, betonarme perde duvarda dayanımda

önemli kayıp olmadan ulaşılan kat ötelenmesi oranı yaklaşık % 1,5 iken; ince çelik levhalı elemanlarda ise bu oran % 4 değerlerine çıkabilmiştir. Çalışmanın sonunda deneysel sonuçlar bir de analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır [33].



Şekil 3.3. Choi ve Park'ın (2011) çalışmasında yük-kat ötelenme oranları grafiği

3.17. Özçelik'in (2011) Çalışması

Bu çalışmada mevcut kusurlu betonarme yapıların çelik yapı elemanları ile deprem güçlendirilmesi uygulamaları incelenmiştir. Çalışma kapsamında hem deneysel hem de sayısal simulasyon çalışmaları yapılmıştır. İncelenen güçlendirme teknikleri iç ters V çelik çapraz (İTVÇÇ), iç çelik çerçeve (İÇÇ), X çelik çapraz ve kesme plakalı kolon uygulamalarından oluşmuştur. Deneyler, 1/3 ölçekli tek katlı tek açıklıklı 13 adet güçlendirilmiş ve iki adet referans çerçevesi üzerinde sabit düşey yük ve artan tersinir çevrimli yatay yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirilen 2 adet ½ ölçekli üç açıklıklı iki katlı çerçeve Düzce deprem kaydı kullanılarak dinamik benzerli test yöntemi ile denenmiştir. Test sonuçları, X çapraz ve kesme plakalı kolon uygulamalarının yetersiz yapı performansı sunduğunu göstermiştir. İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirme yöntemleri ise kararlı bir performansa sahip olmakla beraber bu çalışma sonucunda güçlendirme için kullanılabilir bulunmuştur. Çelik ve betonarme çerçeve elemanlarının performans sınırlarının tahmin edilebilmesi için sayısal simülasyonlar, elastik ötesi statik ve dinamik analizler yapılmıştır [34].

Bu çalışmada tavsiye edilen İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirme uygulamalarının etkili yöntemler olduğunu göstermek için 5 katlı mevcut kusurlu bir betonarme bina bu yöntemler ile güçlendirilmiştir. Sonuç olarak da betonarme ve çelik yapı elemanları için sismik güçlendirmenin nasıl gerçekleştirilebileceği konusunda öneriler getirilmiştir [34].

3.18. Sevil'in (2010) Çalışması

Bu çalışmada ekonomik olarak cazip ve yapının boşaltılmasını gerektirmeyen bir güçlendirilme yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yöntem, çelik tel ve/veya polipropilen fiberlerin sıva harcı içine eklenerek tuğla duvar üzerine uygulanmasına dayanmaktır. Harcın tuğla dolgulu duvarlara uygulanmasıyla güçlendirilen betonarme çerçeveler tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. İki katlı, tek açıklı ve ½ ölçekli içi tuğla duvarlı toplam 10 adet betonarme çerçeve hazırlanmıştır. Bunlardan 4 tanesi referans elamanı olmuş diğer 6'sı ise takviyeli sıva ile güçlendirilmiştir. Deney sonuçları bu yöntemin dayanım ve başlangıç rijitliğini arttırmada etkili olabileceğini ancak süneklik konusunda sınırlı kaldığını göstermiştir [38].

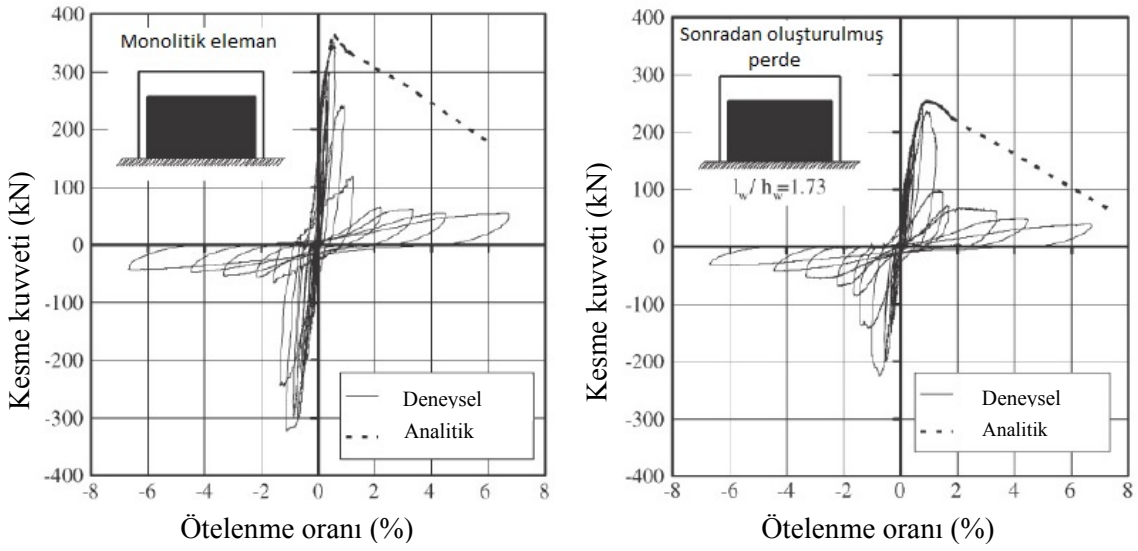
3.19. Koutas, Bousias ve Triantafillou'nun (2014) Çalışması

Bu çalışmada depreme karşı yetersiz olduğu bilinen tuğla duvarlı betonarme çerçeveler tekstil katkılı sıva (TRM) ile mantolanarak güçlendirilmeye çalışılmıştır. Yöntem 2/3 ölçekli, üç katlı tuğla dolgu duvar içeren betonarme çerçevelere uygulanmış ve deney elemanları tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Deney sonuçları uygulanan bu tekniğin dayanımı ve deformasyon kapasitesini arttırabileceğini göstermiştir [39].

3.20. Anıl ve Altın'ın (2014) Çalışması

Betonarme çerçeveyi depreme karşı güçlendirmek amacıyla içindeki tuğla duvarı yıkıp yerine betonarme perde duvar yapılması uygulamada sık karşılaşılan bir durumdur. Bu çalışmada ise tuğla duvarın içinde mimari nedenlerden ötürü kapı ve pencere boşluklarının bulunması ve yerine inşa edilecek betonarme perdenin de bu boşlukları içermesi gerektiği durumda, bırakılan boşlukların yapının davranışını nasıl değiştirebileceği araştırılmıştır. Bu amaçla tek katlı, tek açıklıklı ve 1/3 ölçekli dokuz deney elemanı üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Betonarme duvarın en-boy oranı ve boşluğun bırakıldığı yer deney parametrelerini oluşturmuştur [43].

Deney sonuçları, dolgu betonarme duvarın en boy oranı arttıkça dayanımın ve rijitliğin arttığını göstermiştir. Ayrıca betonarme duvarı hem kolona hem kirişe bağlanan elemanlar en başarılı deprem davranışını sergilemiştir. Bu araştırmadaki deneylerde, birdöküm elemanın (çerçevesi betonarme duvarı beraber dökülmüş) dayanımı, sonradan betonarme perde oluşturulmuş elemanın dayanımından tam 1,5 kat daha fazla çıkmıştır (Şekil 3.4).



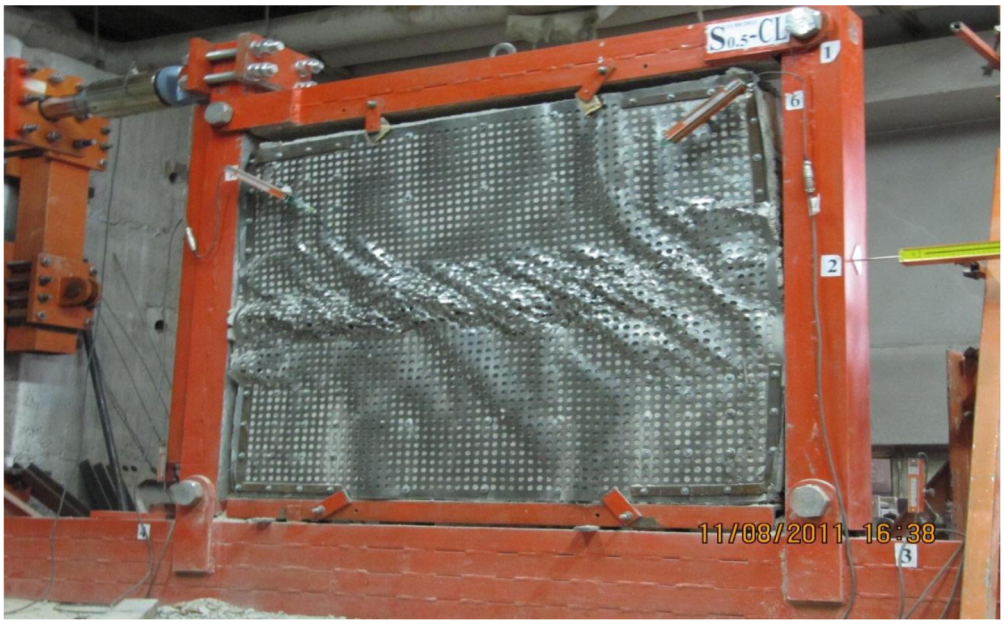
Şekil 3.4. Monolitik ve sonradan oluşturulmuş perde yük-ötelenme oranı eğrileri [43]

3.21. Strepelias, Palios, Bousias ve Fardis'in (2014) Çalışması

Bu çalışmada tuğla duvarlı betonarme çerçeve içinde sonradan oluşturulan betonarme perdelerin etkinliği, ¾ ölçekli, dört katlı toplam üç adet deney elemanı dinamik benzeşimli test edilerek araştırılmıştır. Geçmiş çalışmalardan farklı olarak bu deney elemanlarında betonarme duvar eninin çerçevenin eninden daha ince olmamasına dikkat edilmiştir. Betonarme duvarın çerçeveye bağlanmasında biri daha az işçilik gerektiren iki yöntem denenmiştir. Sonuçta elemanların davranışını eğilme zorlanmaları belirlemiştir. Bunda kolonun temelle birleşen bölümüne yapılan CFRP mantonun etkili olduğu söylenmiştir. Kullanılan duvar-çerçeve birleşim yöntemleri oldukça etkili çalışmıştır. Deneylerde plastik mafsallar farklı yerlerde oluşmuş olsa da bu durum genel enerji dönüştürme ve deformasyon kapasitesini olumsuz etkilememiştir. Uluslararası yönetmeliklerin monolitik davranış için öngördüğü akma momenti ve rijitlik hesaplamaları yapılmış, sonuçların bu geometri için uyumlu olduğu gözlenmiştir [45].

3.22. Babayani'nin (2012) Çalışması

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yüksek lisans tezi kapsamında yapılmış olup mevcut araştırmanın son ön çalışması niteliğindedir. Bu çalışmada biri referans olmak üzere ½ ölçekli toplam on üç adet sıvalı tuğla dolgu duvar, dört köşesi mafsallı çelik çerçeve içinde, tersinir tekrarlanır yatay yükler altında test edilmiştir. Güçlendirilmiş deney elemanları, delikli çelik levhaların dolgu duvara bulonlarla karşılıklı bağlanmasıyla elde edilmiştir. Levha kalınlığı (0,3, 0,5, 1 mm), bulon aralıkları (100, 150, 200 mm), levhalarda bindirmeli ekin varlığı (var, yok), köşelerde ezilmeye karşı alınan önlem türü (bulon aralığı sıklaştırma, L şeklinde çelik levha takviyesi, köşe tuğlaların çıkartılıp yerine beton dökümü) deney değişkenlerini oluşturmuştur. Sonuçta deney elemanlarının dayanım, rijitlik, enerji dönüştürme ve süneklik özellikleri irdelenmiştir. Test sonuçları dayanımın 2,3 kat arttırılabildiğini, dayanımda önemli bir kayıp olmadan ulaşılan ötelenme oranlarının % 10 değerlerini bulabildiğini, yanal rijitliğin 2 kat, enerji dönüştürme kapasitesinin 10 kat arttırılabildiğini göstermiştir. Bütün güçlendirilmiş deney elemanları duvar bütünlüğünü deney sonuna kadar korumuş, dağılmamıştır. Köşelerde alınan önlemlerin oldukça etkin çalışarak bu bölgelerdeki ezilmeleri sınırlandırdığı böylece genel davranışı oldukça iyileştirdiği görülmüştür. Resim 3.2'de 0,5 mm levha kalınlığına sahip ve köşeleri lamalarla takviye edilmiş deney elemanının (S0,5-CL) %10'dan büyük ötelenme oranlarındaki hasar durumu gösterilmiştir [5].



Resim 3.2. S0,5-CL deney elemanı deney sonu hasar durumu [5]

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Genel İlkeler

Deneysel çalışmanın amacı hem kolay uygulanabilecek hem de düşük maliyete sahip yerli üretim malzeme kullanarak alternatif bir yöntem araştırmak ve geliştirmektir. Bu doğrultuda kullanılan delikli çelik levhalar malzeme davranışı açısından oldukça sünektir. İleri düzey eksenel çekme kuvvetleri altında levhadaki delikler ovalleşerek yüksek deformasyonlara izin vermektedir [4]. Delikli levhalar aynı zamanda aynı ebattaki düz levhaya oranla % 50 daha hafiftir. Böylece ileride yapılması muhtemel güçlendirme çalışmalarında yapıların gereksiz yere ağırlaştırılmayacağı düşünülmektedir. Malzeme yerli üretim olup ülkemizde imalatını yapan birçok firma bulunmaktadır. Et kalınlığı, deliklerin merkezden merkeze olan uzaklıkları, delik çapları, desen tipi gibi istenen bilgiler kullanılarak perfore baskı makinaları ile düz saclar üzerinde delikler açılmasıyla elde edilir. Isıl bir işlem uygulanmaz. Günümüzde fiyatları ham düz çelik levhanın fiyatına oldukça yakındır. Sahip olduğu düzenli delik aralıklarının getirdiği tölerans sayesinde tuğla duvar arada kalacak şekilde karşılıklı olarak bulonlarla kolayca bağlanabilmektedir [5, 6]. Bu çalışmada da mevcut tuğla duvarların her iki yüzüne delikli çelik levhalar yerleştirilmiş ve bu levhalar birbirlerine çeşitli aralıklardaki bulonlarla bağlanarak güçlendirilmiştir. Böylece mevcut tuğla duvar üzerinde üç eksenli sayılabilecek bir sargılama basıncının oluşması ve sistem dayanımın artması beklenmiştir. Ek olarak levhaların kendi düzlemleri içinde özellikle çekme kuvvetlerine karşı duvar dayanımına katkı da sağlayabileceği düşünülmüştür. Bu şekilde oluşturulan sargılama yönteminin deprem kuvvetleri altında dolgu duvarın ezilmesini, dökülmesini, dağılmasını, devrilmesini engelleyebileceği, bütünlüğün korunarak sünekliğin artabileceği öngörülmüştür.

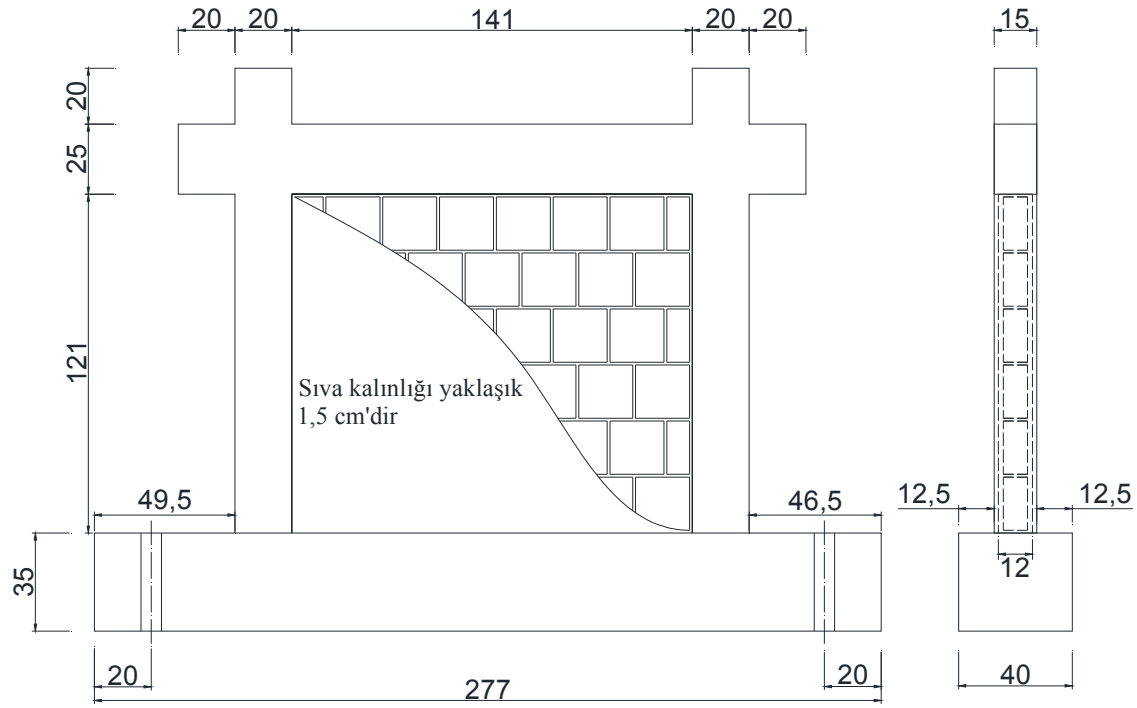
Çalışmada uygulanan her güçlendirme yönteminin gerçekte de her koşulda kolayca imal edilebilme özelliğinin olmasına dikkat edilmiştir. Dolayısı ile hazırlanan modelde gerçekte de güçlendirme için karşılaşılabilecek en olumsuz tablo yansıtılmaya çalışılmıştır. Eleman üretiminde, ülkemizdeki güçlendirme ihtiyacı doğan yapılarda sık rastlanan kusurların (düşük beton dayanımı, seyrek ve eksik etriye, kontrolsüz duvar işçiliği) bulunmasına özen gösterilmiştir.

Model ölçeğinin laboratuvar koşulları göz önünde bulundurularak ½ olmasına karar verilmiştir. Deney elemanları kolon, kiriş ve temelden oluşan betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Deneydeki davranışın gerçektekini en yakın yansıtması açısından eleman geometrisi tasarımında laboratuvarın bütün imkânları ve fiziki koşulları zorlanarak en iyi boyutlandırma yapılmaya çalışılmıştır.

4.2. Güçlendirme Öncesi Deney Elemanları

4.2.1. Betonarme çerçeve ve dolgu duvar ebatları

Deney elemanları ½ ölçekli olup, kolon kiriş ve temelden oluşan betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Kolon kesitleri 150 × 200 mm, kiriş kesiti 150 × 250 mm olarak tasarlanmıştır. Temel üstünden kiriş altına kadar ölçülen kolonların boyu 1210 mm, kolon iç yüzleri arasından ölçülen kirişin boyu ise 1410 mm olmuştur. Temel boyutları 400 × 350 × 2770 mm olarak seçilmiştir. Çerçevenin temelinde, taşıma ve rijit platforma bağlama amaçlı delikler bırakılmıştır. Kolonlar ve kirişler birleşim bölgelerinden sonra 20 cm kadar daha devam ettirilmiştir. Buradaki amaç birleşim bölgelerindeki donatı detayının gerçektekine yakın olmasını sağlamaktır. Böylece birleşim bölgesinde gerçekte rastlanmayan kanca, gönye, aderans sorunları vb. detayların eleman davranışını etkilemesi engellenmiştir. Çerçeve içinde oluşan 1210 mm yüksekliğinde ve 1410 mm uzunluğundaki boşluk, sıvalı tuğla dolgu duvarla kapatılmıştır. Her iki duvar yüzüne birden yapılan yaklaşık 15 mm kalınlığında sıva ile beraber duvar kalınlığı 120 mm'yi bulmaktadır. Duvar imalatı, boşluğu tam ortalayacak şekilde yapılmış, dolayısı ile duvar yüzeylerinden betonarme çerçevenin dış yüzlerine 15 mm mesafe kalmıştır. Çalışma kapsamında 14 deney elemanı üretilmiştir. Üretilen bütün betonarme çerçevelerin geometrisi aynı olup Şekil 4.1' de boyutları verilmiştir. Bütün model tasarımlarında güçlendirme ihtiyacı doğabilecek yapılarda sık karşılaşılan ve minimum kesitlere yakın olan ebatlar göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca kirişin düzlem içi eğilme rijitliği, kolonların düzlem içi eğilme rijitliklerinden daha yüksek tutularak, plastik mafsalların kolonlarda ortaya çıkması hedeflenmiştir. Yani deprem kuvvetleri altında tehlikeli davranış gösterdiği bilinen kuvvetli kiriş-zayıf kolon birleşimi oluşturulmuştur.

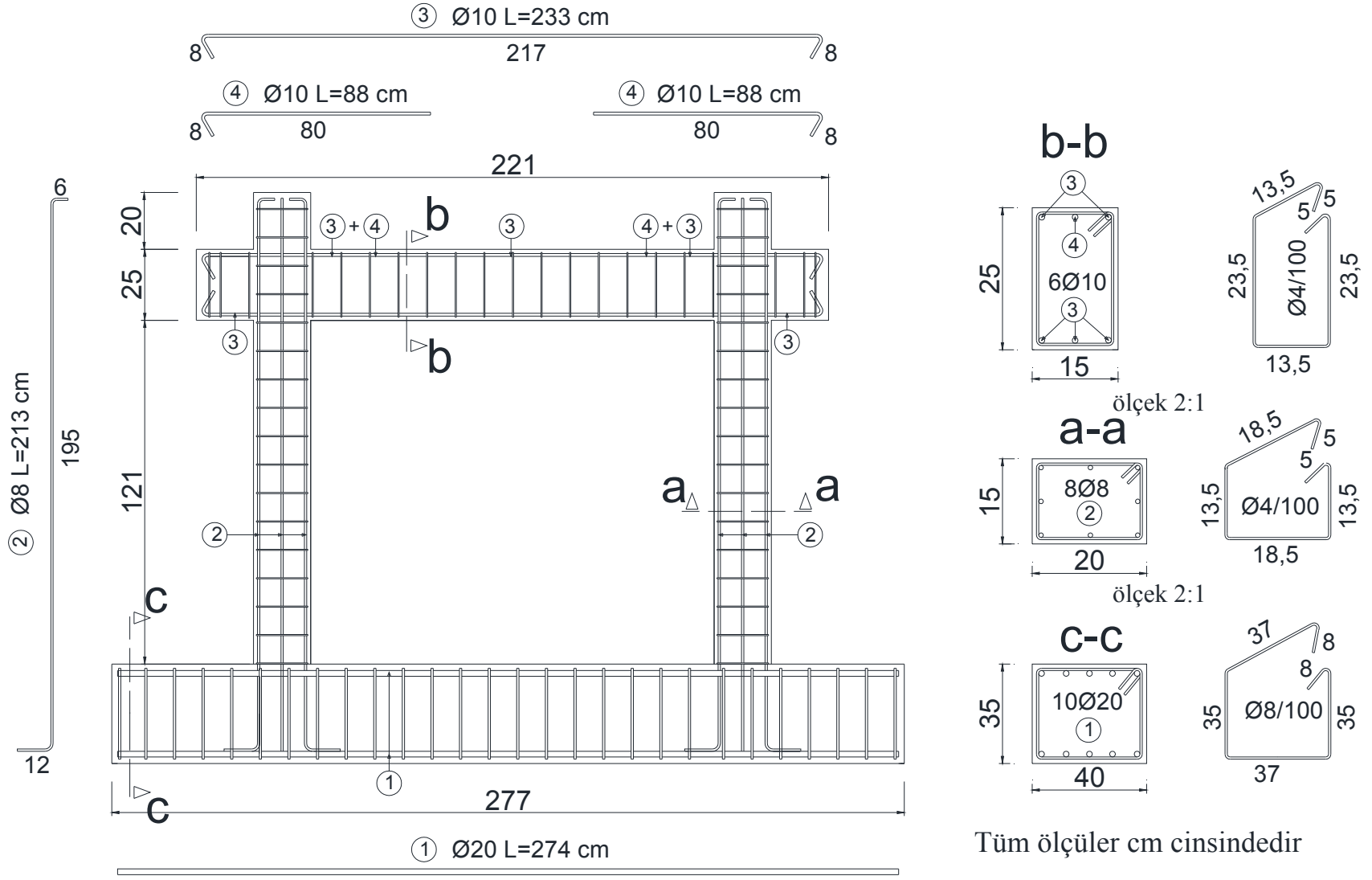


Tüm ölçüler cm cinsindedir.

Şekil 4.1. Deney elemanlarının boyutları

4.2.2. Betonarme çerçevenin donatı detayı

Donatı detaylandırılmasında ülkemizdeki güçlendirme ihtiyacı doğan yapılarda sık rastlanan kusurları (eksik ve nervürsüz etriye, sarılma bölgesinin oluşturulmaması, TS 500 (2000)'e göre minimuma yakın donatı oranları [50]) içermesine çalışılmıştır. Çalışma kapsamındaki bütün deney elemanlarının üretiminde Şekil 4.2'deki donatı planı kullanılmıştır. Buna göre bütün boy demirleri ve temeldeki etriyeler S420 kalitesinde nervürlü demirden, kiriş ve kolonlardaki etriyeler ise S220 kalitesinde düz demirlerden hazırlanmıştır. Kolonlarda 8Ø8 boyuna ve sarılma bölgesi oluşturulmadan Ø4/100 enine donatı kullanılmıştır. Kolonlarda herhangi bir bindirmeli ek yapılmamıştır. Kolon boy demirlerinin temelden sıyrılmaması için yeterli kenetlenme önlemleri alınmıştır. Kirişlerde ise alt yüzde kiriş boyunca devam eden 3Ø10 donatı, üst yüzde ise yine kiriş boyunca devam eden 2Ø10 donatı ile beraber kiriş mesnet bölgelerinde 880 mm uzunluğunda 1Ø10 donatılar kullanılmıştır. Kiriş etriyeleri Ø4/100 olup yine sıklaştırma yapılmamıştır. Temelde ise alt yüzde 5Ø20, üst yüzde 5Ø20 boyuna donatı ve temel boyunca devam eden Ø8/100 etriyeler kullanılmıştır (Şekil 4.2). Kolon ve kirişlerdeki bütün yüzlerde net 7,5 mm pas payı bırakılmıştır.

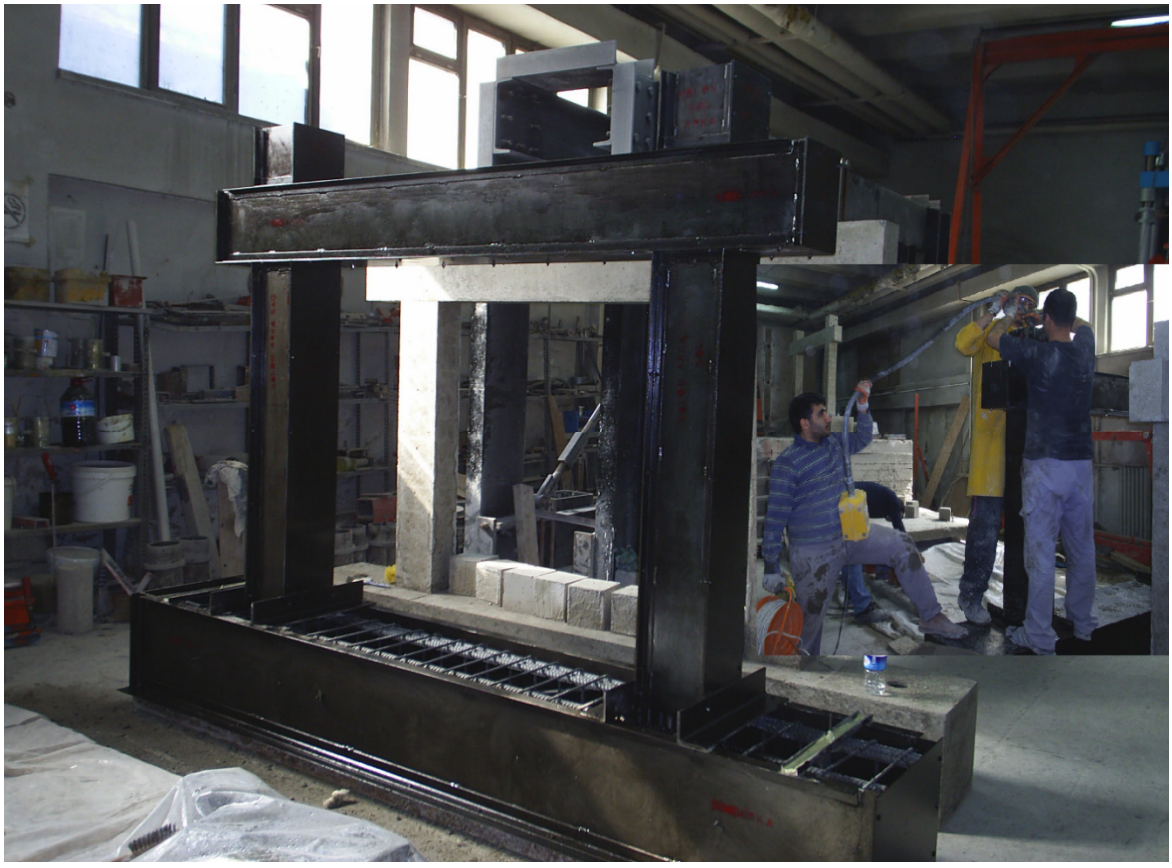


Tüm ölçüler cm cinsindedir

Şekil 4.2. Donatı planı

4.2.3. Betonarme çerçevenin kalıbı ve beton dökümü

Betonarme çerçevenin üretiminde çelik kalıp kullanılmıştır. Çelik kalıp 3 mm kalınlığındaki sac levhaların civatalar yardımıyla bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş, beton dökümü esnasında sehim yapmaması için çelik profillerle de takviye edilmiştir. Kalıp gerçekte olduğu gibi düşey yönde hazırlanmış ve yine gerçekte olduğu gibi düşey yönde beton dökülmüştür (Resim 4.1). Bütün betonarme çerçevenin betonu aynı anda (monolitik) dökülmüştür. Bunun için önce temelin betonu dökülmüş daha sonra fazla zaman kaybetmeden temel kalıbının üst kapakları kapatılarak kolon ve kiriş betonunun dökümüne geçilmiştir. Dökülen taze betonun sıkıştırılmasında vibratör kullanılmıştır. Kalıplar yaklaşık 48 saat sonra sökülmüş, sonrasında betona herhangi bir bakım yapılmamıştır. Beton dayanımının 10 MPa civarında kalması hedeflenmiştir.



Resim 4.1. Betonarme çerçeve kalıbı ve beton dökümü

4.2.4. Tuğla dolgu duvar imalatı

Çerçeve içinde oluşan 1210 mm yüksekliğindeki ve 1410 mm uzunluğundaki boşluk, sıvalı tuğla dolgu duvarla kapatılmıştır. Duvar piyasada 8,5'luk yatay delikli diye bilinen (85x190x190 mm) ebatlarındaki tuğlalarla imal edilmiştir. Bu tuğla dolgu duvar tuğlası olup, duvar imalatı esnasında gerçektekine ve TS EN 771-1 (2005) Türk Standardına uygun olarak delikleri yatay yöne gelecek şekilde kullanılmıştır [49]. Tuğlalar arasındaki bütün derzler yaklaşık 10 mm açıklığında olup sıva harcı ile doldurulmuştur. Her bir duvar yüzü çimento-kum-kireç karışımı harçla yaklaşık 15 mm kalınlığında sıvanmıştır (bkz. Şekil 4.1). Sıva tek seferde ve tek kat olarak Resim 4.2'deki gibi uygulanmıştır. Bütün duvarlarda tuğlalar sıradan bir işçilikle hep aynı desende dizilerek örülmüş ve aynı kişi tarafından sıvası yapılarak üretim kalitesi standartlaştırılmaya çalışılmıştır. Sıva ve derz harcından dayanımlarını belirlemek üzere 150x150 mm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Depremde en olumsuz davranışı gösterdiği bilindiği için üst köşelere delikleri yukarı bakacak şekilde, kırılmış yarım tuğlalar denk getirilmiştir [48].

Resim 4.2. Sıvası tamamlanmış dolgu duvar

4.3. Deney Elemanlarının Özellikleri

Standart yalın elemanlar hazırlandıktan sonra çeşitli parametreler kullanılarak deney elemanları delikli çelik levhalarla takviye edilmiştir. İki adet referans elemanıyla birlikte toplam 14 deney elemanı hazırlanmış ve test edilmiştir. Birinci referans elemanı (R1) sadece betonarme çerçeveden, ikinci referans elemanı (R2) ise içi tuğla dolgu duvarla kapatılmış yalın betonarme çerçeveden oluşturulmuştur. Diğer 12 elemanda deney parametrelerini; kullanılacak delikli levha kalınlıkları (1, 1,5, 2 mm), levhaların karşılıklı bulonlanmasında kullanılan aralıklar (150, 200 mm) ve delikli levhanın kolonlara bağlantısının olup olmaması belirlemiştir. Bahsedilen parametreler, birincil değişkenler olarak ele alınmış ve her seferinde biri değiştirilerek sistematik bir çalışma yapılmıştır. Deney elemanları parametreleriyle birlikte Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri

Deney elemanı adı	Levha kalınlığı (t) mm	Bulon aralıkları (s) mm	Kolona bağlantı	Deney elemanı adı	Levha kalınlığı (t) mm	Bulon aralıkları (s) mm	Kolona bağlantı
R1	-----	-----	-------	S1.5ZN150	1,5	150	Yok
R2	-----	-----	-------	S1.5ZY200	1,5	200	Var
S1ZN200	1	200	Yok	S1.5ZY150	1,5	150	Var
S1ZN150	1	150	Yok	S2ZN200	2	200	Yok
S1ZY200	1	200	Var	S2ZN150	2	150	Yok
S1ZY150	1	150	Var	S2ZY200	2	200	Var
S1.5ZN200	1,5	200	Yok	S2ZY150	2	150	Var

Deney elemanlarının isimleri deney parametrelerini özetleyecek şekilde seçilmiştir. "S" harfi İngilizce'de deney elemanı anlamına gelen "Specimen" kelimesinin kısaltılmasıdır. "S" den sonra gelen sayı (1, 1,5, 2) delikli takviye levhasının mm cinsinden kalınlığını simgelemektedir. Sayıdan sonra gelen ilk harf "Z, L, H" İngilizce'de sırasıyla "Zero, Low, High" kelimelerine karşı gelmekte olup, kolonlara verilecek eksenel yükün yine sırasıyla "sıfır, düşük, yüksek" düzeyde olacağı anlamı taşımaktadır. Bu harflerden sonra gelen ikinci harf ise "Y, N" İngilizcede sırasıyla "Yes, No" kelimelerine karşı gelmekte olup, delikli levhanın kolonlara bağlantısının "yapılıp, yapılmayacağı" anlamını temsil etmektedir. İsim sonundaki sayılar (150, 200) delikli çelik levhanın tuğla duvara bulonlanma aralıklarını mm cinsinden göstermektedir (Çizelge 4.1). İsimlendirmenin İngilizce odaklı yapılmasının sebebi, çalışmanın sonunda ortaya çıkacak bilimsel neticelerin uluslararası yayın organlarıyla da paylaşılmasının temenni edilmesidir.

Bu çalışmada araştırılan değişkenlerden levha kalınlıkları (1, 1,5, 2 mm) ve bulon aralıkları (150, 200 mm) daha önce yapılmış ön çalışmaların ışığında belirlenmiştir [5,6]. Bulon aralıkları tasarlanırken, gerçekte iki komşu tuğlanın en az birinde bulon olması istendiğinden 200 mm üzerine çıkılmamış ve çok da pratik olmayacağı düşünülerek 150 mm altına inilmemiştir. Deney elemanlarının bir yarısında delikli levhalar sadece dolgu tuğla duvara, diğer yarısında ise hem kolonlara hem de tuğla duvarlara bağlanmıştır. Kapsamlı bir çalışmanın tezi içeren bu bölümünde kolonlara eksenel yük verilmemiştir.

Bunların dışında deney programı tasarım sürecinde düşünülmeyip deney elemanlarının test sürecinde yaşanan gelişmeler sonucu kimi zaman zorunluluktan dolayı, kimi zaman ise davranışı biraz daha iyileştirmek adına ilave değişkenler konulmuş ve bunlar da araştırma konusu içine girmiştir.

Sözü edilen ilave değişkenler;
a) kolonlara çelik manto yapılması,
b) iki kolonu birbirine bağlayan çelik çekme çubukları,
c) birleşim bölgesinin çelik plakalarla takviye edilmesi,
d) duvar köşelerinde bulunan kolon bağlantı elemanlarının yine duvar köşelerinde bulunan "L" şeklindeki mevcut çelik şeritlere kaynaklanması olarak sonradan tasarlanmıştır. Hangi elemanda ne tür ilave değişikliğin yapıldığı Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. İlave değişkenler

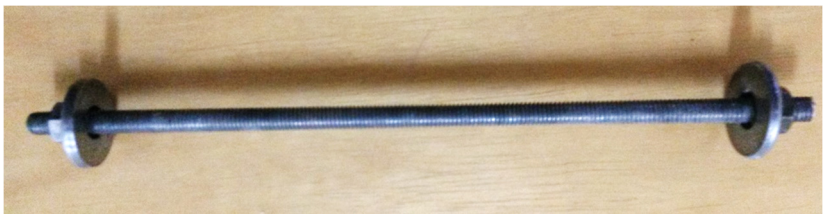
Deney elemanı adı	Çelik manto (a) ve çelik plaka (c)	Çekme çubuğu (b)	"L" şeritlere kaynak (d)	Deney elemanı adı	Çelik manto (a) ve çelik plaka (c)	Çekme çubuğu (b)	"L" şeritlere kaynak (d)
R1	-----	-----	-------	S1.5ZN150	Var	2 tane	-------
R2	-----	-----	-------	S1.5ZY200	Var	2 tane	Tek sıra
S1ZN200	Yok	Yok	-------	S1.5ZY150	Var	Yok	Tek sıra
S1ZN150	Var	2 tane	-------	S2ZN200	Var	Yok	-------
S1ZY200	Var	2 tane	Yok	S2ZN150	Var	4 tane	-------
S1ZY150	Var	2 tane	Tek sıra	S2ZY200	Var	Yok	Dört sıra
S1.5ZN200	Var	2 tane	-------	S2ZY150	Var	Yok	Dört sıra

Çizelge 4.2'de yapılan imalatların yazımı kısaltılarak gösterilmiş aynı zamanda anlaşılmasını kolaylaştırmak için, yukarıda maddeler halinde anlatmakta kullanılan harflerle de (a, b, c, d) belirtilmiştir.

Deney programında yapılan bu ilavelerin gerekliliği, sebepleri ve imalatının nasıl yapıldığı deney sürecinin anlatıldığı sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak aktarılmaya çalışılmış ve Çizelge 4.2'ye atıflar yapılmıştır.

4.4. Delikli Levhalarla Güçlendirme Tekniği

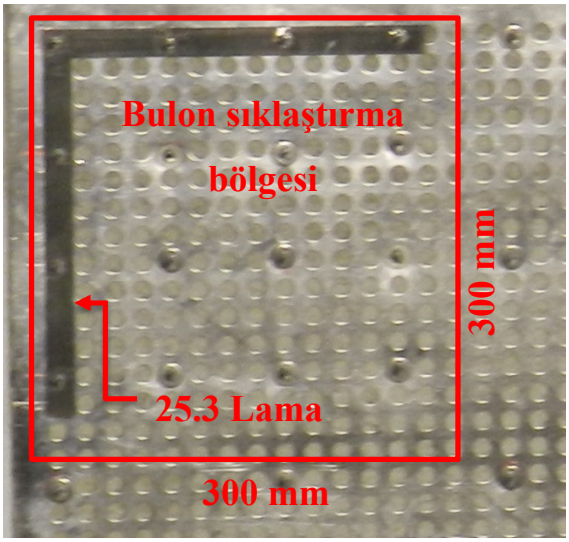
Bu yöntemde mevcut tuğla duvarın her iki yüzüne delikli çelik levhalar yerleştirilmiş ve delinecek noktalar karşılıklı olarak işaretlenerek 7 mm çapında delikler açılmıştır. Delme işlemi yapılırken önce 120 mm kalınlığındaki duvarın bir yüzünden delmeye başlanmış, delik derinliği 60 mm'lere ulaştığında duvarın diğer yüzüne geçilerek karşısından aynı işleme delik tamamen açılıncaya kadar devam edilmiştir. Bu şekilde tek taraftan delip geçilmesi durumunda duvarın karşı yüzündeki sıva katmanından parça kopması şeklinde oluşan hasarın önüne geçilmiştir. Delik açıldıktan sonra Resim 4.3'deki gibi yaklaşık 170 mm uzunluğundaki Ø6 metrik gijonlar delikten geçirilmiş, pullar takılmış ve karşılıklı somunlarla bağlanmıştır. Burada kullanılacak pul çaplarının levha delik çapından daha büyük olmasına dikkat edilmelidir.



Resim 4.3. Delikli levhaları duvara bağlamakta kullanılan gijon

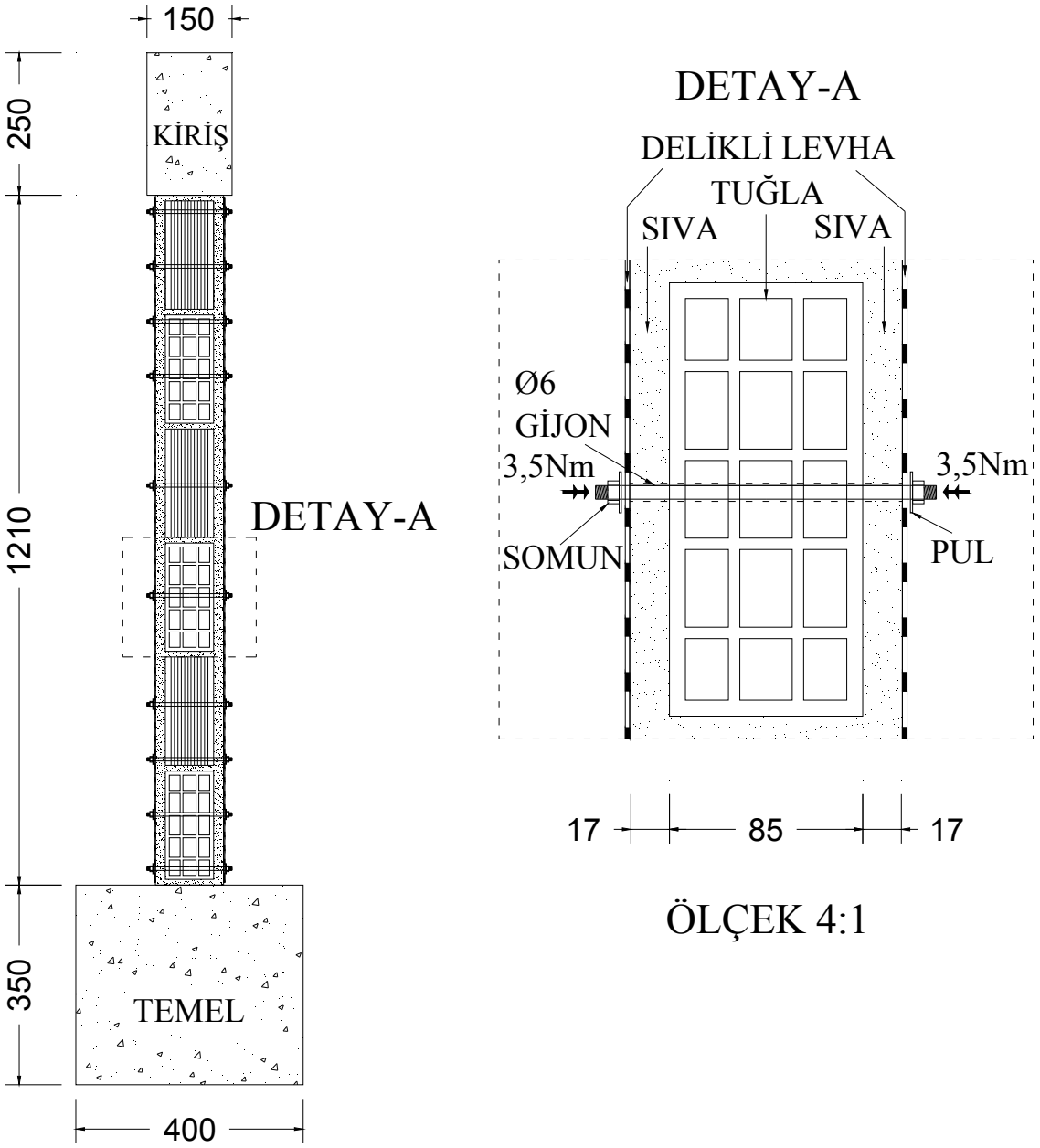
Duvar köşelerinde yüksek gerilmelerin oluştuğu ve yapılacak duvar güçlendirmelerinde bu bölgede ek önlemlerin alınması gerektiği daha önce yapılan araştırmalarda bahsedilmiştir [5, 6, 30, 47, 48]. Bu araştırmada ise duvar köşelerinde ezilmeyi geciktirmek üzere alınan ek önlemler, Babayani (2012) çalışmasında etkinliği kanıtlanmış yöntemlerden derlenerek seçilmiştir [5].

Buna göre bütün güçlendirilmiş elemanlarda; duvar köşelerindeki 300×300 mm'lik bölgelerde bulon aralığı 100 mm'ye düşürülmüş, ek olarak kenar bulonların altında "L" şeklinde 25×3 mm kesitli çelik lamalar kullanılmıştır (Resim 4.4). "L" şeklindeki lamaları oluşturmak için iki tane 25×3 mm kesitli ve 320 mm uzunluğunda lama birbirleri ile dik açı oluşturacak şekilde yerleştirilmiş ve temas uzunluğu boyunca kaynaklanmıştır. Lamalarda 9 mm çapında delikler açılmış böylece 6 mm çapındaki gijonlarla arasında 3 mm tolerans olması sağlanmıştır.



Resim 4.4. Köşe bölgelerde ezilmeye karşı önlem

Bütün gijonlar yerlerine yerleştirilip delikli levhalar karşılıklı tutturulduktan sonra, gijonların üzerindeki somunlar 3,5 Nm torkla sıkıştırılarak delikli levhalarla güçlendirme işi tamamlanmıştır. Sıkıştırma torku (3,5 Nm), duvarda hasar oluşturmayacak şekilde ayarlanmış optimum bir değerdir. Verilen 3,5 Nm torkla 6 mm çapındaki gijona, akma dayanımının %75'i kadar çekme gerilmesi uygulanmıştır. Yatay yükleme sırasında duvarda oluşacak basınç gerilmeleri sonucunda "poisson" etkisiyle duvar, düzleme dik yönde de şekil değiştirmeye çalışacaktır. Bu durum bilindiği gibi gijonlarda ilave çekme gerilmeleri oluşturacatır. Kalan %25'lik dayanım payı, işte bu şekil değiştirmelerden sonra meydana gelebilecek ilave çekme gerilmelerini güvenli yönde karşılayabilmek, ayrıca ötelenme oranları henüz düşük düzeylerdeyken gijonların koparak o bölgede sargılama basıncının yitirilmesini önlemek için bırakılmıştır. Delikli levhalarla güçlendirme detayı, deney elemanının düşey kesiti üzerinden Şekil 4.3'te verilmiştir. Bütün malzemeler hazır olduğu takdirde duvarın delikli levhalarla takviyesi işlemini laboratuvar koşullarında iki kişi birlikte yaklaşık 2,5 saatte tamamlayabilmektedir.



Şekil 4.3. Delikli levhalarla güçlendirme detayı

4.5. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri ve dayanımları bu bölümde anlatılacaktır. Malzemelerden beton, sıva, donatı, tuğla ve delikli levhaya ait dayanım özellikleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında deneysel olarak saptanmış, diğerlerinde ise üretici firmanın verdiği katalog değerlerinden alınmıştır.

4.5.1. Beton

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan betonun karışımı laboratuvarda yapılmıştır. Beton üretiminde kum, çakıl, çimento ve su kullanılmış, bunların haricinde herhangi bir kimyasal katkı ilave edilmemiştir. Kullanılan agregada dere malzemesi, çimentoda ise piyasada en çok tercih edilen ve en ekonomik olan KPÇ 32,5 kodlu olanlar tercih edilmiştir. Beton üretiminde hedeflenen dayanım olan 10 MPa değerini sağlamak için Çizelge 4.3'de verilmiş olan karışım oranları kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Beton karışım oranları

Hedeflenen Beton Dayanımı (10 MPa)	
Malzeme	**Ağırlık (kg/m^3)**
Çimento	320
Su	190
Çakıl (7-15 mm)	680
Kum (0-3 mm)	1100

Beton kalıba yerleştirilirken vibratör kullanılmıştır. Kalıplar iki gün sonra sökülmüş ve daha sonra betona herhangi bir kür yapılmamıştır. Her elemanın beton dökümünde en az yedi adet 150×150×150 mm boyutlarında küp numune alınmıştır. Bu numuneler kolon ve kirişlere ait olup temel betonundan örnek almaya gerek duyulmamıştır. Alınan numuneler betonarme çerçeve ile aynı ortam koşullarında muhafaza edilmiştir. Küp numunelerin basınç dayanımları deneyden hemen önce beton presinde kırılarak ölçülmüştür. Ölçülen beton basınç dayanımları ve aritmetik ortalamaları her deney elemanı için Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Kullanılan karışımda su/çimento oranı yaklaşık 0,6'dır. Karışımda kullanılan agregaların dış ortamda bulunmasından dolayı içindeki su muhtevası iklim şartlarına göre değişmiş bu da su/çimento oranının tam olarak sabit tutulamamasına neden olmuştur. Çizelge 4.4 incelendiğinde, çimentonun oldukça taze ve agreganın yaz aylarındaki oldukça kuru haliyle hazırlanan betonun basınç dayanımının hedeflenen dayanımın biraz üzerine çıktığı, çimentonun raf ömrü dolmak üzereyken ve agreganın kış aylarındaki ıslak haliyle hazırlanan betonlarda ise biraz altında kaldığı anlaşılmıştır. Genel olarak hedeflenen dayanım tutturulabilmiş olsa da oluşan bazı sapmaların sebebinin anlatılan faktörler olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.4. Ortalama beton basınç dayanımları

Deney Elemanı Adı	**(150x150mm) Beton Küp Ort. Basınç Dayanımı (MPa)**	N.1 (MPa)	N.2 (MPa)	N.3 (MPa)	N.4 (MPa)	N.5 (MPa)	N.6 (MPa)	N.7 (MPa)
R1	11	12,4	9,0	8,7	13,5	14,0	13,0	8,0
R2	10	11,0	12,5	8,0	12,0	9,6	10,0	8,0
S1ZN200	12	10,2	14,3	10,2	14,1	13,6	10,5	11,5
S1ZN150	11	11,4	11,4	10,7	13,4	9,9	12,4	9,6
S1ZY200	15	13,8	15,2	15,5	13,3	16,9	15,4	16,0
S1ZY150	15	16,0	14,0	14,5	16,3	13,8	16,4	15,3
S1.5ZN200	20	18,8	18,8	20,6	20,1	21,8	21,8	20,5
S1.5ZN150	22	20,3	26,4	19,5	25,0	19,2	26,0	20,0
S1.5ZY200	17	16,5	17,9	15,8	16,5	18,5	17,0	16,8
S1.5ZY150	17	16,7	16,7	17,3	17,9	17,8	17,4	17,0
S2ZN200	10	12,0	8,5	9,5	9,1	9,0	10,8	10,6
S2ZN150	10	10,0	10,0	9,1	9,0	11,0	11,0	10,1
S2ZY200	9	9,0	8,1	9,5	9,0	10,0	9,2	9,0
S2ZY150	8	8,5	9,0	7,1	8,1	9,0	8,1	8,0

4.5.2. Donatı çeliği

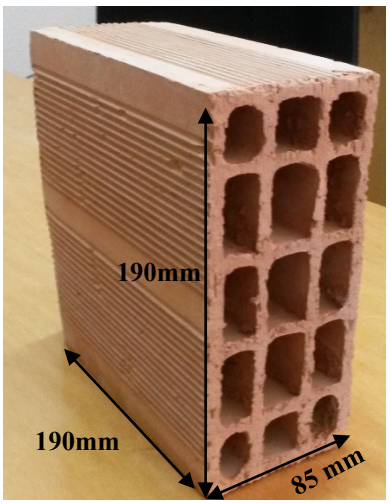
Donatı özelliklerinde ve dayanımlarında farklılık olmaması için deney elemanları için gerekli olan tüm donatılar, aynı fabrikanın aynı anda çıkan malzemesinden, tek seferde ve topluca alınmıştır. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan bütün boy demirleri S420 kalitesinde nervürlü demirden, kiriş ve kolonlardaki etriyeler ise S220 kalitesinde düz demirlerden hazırlanmıştır. Yeterli sayıdaki çekme deneyleri sonucu çıkan ortalama akma ve kopma dayanımları Çizelge 4.5'de gösterilmiş, bu değerlerin fabrika verileriyle de uyuştuğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.5. Donatı çekme dayanımları

Donatı Dayanımları		
Çelik Sınıfı ve Çapları	**Akma Dayanımı f_y (MPa)**	**Kopma Dayanımı f_u (MPa)**
S420 (Ø8)	460	600
S420 (Ø10)	500	680
S220 (Ø4)	270	390

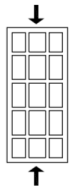
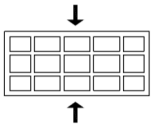
4.5.3. Tuğlalar

Duvar imalatında piyasada 8,5'luk yatay delikli diye bilinen ve TS EN 771-1 (2005) Türk Standardına uygun tuğlalar kullanılmıştır. Buna göre bir tanesinin ağırlığı yaklaşık 2 kg gelen tuğlanın boyutları ve deseni Resim 4.5'de gösterilmiştir. Tuğlanın delikli yüzeyinin net alanı 6500 mm^2 gelmektedir. Tuğlalar aynı fabrikanın aynı anda çıkan malzemesinden tek seferde ve topluca alınmıştır. Tuğlanın basınç dayanımı, yükün uygulama yönüne bağlı olarak değiştiğinden; tuğla delikleri yönünde, boşluklara dik-kısa yönde ve boşluklara dik-uzun yönde ayrı ayrı testler yapılmıştır. Basınç testinden önce tuğlaların yükleme doğrultusundaki yüzeylerinde betondan başlıklar oluşturulmuş, böylece gerilmelerin tuğla içinde daha düzgün dağılması sağlanmıştır. Her üç doğrultuda en az beş test yapılmıştır. Ortalama dayanım değerleri ve yükleme doğrultuları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6 incelenecek olursa tuğlanın delikleri doğrultusunda diğer yönlere göre 1,4 kat daha fazla dayanım gösterdiği görülecektir.



Resim 4.5. Yatay delikli tuğlanın boyutları

Çizelge 4.6. Tuğla dayanımları

Yatay Delikli Tuğla Dayanımları		
Yükleme Doğrultusu	**Basınç Dayanımı P_u / A_{net}**	**Basınç Dayanımı $P_u / A_{brüt}$**
	46 MPa	20 MPa
	32 MPa	8,8 MPa
	31 MPa	5,2 MPa

4.5.4. Sıva ve harç

Duvar örmekte ve sıva yapmakta kullanılan harç gerçektekine benzer olarak kum, kireç, çimento ve su karışımıyla elde edilmiştir. Her iki yerde kullanılan harç için aynı karışım oranları kullanılmıştır. Bu oranlar hacimsel birim olarak tasarlamış ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Buradaki su oranı yaklaşık bir oran olup kumun su muhtevasına ve sıva için geçen bekleme süresine göre değişebilmektedir. Tuğla dolgu duvar üretim kalitesini benzer seviyelerde tutabilmek için bütün harç karışımları aynı kişi tarafından hazırlanmış ve yine aynı kişi tarafından uygulanmıştır. Her elemanın sıva imalatı sırasında en az üç adet 150×150×150 mm boyutlarında küp numune alınmıştır. Genelde betondan numune almak için kullanılan bu boyutlardaki küplerin tercih edilmesinin sebebi, sıva dayanımının düşük olmasından dolayı kalıptan çıkarma esnasında numuneye istemeden verilen hasarın basınç dayanımını pek fazla etkilemeyecek düzeyde kalmasının temenni edilmesidir. Küp numunelerin basınç dayanımları, deneyden hemen önce beton presinde kırılarak ölçülmüştür. Ölçülen sıva basınç dayanımları ve aritmetik ortalamaları her deney elemanı için Çizelge 4.8'de verilmiştir. Tüm numunelerin basınç ortalamaları birbirine oldukça yakın olmakla beraber genel ortalamanın yaklaşık 2,5 MPa olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7. Sıva harcı hacimsel karışım oranları

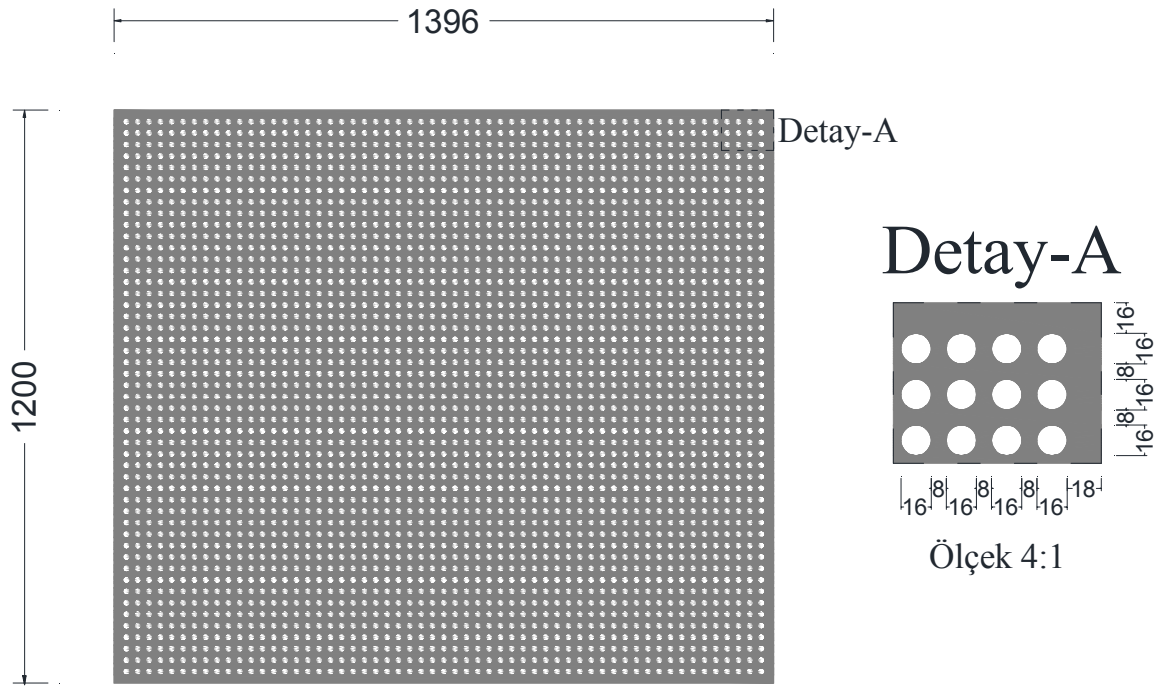
Sıva Harcı İçin Karışım Oranları	
Malzeme	**Hacimsel oran**
Çimento	1
Kireç	2
Kum (0-3 mm)	8
Su	1,5

Çizelge 4.8. Sıva harcı basınç dayanımları

Deney Elemanı Adı	**(150x150mm) Küp Sıva Ort. Basınç Dayanımı (MPa)**	**Deney Elemanı Adı**	**(150x150mm) Küp Sıva Ort. Basınç Dayanımı (MPa)**
R2	2,7	S1.5ZY200	3,6
S1ZN200	2,5	S1.5ZY150	2,1
S1ZN150	2,6	S2ZN200	2,5
S1ZY200	3,2	S2ZN150	2,2
S1ZY150	2,4	S2ZY200	2,0
S1.5ZN200	3,2	S2ZY150	2,3
S1.5ZN150	3,0	**Genel ort.**	**2,5**

4.5.5. Delikli çelik levhalar

Delikli levhalar DKP tipi çelik sacın perfore baskı makinaları ile üzerinde delikler açılmasıyla elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan sacın kalınlığı 1, 1,5 ve 2 mm olup; boyutları, deliklerin merkezden merkeze olan uzaklıkları, delik çapları, desen tipi gibi bilgileri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Levhanın delik çapları 16 mm olup güçlendirme imalatında içinden 6 mm çapında gijonlar geçmektedir. Aradaki 10 mm'lik farkın oluşturduğu tolerans sayesinde levhalar duvarın iki yüzüne karşılıklı yerleştirilip kolayca gijonlarla bağlanabilmektedir. Delikli levhanın dayanım değerleri, levhadan çıkartılan 20 mm enindeki yeter sayıda şeritlerin çekme cihazında test edilmesi ile bulunmuştur. Buna göre bu çalışmada kullanılan delikli levhanın akma dayanımı 350 MPa, kopma dayanımı ise 410 MPa çıkmıştır.



Şekil 4.4. Delikli çelik levha geometrisi

4.5.6. Gijonlar ve çelik profiller

Delikli levhalar dolgu duvara gijonlarla bağlanmıştır. Kullanılan gijonlar siyah metrik 6'lık (M6) olup St37 kalitesindedir. Bu gijonlar piyasada bir metrelik parçalar halinde satılmakta, istenilen ölçülerde kolayca kesilip kullanılmaktadır. Deney elemanlarının üretiminde 25×3 mm kesitli lamalar ve bazılarında L30.30.3 köşebent profillerde kullanılmıştır. Bu malzemeler de St37 kalitesinde olup tasarım yapılırken fabrika verileri kullanılmıştır.

4.6. Yükleme Düzeneği

Bu çalışma kapsamındaki deneyler rijit deney platformu üzerinde yapılmıştır. Deney platformu; 400 mm kalınlığındaki döşemeden ve 400 mm kalınlığında güçlü bir düşey betonarme duvardan oluşmaktadır. Deney elemanları düzeneğe Resim 4.6'da gösterildiği gibi yerleştirilmiş ve döşemeye iki noktadan M42 bulonları ile sıkıca bağlanmıştır. Deney elemanının temeli, bir de çelik bir düzenekle beraber M42 bulonu ile betonarme duvara sabitlenerek; yükleme sırasında oluşabilecek rijit ötelenme oldukça kısıtlanmıştır. Deney elemanının alt ve üst temel yüzeyine oturacak ve bütün kenarları sargılayacak şekilde L100.100.10 çelik köşebent profilden iki adet manto hazırlanmıştır. Temelin altına ve üstüne yerleştirilen çelik mantolar, her deneyde birbirlerine M20 bulonlarıyla altı noktadan

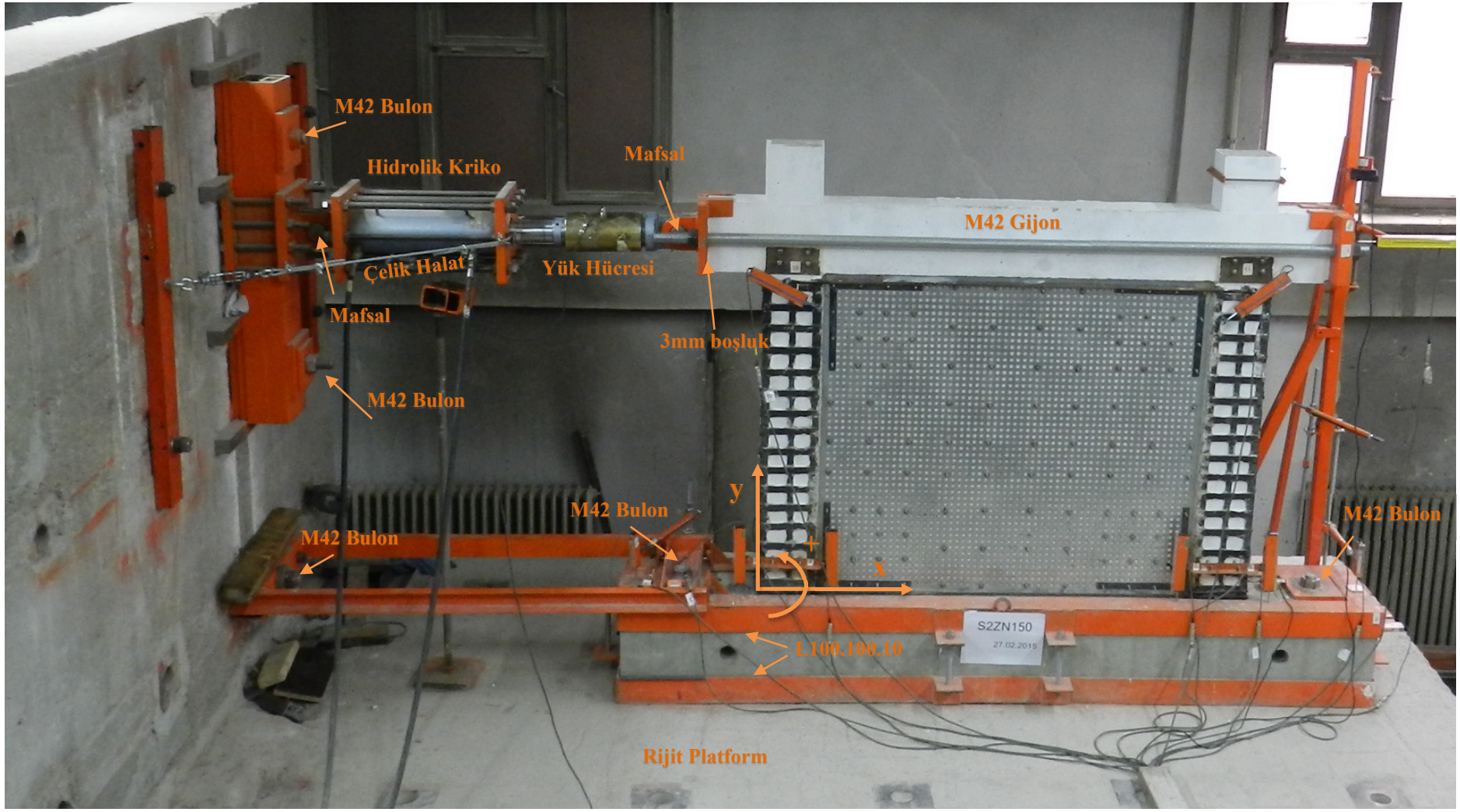
35 Nm torkla sıkılarak bağlanmıştır. Yapılan bu düzeneğin amacı ise temeli sargılayarak, kesme mukavemetini arttırmak ve elemanı rijit döşemeye bağlayan bulonlara etkin bir şekilde ard germe verebilmektir.

Deney elemanına yatay yükleme, çift etkili hidrolik kriko vasıtası ile kiriş aks hizasından yapılmıştır. Krikonun bir ucu rijit duvara, diğer ucu ise yük hücresine bağlanmış, kullanılan mafsallar aracılığı ile yük deney elemanına aktarılmıştır. Bu şekilde kriko ve yük hücresinde eksene dik yönde kuvvet oluşması önlenmiştir. Yatay yükü deney elemanına aktarmak için kiriş uç yüzeylerine rijit plakalar takılmış ve plakalar birbirine iki kenarından kiriş boyunca uzanan M42 gijonları ile tutturulmuştur. Bu yöntem sayesinde çekme durumunda oluşan kuvvetler, gijonlar aracılığı ile kirişin karşı ucundaki rijit plakaya iletilmiştir. Böylece hem itme hem çekme durumunda kiriş boyunca yalnızca basınç gerilmelerinin oluşması sağlanmıştır. Kiriş boyunca uzanan M42 gijonlarına ard germe verilmemiş, yaklaşık 3 mm boşluklu tutturulmuştur. Böylece kirişe dışardan eksenel yük verilmesinin, dolayısı ile bu durumun deney davranışını etkileyebilmesinin önüne geçilmiştir (Resim 4.6).

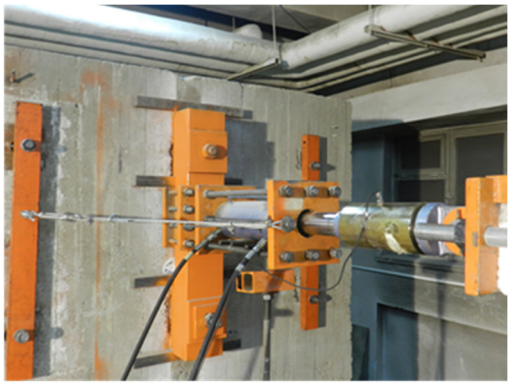
Deneysel çalışmanın başında düzlem dışı ötelenme için herhangi bir düzenek tasarlanmamıştır. Ancak S1.5ZY200 elamanı testinde düzlem dışı ötelenme sorunu ortaya çıkmıştır. Bu hareketi kısıtlamak amacıyla mevcut yükleme düzeneğine ilave yeni bir düzenek tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Bu düzenek, krikonun yalnızca düşey ve yatay yönlerde hareket etmesini sağlayarak düzlem dışı hareketlerini engelleyen iki adet manşonlu çelik halattan meydana gelmektedir (Resim 4.7). Böylece deney elemanını tutup, aktarılan sürtünme kuvvetiyle davranışın değişmesine neden olmaktansa yükü veren kriko tutulmuştur.

Kullanılan krikonun genliği (strok), deney elemanının kirişine ileri ve geri yönde yeterli deformasyonu yaptıracak şekilde seçilmiştir. Yükleme hızı elektrikli hidrolik pompayla manuel idare edilmiştir. Yük okumaları, kriko ile kiriş arasına yerleştirilen, hem çekmeye hem basınca çalışan 600 kN kapasiteli bir yük hücresi ile yapılmıştır. Deney sistemine aktarılan yatay yük sinyal değerleri, elektronik veri toplama cihazından geçtikten sonra bilgisayara aktarılıp kaydedilmiştir.

Kapsamlı bir çalışmanın tezi içeren bu bölümünde kolonlara eksenel yük verilmemiştir.



Resim 4.6. Yükleme düzeneği



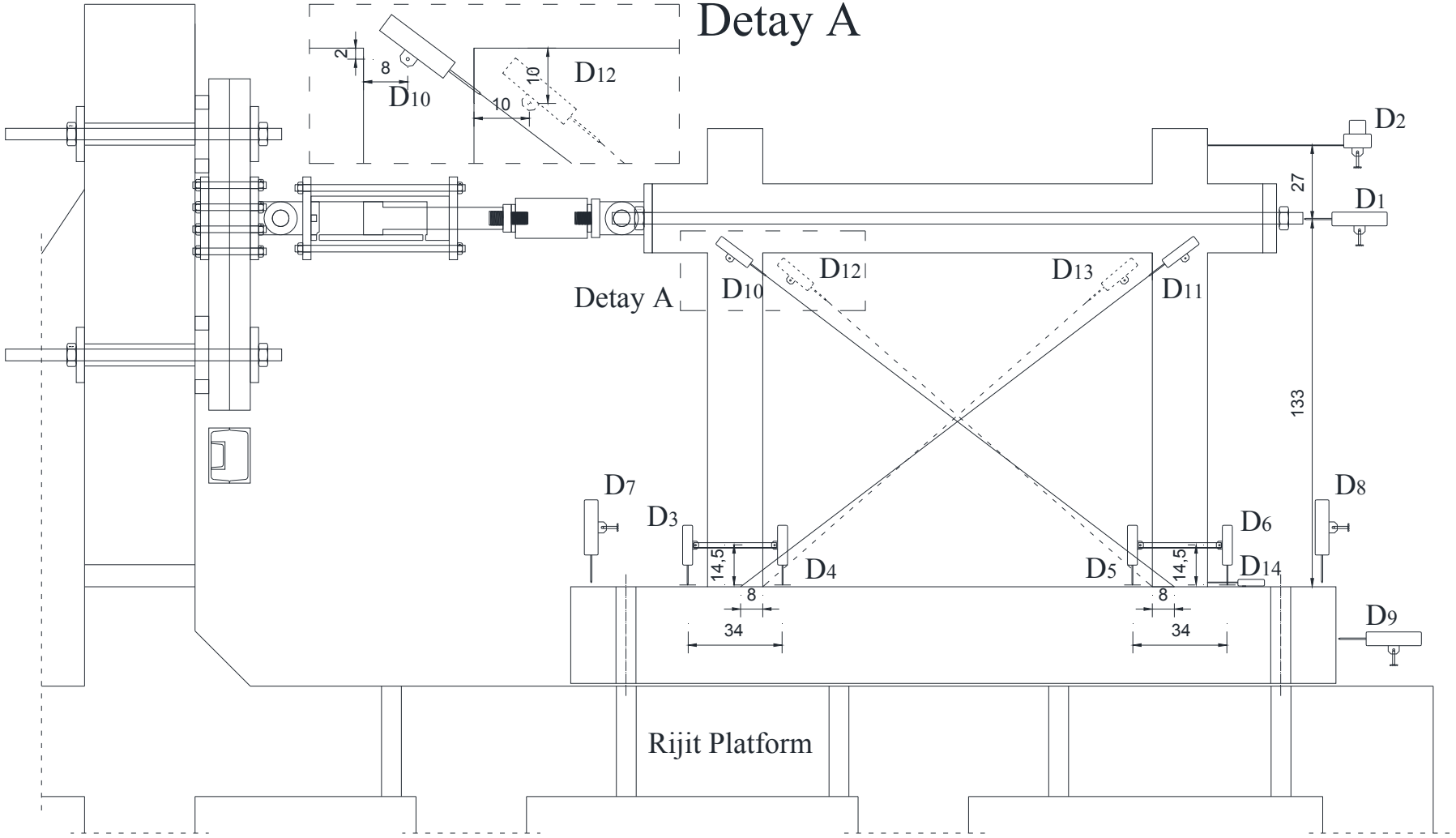
Resim 4.7. Düzlem dışı hareketi kısıtlayan düzenek

4.7. Ölçüm Düzeni ve Değerlendirmesi

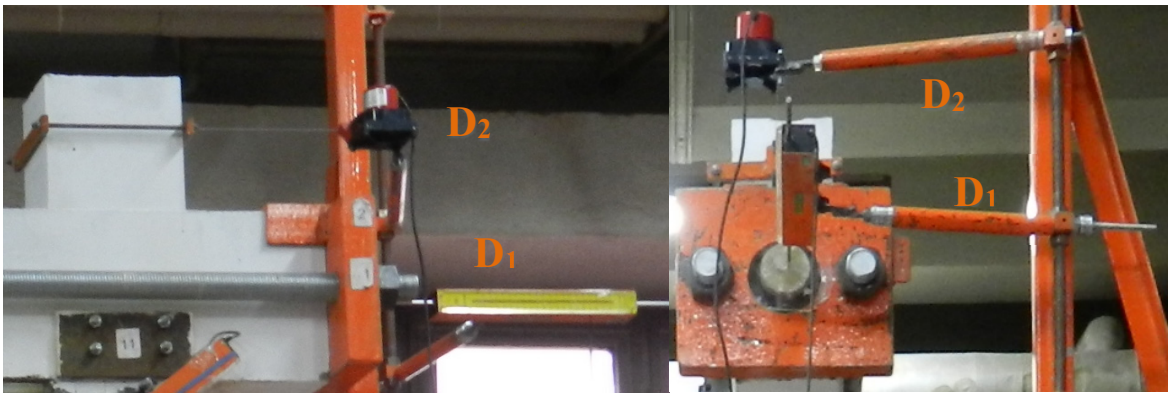
Deney elemanlarının çeşitli yön ve doğrultudaki deplasmanlarını ölçmek amacıyla on iki adet elektronik deplasman ölçerden (LVDT), bir adet makaralı ve bir adet lineer potansiyometreden yararlanılmıştır. LVDT ve lineer potansiyometre 0,01 mm'ye kadar, makaralı potansiyometre ise 0,4 mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilmektedir. Bu cihazlar aracılığıyla alınan deplasman verileri, elektronik veri toplama cihazından geçtikten sonra bilgisayara aktarılmıştır.

Kullanılan her ölçüm cihazı "D" harfi ve alt indisine gelen bir sayı ile isimlendirilmiştir. Ölçüm düzeni ve cihazlarının yerleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bütün ölçüm cihazlarının oldukça sağlam biçimde mesnetlendirilmiş olmasına özen gösterilmiştir.

D_1 ve D_2 cihazları ile yatay ötelenme miktarları ölçülmüştür. Kat ötelemesi alınan bu bölgedeki ölçümün, en önemli deney verilerini oluşturacağı bilindiğinden birbirini yedekleyecek şekilde iki cihaz kullanılmıştır. D_1; 200 mm genlik kapasitesine sahip LVDT olup kirişin sağ uç yüzeyinin merkezinden ölçüm alacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun için burada bulunan yükleme düzeneğine ait plaka, merkezinde 100 mm çapında delik olacak şekilde hazırlanmıştır. D_2 cihazı ise 1600 mm genlik kapasitesine sahip makaralı potansiyometre olup, temel üst yüzeyinden 1,6 m yukarıda koloncuk üzerinden ölçüm almıştır (Resim 4.8). D_2'den alınan veriler deneyle eş zamanlı olarak üçgen benzerliği kullanılarak sanki D_1 noktasından ölçüm alınıyormuş gibi benzeştirilmiştir. Deney sonuçları D_1 ve D_2'den alınan ölçümlerin deneyin son anlarına kadar ± 1 mm hata payı ile birbirine oldukça yakın olduğunu göstermiştir. D_2 ölçümü, yapılan ilk deneylerde 200 mm kapasiteli LVDT ile temel üst yüzünden 600 mm yukarıda, kolondan alınmıştır.



Şekil 4.5. Ölçüm düzeni



Resim 4.8. D_1 ve D_2 cihazları ölçüm düzeni

D_3 ve D_4 cihazları ile alınan ölçümlerden sol kolon alt uçlarında oluşan eğrilikler, D_5 ve D_6 cihazları ile alınan ölçümlerden sağ kolon alt uçlarında oluşan eğrilikler hesaplanmaya çalışılmıştır (Resim 4.9). Bu ölçümlerin hepsinde 100 mm genlik kapasitesine sahip LVDT'ler kullanılmıştır. Bilindiği üzere eğrilik birim boydaki dönme miktarıdır. Bunun için eğrilik hesaplarında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$k_{sol} = \frac{d_4 - d_3}{a.b} \tag{4.1}$$

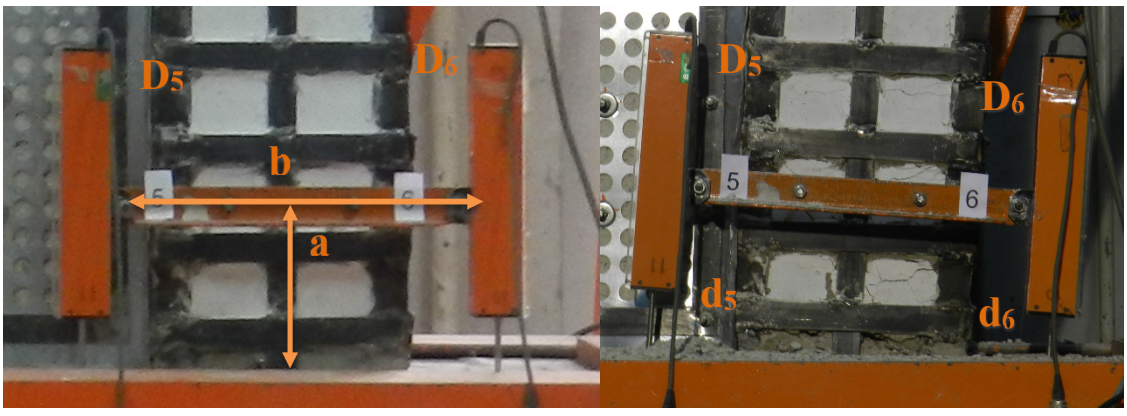
$$k_{sağ} = \frac{d_6 - d_5}{a.b} \tag{4.2}$$

$k_{sol,\ sağ}$: kolon alt uçlarındaki eğrilik

d_i : D_i nolu LVDT'den okunan deformasyon

a : LVDT'lerin temel üst yüzüne mesafesi

b : LVDT'lerin eksenleri arasındaki mesafe



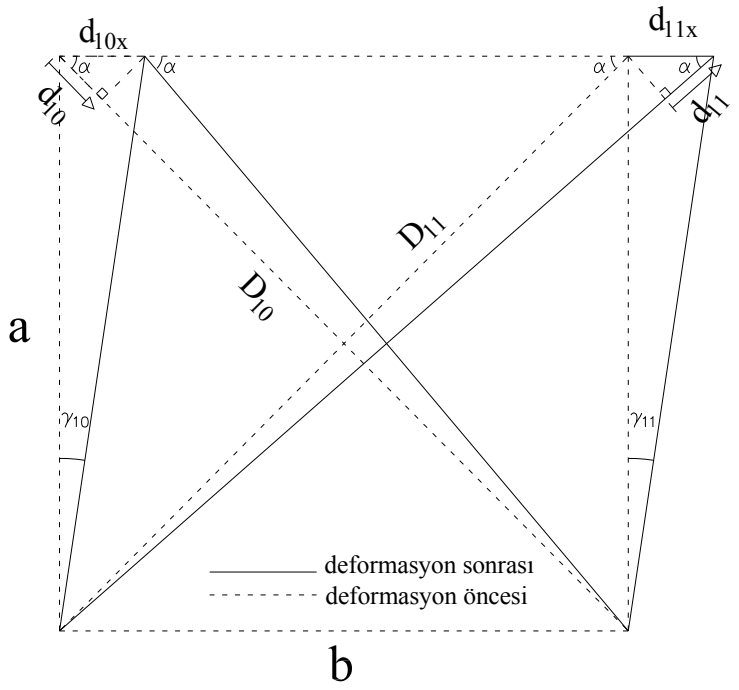
Resim 4.9. Sağ kolon alt uç eğrilik ölçümü hesabında kullanılan değişkenler

50 mm genlik kapasitesine sahip D_7, D_8 ve D_9 isimli LVDT'ler ile deney elemanının platform üzerindeki rijit hareketi kontrol edilmiştir. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi bunlardan D_7 ve D_8, temelin düşey yönlü hareketini ve dönmesini; D_9 ise yataydaki ötelenmeyi deney sırasında takip etmek üzere yerleştirilmiştir. Bütün deneyler için bu cihazların verileri incelendiğinde D_7 ve D_8 net deplasmanının en fazla 0,2 mm, D_9'da ise 2 mm olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarına ait betonarme çerçevenin ve dolgu duvarın kayma deformasyonları ayrı ayrı ölçülmüştür (bkz. Şekil 4.5). Ön yüzde bulunan D_{10} ve D_{11} isimli ve 100 mm genliğe sahip LVDT'ler ile betonarme çerçevenin, arka yüzde bulunan D_{12} ve D_{13} isimli ve 100 mm genliğe sahip LVDT'ler ile de dolgu duvarın kayma deformasyonlarını hesaplamak için ölçümler alınmıştır (Resim 4.10). LVDT'lerin deney sırasında sabitlendiği yerden oynayarak devre dışı kalmasını geciktirmek için bu cihazlar hasarların (ezilmeler, çatlaklar, vb.) erken başlaması muhtemel köşe noktalarına değil de biraz daha içeri bölgelere yerleştirilmiştir. Bu LVDT'lerin ölçüm alabilmesi için Resim 4.10'da görüldüğü gibi üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Öncelikle cihazların negatif harekette çalışabilmesi için lastikli bir ilave mekanizma hazırlanarak üzerlerine takılmıştır. Ardından geniş duvar köşegeni aralığında çalışabilmesi için esnemesi sıfıra yakın ve oldukça sağlam olan bir ip (örgü olta misinası) bağlanmıştır.

Resim 4.10. Kayma deformasyonu ölçümü alınan LVDT örnekleri

Deney elemanının test sırasında deformasyondan önceki ve sonraki durumları şematik olarak Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Aşağıda bu şemadan çıkartılan eşitliklerle D_{10} ve D_{11} adlı LVDT'lerden alınan ölçümlerin kullanılarak betonarme deney elemanına ait kayma deformasyonlarının nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. Benzer şekilde aynı eşitlikler D_{12} ve D_{13} ölçümlerine uyarlanarak dolgu duvarın da kayma deformasyonları hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Kayma deformasyonları

$$\alpha = arctg(\frac{a}{b}) \tag{4.3}$$

$$d_{10x} = -\frac{d_{10}}{\cos\alpha} \tag{4.4}$$

$$d_{11x} = \frac{d_{11}}{\cos\alpha} \tag{4.5}$$

$$d_x = \frac{d_{10x} + d_{11x}}{2} \tag{4.6}$$

$$\gamma_{10} = \frac{d_{10x}}{a} \tag{4.7}$$

$$\gamma_{11} = \frac{d_{11x}}{a} \tag{4.8}$$

$$\gamma = \gamma_{ort} = \frac{\gamma_{10} + \gamma_{11}}{2} \tag{4.9}$$

α, a, b : bkz. Şekil 4.6

d_{10x}, d_{11x} : D_{10} ve D_{11} ölçüm değerinin yataydaki iz düşümü

d_x : ortalama yatay kayma deformasyonu

γ_{10} , γ_{11} : D_{10} ve D_{11} ölçüm değerinden hesaplanan kayma açısı

γ : ortalama kayma açısı

D_{14} isimli ve 25 mm genlik kapasitesine sahip potansiyometre ile deney elemanında kolon alt uçlarının temel yüzeyine göre rölatif hareketi kontrol edilmiştir (bkz. Şekil 4.5) Bu ölçümün alınması, deneysel çalışmanın tasarı aşamasında düşünülmemiştir. Ancak deneysel sürecin son bölümlerinde temel-kolon arakesitinde rölatif ötelenme gözlenmiş ve Resim 4.11'deki potansiyometre takılarak bu bölgeden de ölçüm alınmıştır. Ölçüm verilerinin kolonlardaki dönmeden kaynaklanan hatalı değerleri olabildiğince en az içermesi için cihaz, temel-kolon arakesitine mümkün olan en yakın yere takılmıştır.

Resim 4.11.Temel-kolon arakesitinde rölatif ötelenme kontrolü

4.7.1. Net yatay ötelenmenin hesabı

Daha önce bahsedilen D_1 cihazı ile yatay kat ötelenmesi miktarı kiriş ucundan ölçülmüştür. Ancak bu noktadan alınan ölçümü etkileyen başka faktörler de vardır. Bunlardan en önemli olanları deney elemanının yatay yük etkisiyle rijit dönmesi ve ötelenmesi olarak gözükmektedir. Dolayısı ile net yatay deplasman değerinin, bu iki faktörden kaynaklanan ötelenme miktarlarının, toplam deplasman değerinden çıkarılmasıyla elde edilmesi planlanmıştır. Bilindiği gibi deney elemanın rijit dönmesi D_7 ve D_8 nolu ölçümlerle alınmıştır (bkz Şekil 4.5). Bütün deneyler için bu cihazların verileri incelendiğinde, net deplasmanın en fazla 0,2 mm olduğu anlaşılmıştır. Bu miktarın ihmal edilebilecek düzeyde olması sebebiyle rijit dönmeden kaynaklanan herhangi bir düzeltme yapılmamıştır. Sadece rijit ötelenmenin ölçüldüğü D_9 cihazının verileri D_1'den çıkarılarak net yatay ötelenme değerleri hesaplanmıştır (bkz Şekil 4.5).

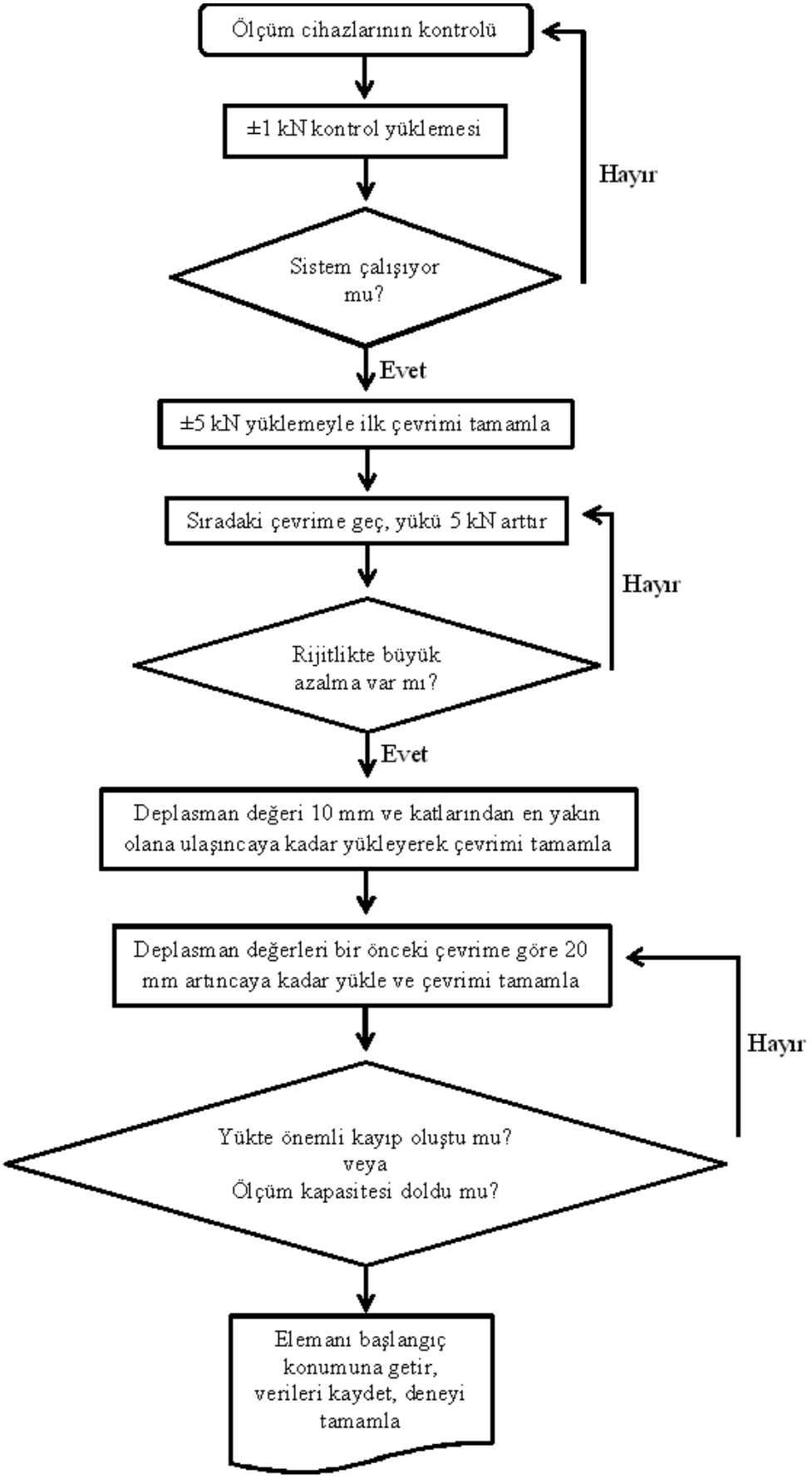
Bütün deneylerin verileri incelendiğinde D_9'un en fazla 2 mm olduğu görülmüştür. Rijit ötelenmelerin oldukça sınırlı düzeyde olması deney elemanını rijit platforma bağlamakta kullanılan sistemin başarılı olduğunu göstermiştir.

4.8. Deney Prosedürleri

Deney elemanları deprem yüklerini benzeştiren, yarı statik tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Bu doğrultuda bir yükleme programı tasarlanmış ve bütün deney elemanlarına şu şekilde uygulanmıştır. Öncelikle pozitif (+) ileri (itme) ve negatif (-) geri (çekme) yönünde deney elemanına 1 kN değerinde kontrol yüklemesi yapılmıştır. Ardından deney elemanına ileri yönde 5 kN ve geri yönde yine 5 kN yük verilerek birinci çevrim tamamlanmıştır. Sonrasında bu yük değerleri her çevrimde 5 kN arttırılmış ve rijitlikte büyük değişim gözlenince kadar yüklemeye bu şekilde (yük kontrollü) devam edilmiştir. Rijitlikte büyük değişim olduktan sonra deplasman faktörü de devreye sokulmuştur. Bu gelişme gözlendiği anda deplasman değeri 10 mm'nin katlarından en yakın olana ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir. Sonraki çevrimlerde ise eleman kararlı bir şekilde yük alıyorsa her seferinde bir önceki çevrime göre deplasman değeri 20 mm arttırılarak deneye devam edilmiştir. Deneyler dayanımda büyük kayıp ya da D_1 ölçüm cihazının kapasitesi (±100 mm) dolana kadar devam ettirilmiştir. Yükleme programının daha iyi anlaşılabilmesini sağlamak amacıyla akış şeması hazırlanmış ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Deney elemanına verilen yatay yük değerlerine karşılık, D_1 ve D_2 ölçüm cihazlarından okunan yatay ötelenme değerleri, deney sırasında grafiksel olarak bilgisayar ekranında çizdirilerek gelişmeler takip edilmiştir. Bütün ölçüm cihazlarından deneyde saniyede sekiz veri alınmıştır.

Her ölçüm cihazının deneyden önce kontrolleri, gerekiyorsa verifikasyonları yapılmıştır. Test sırasında oluşacak çatlakları daha rahat takip edebilmek amacıyla tüm deney elemanları beyaza boyanmıştır. Deney elemanına ait beton ve sıva örnekleri test edilerek basınç dayanımları belirlenmiştir. Yapılan her deneyin kamera ile video kaydı da alınmıştır.



Şekil 4.7. Yükleme programı akış şeması

Deney elemanlarının ön tarafı bkz. Resim 4.6 ve Şekil 4.5'de gözüken taraf olarak kabul edilmiş ve test esnasında oluşan gelişmeler bu bakış yönü referans alınarak ifade (sağ, sol, ön, arka) edilmiştir. Dolgu duvarın betonarme çerçeve ile temas eden yüzeyler için "iç", karşısında bulunan yüzeyler için ise "dış" tanımı kullanılmıştır. Anlatımı kolaylaştırmak için bir de deney elemanlarının sol kolon alt ucu dış köşesinde iki yönlü eksen takımı olduğu varsayılmış ve bu eksen takımının pozitif yönleri Resim 4.6'da gösterilmiştir. Ayrıca açısal ifadeler pozitif x-ekseni ile yapılan açı olarak tarif edilmiştir. Buna göre +x ekseninden başlayıp saatin ters yönüne doğru devam eden açılar pozitif, diğer yönde devam edenler ise negatif olarak kabul edilmiştir

Deney sırasında D_1 dışındaki herhangi bir ölçüm cihazı kapasite sınırına yaklaştıysa ya da hasar görebilecek duruma geldiyse devreden çıkartılarak deneye devam edilmiştir.

Deney esnasında, olası elektrik kesintisi veya şehir akımının voltajındaki dalgalanmalar nedeni ile meydana gelebilecek veri kayıplarını önlemek için veri toplama sistemleri ve bilgisayar, regülatörlü kesintisiz güç kaynağına (UPS) bağlanmıştır.

5. DENEYSEL SÜREÇ

Bu bölümde deney elemanları ayrıntılı olarak tanıtılarak, deneylerde yaşanan gelişmeler anlatılmıştır. Gerekli görülen durumlarda yorumlar da katılmıştır. Deney elemanlarının davranışı görsel olarak resimlerle de aktarılmaya çalışılmış, ek olarak yük-yatay ötelenme grafikleri de sunulmuştur. Bu grafikler yük hücresinden okunan yük değerlerine (kN) karşılık D_1'den okunan deplasman (mm) değerleriyle çizdirilmiştir. Deneylerin anlatımında kullanılan yön ve açı tarifleri Bölüm 4.8'de verilmiştir.

Deney programı tasarım sürecinde düşünülmeyip deney elemanlarının test sürecinde yaşanan gelişmeler sonucu kimi zaman zorunluluktan dolayı, kimi zaman ise davranışı biraz daha iyileştirmek adına ilave değişkenler konduğundan ve bunların da araştırma konusu içine girdiğinden daha önce bahsedilmişti (bkz. Çizelge 4.2). Bu kısımda ise bahsedilen gelişmelerin oluşumu, nedenleri ve yeni ilave edilen imalatların nasıl yapıldığı, ayrıntılı olarak süreç içerisindeki yeri geldikçe anlatılmıştır.

5.1. R1 Deneyi

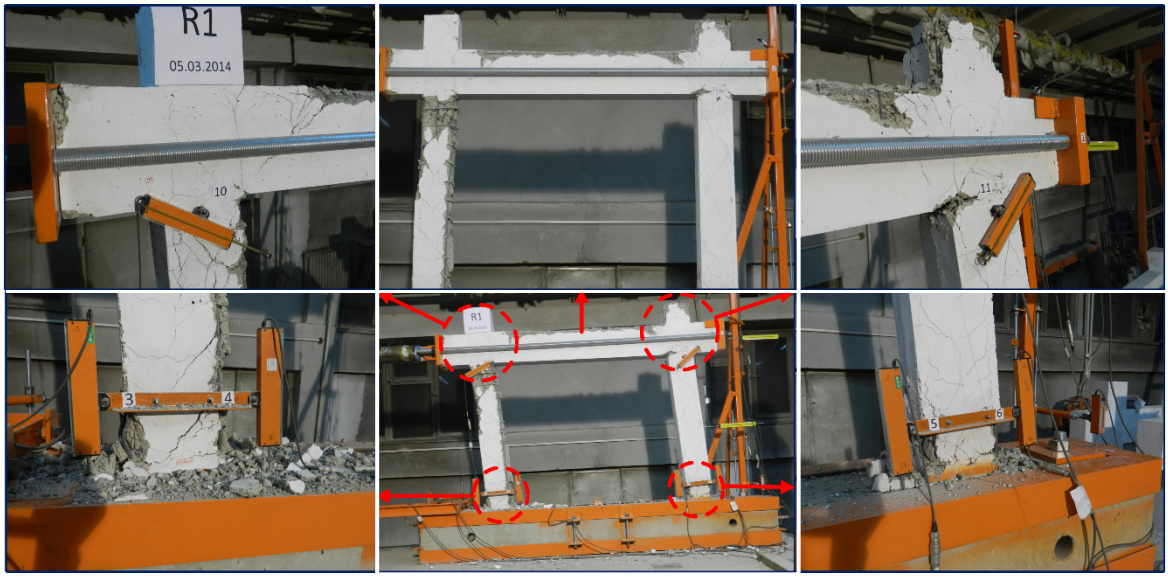
Sadece betonarme çerçeveden meydana gelen ve Resim 5.1'de gösterilen referans R1 elemanında, güçlendirme ihtiyacı duyulan betonarme yapıların tasarım ve yapım hataları yansıtılmaya çalışılmıştır. Bu sebeple, betonun basınç dayanımı çok düşük tutulmuş (10 MPa dolaylarında) ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırılması yapılmamıştır. Ayrıca, ½ geometrik ölçeğe göre hazırlanmış deney elemanlarındaki etriye aralıkları (100 mm), TS 500 (2000) tarafından öngörülen en büyük enine donatı aralığına (200 mm) karşılık gelmektedir [50]. Son olarak, kirişin (150×250 mm) düzlem içi eğilme rijitliği, kolonların (150×200 mm) düzlem içi eğilme rijitliklerinden daha yüksek tutulmuştur.

R1 elemanı, beklendiği gibi kolon uçlarında ortaya çıkan dört adet plastik mafsal sonucu göçmeye ulaşmıştır. Sağ ve sol kolonların alt ve üst uç bölgeleri ile kolon-kiriş ara kesitlerinde önemli çatlaklar ortaya çıkmıştır. Kolon uç bölgelerinde ortaya çıkan bu kesme çatlaklarına ek olarak, beton dayanımının da düşük olması sebebiyle kiriş alt ve üst yüzleri ile kolon yüzlerinde aderans çatlakları oluşmuştur. Kolon uçlarında yer alan mafsallaşma bölgelerinde beton ezilmiş ve boyuna donatılar burkulmuştur (Resim 5.2).

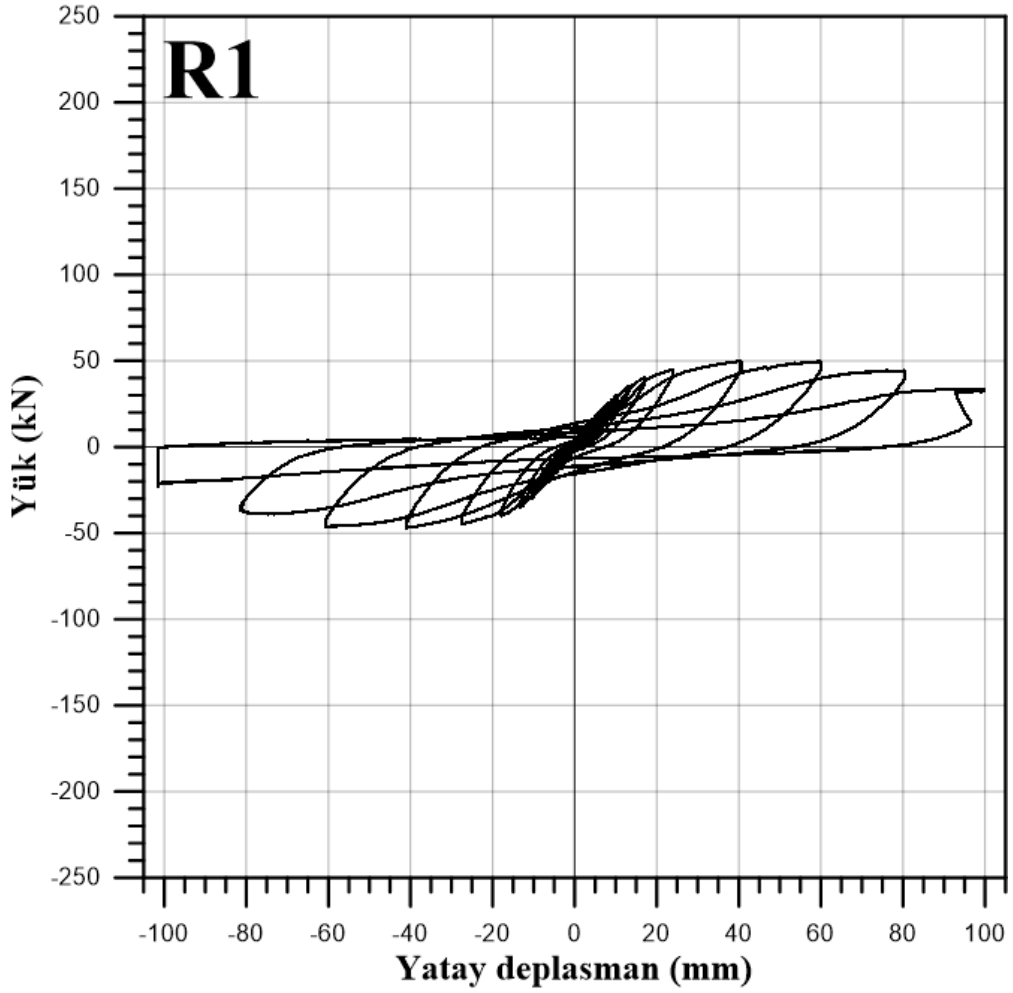
R1 elemanının yük-deplasman grafiği ise Şekil 5.1'de verilmiştir. Deney elemanı ileri yönde maksimum 50 kN, geri yönde ise maksimum 47 kN dayanıma ulaşabilmiştir. Yaklaşık %6'lık bir yatay ötelenme oranından sonra dayanımda önemli kayıplar (%15) olmaya başlamıştır.

R1 elemanının davranışı Bölüm 7'de de ayrıntı olarak incelenmiş ve ek olarak üzerinde analitik çalışmalar da yapılmıştır.

Resim 5.1. R1 deney elemanı



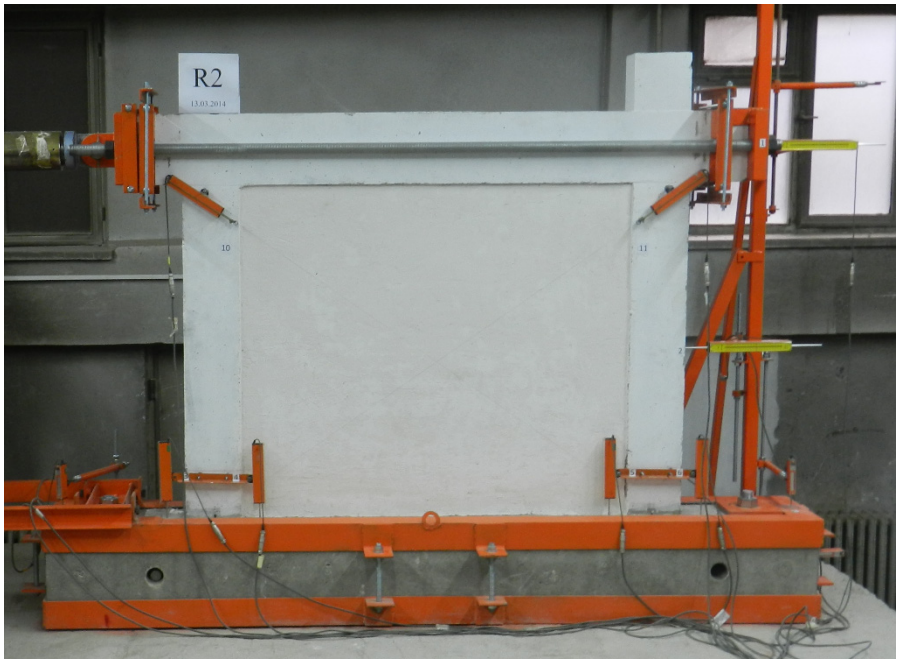
Resim 5.2. R1 deney elemanı göçme modu



Şekil 5.1. R1 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.2. R2 Deneyi

R1 deney elemanı ile aynı kesit ve donatı detaylarına sahip bir betonarme çerçeve içerisine tuğla duvar örülüp sıva yapılması ile Resim 5.3'de gösterilen ikinci referans elemanı R2 oluşturulmuştur. Hatırlanacağı gibi R1 deneyinde, yatay yükün verildiği temsili kiriş uçlarında, beton dayanımının düşük, etriye sargılamasının yetersiz olmasından dolayı ezilmeler, ufalanmamalar ve dökülmeler meydana gelmişti. Yükleme sisteminde sorun oluşturabilecek bu durumun engellenmesi veya sınırlandırılabilmesi açısından bu temsili konstrüktif kiriş parçaları çelik profiller ve ard germeli gijonlarla sargılanarak takviye edilmiştir. Sonraki iki deney elemanı betonu hali hazırda dökülmüş olduğu için söz konusu teknik, deneylerinden önce sıradaki iki elemana da uygulanmıştır (Resim 5.3).

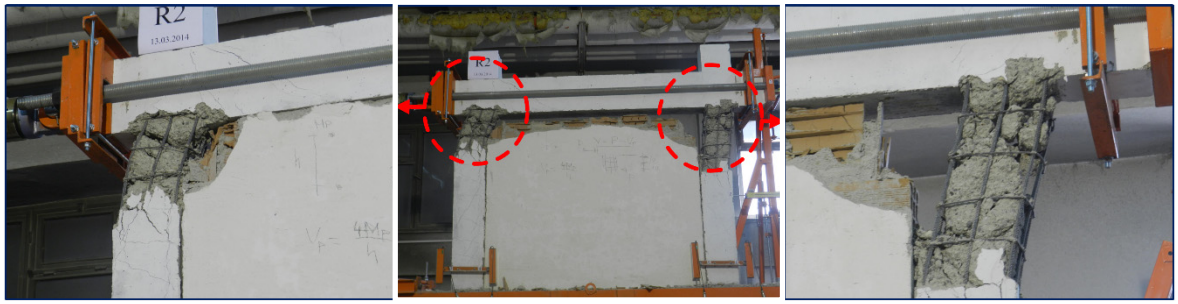


Resim 5.3. R2 deney elemanı

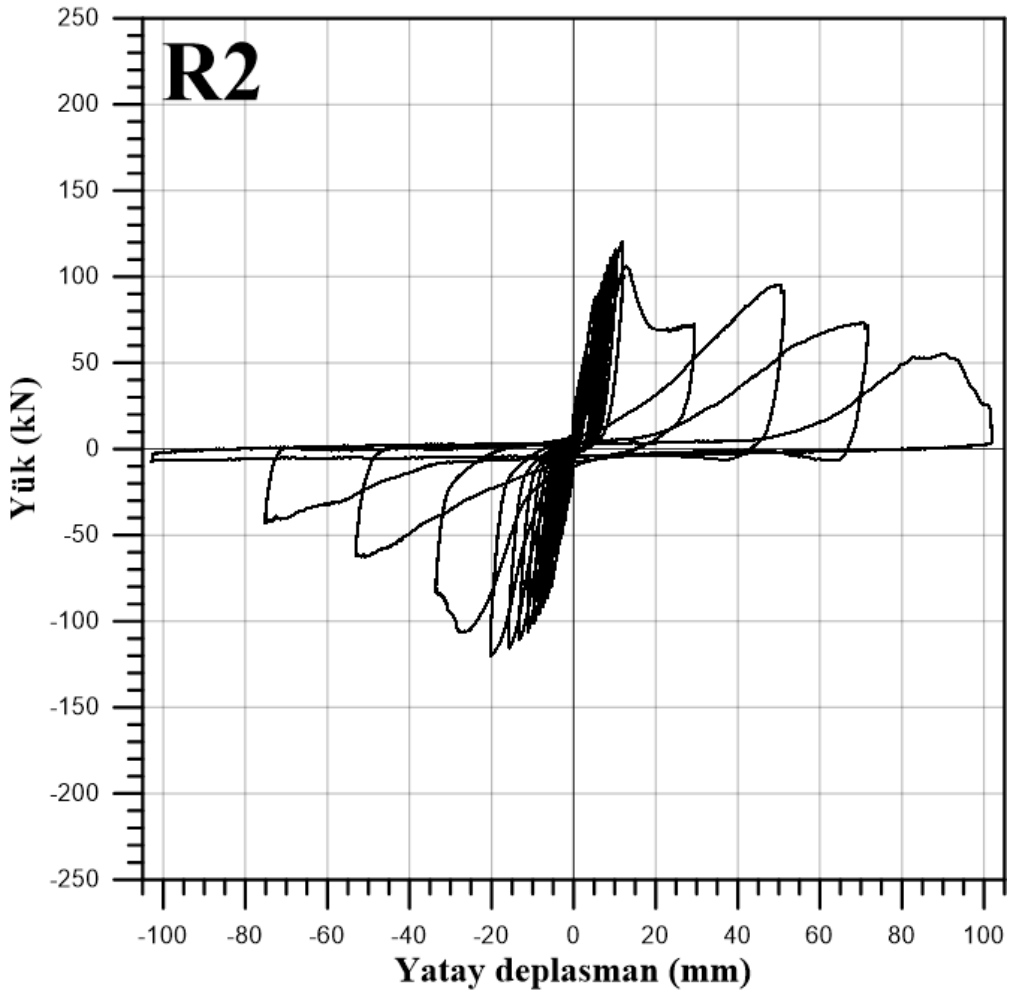
R2 deneyinde önce kolonun alt ve üst uçlarında daha yoğun olmak üzere kolon boyunca çatlaklar oluşmuştur. Sonrasında birleşimlerine yakın bölgelerde tuğla duvarın köşeleri kısmen de olsa ezilmiş, dolgu duvar ve betonarme çerçeve ara kesitinde ayrışmalar gözlenmiştir. Buna rağmen duvar köşegen doğrultusunda düğüme ve kolonların üst uçlarına önemli sayılabilecek ölçüde yük iletmiş ve buna bağlı olarak kolon üst uçlarında ağır hasarlar oluşmuştur. Kolon hasarları genellikle duvarda ezilmelerin bittiği nokta ile duvar ezilmelerinin en çok olduğu kolon üst ucu arasında gerçekleşmiştir. Bu bölgeye duvar tarafından iletilen yüklerin etkisi ile zaten beton dayanımı düşük ve etriyesi seyrek olan kolonlarda tipik kesme kırılması gerçekleşmiştir. Deney elemanının kolonları, yük aktarımının yüksek olduğu bu bölgede adeta bir kısa kolon davranışı sergilemiştir (Resim 5.4). Tuğla duvardaki dökülmelerden sonra tuğla duvar ile kolonlar arasındaki temas yüzeyinin kolon serbest yüksekliğinin % 40'ı civarında olduğu görülmüştür. Bu aşamadan sonra kolonlar yatay yük taşıyamadığından, kiriş üzerine oturduğu duvarın üstünde neredeyse serbestçe kayarak hareket etmiştir. Kolonlardaki bu kısa kolon davranışı, kolonların üst kısmında oldukça tehlikeli kesme çatlaklarının, beton ezilmelerinin ve aderans kayıplarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu da duvarın çerçeve davranışına olan katkısının sınırlı düzeyde kalmasını sağlamıştır. Oldukça rijit bir temele bağlı olan kolon alt uçlarında ise, temel rijitliğine ve duvarla temel arasındaki etkili sürtünme kuvvetlerine bağlı olarak önemli bir hasar gözlenmemiştir. R2 elemanının yük-deplasman

grafiği ise Şekil 5.2'de verilmiştir. Deney elemanı ileri ve geri yönde birbirine eşit ve maksimum 120 kN dayanıma ulaşılabilmiştir. Yaklaşık %1,8'lik bir yatay ötelenme oranından sonra dayanımda önemli kayıplar olmaya başlamıştır.

R2 elemanının davranışı Bölüm 7'de de ayrıntı olarak incelenmiş ve ek olarak üzerinde analitik çalışmalar da yapılmıştır.



Resim 5.4. R2 deney elemanı göçme modu

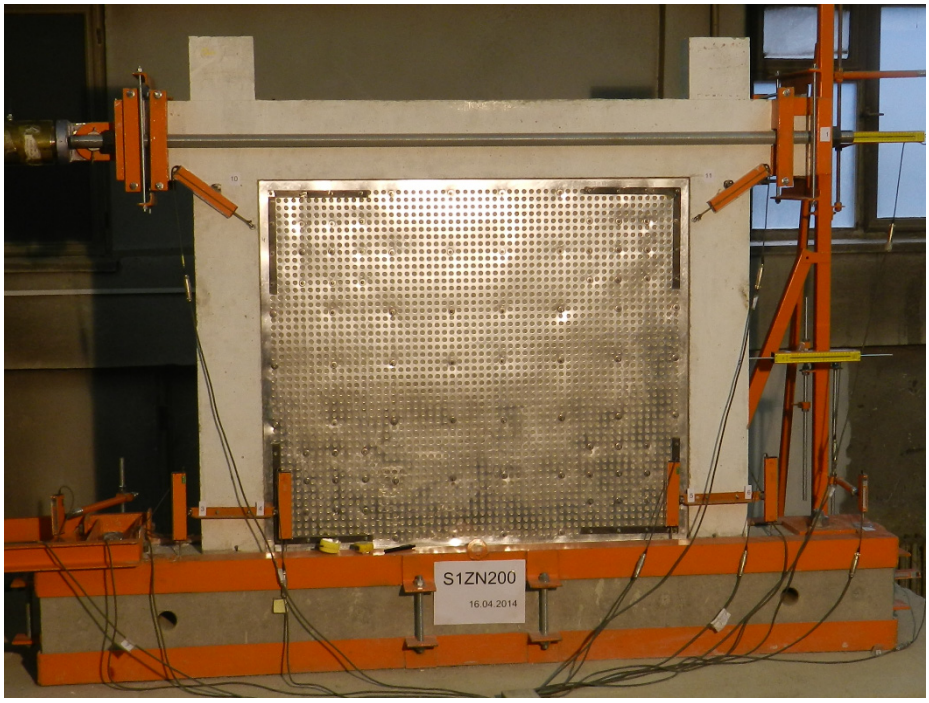


Şekil 5.2. R2 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.3. S1ZN200 Deneyi

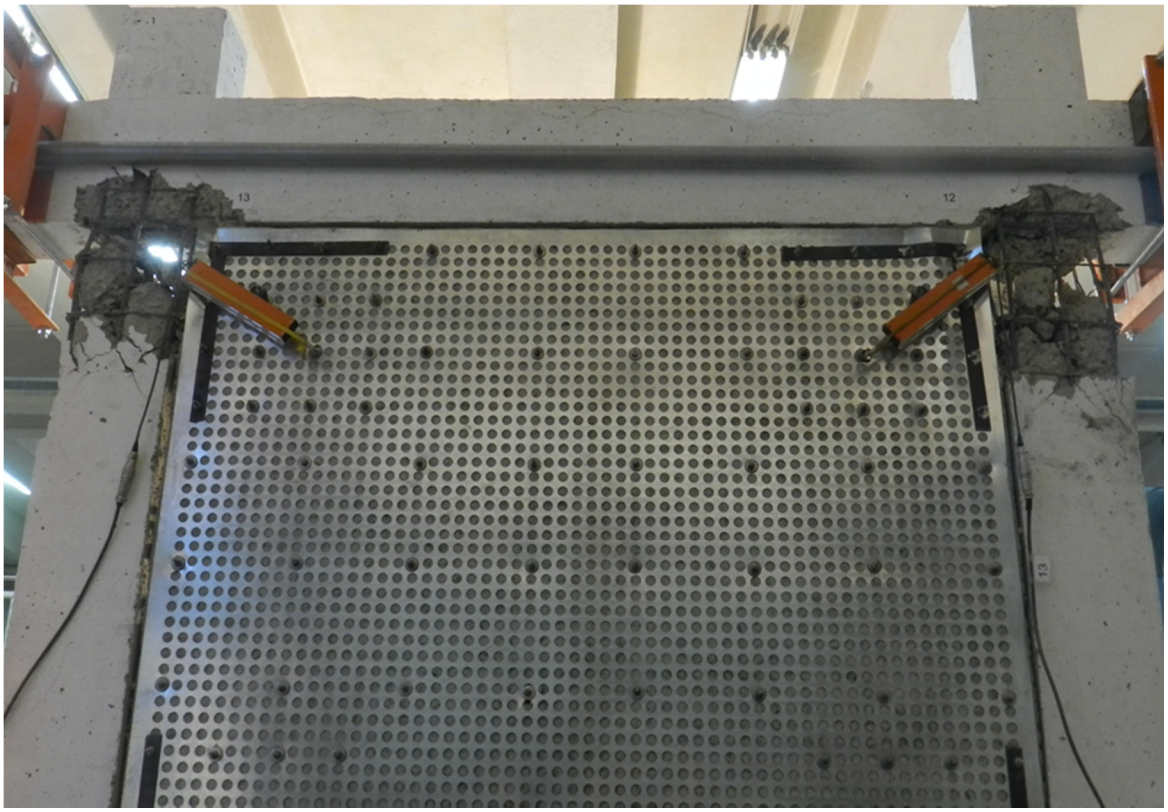
Delikli çelik levha kalınlığı : 1 mm
Bulon aralığı : 200 mm
Kolonlara bağlantı : Yok

Bu elemanda betonarme çerçeve içerisindeki duvarın her iki yüzüne 1 mm kalınlığında delikli çelik levha eklenmiş ve bu levhalar birbirlerine her iki yönde 200 mm aralıklı "M6" bulonları ile karşılıklı olarak bağlanmıştır. Delikli levhalarla güçlendirme yöntemi gereğince bütün takviyeli elemanlarda olduğu gibi bu elemanda da yüksek gerilmelerin oluştuğu duvar köşelerindeki 300×300 mm'lik bölgelerde bulon aralığı 100 mm'ye düşürülmüştür. Ayrıca bu bölgede olabilecek duvar ezilmelerini geciktirmek amacıyla kenar bulonların altında "L" şeklinde 25×3 mm kesitli çelik lamalar kullanılmıştır (Resim 5.5). Bu deney elemanında da temsili konstrüktif kiriş parçaları Bölüm 5.1'de anlatılan nedenden ötürü çelik profiller ve ard germeli gijonlarla sargılanarak takviye edilmiştir.



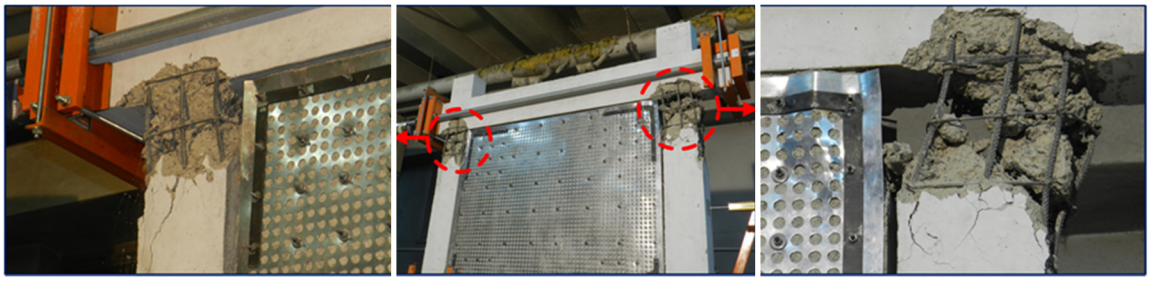
Resim 5.5. S1ZN200 deney elemanı

Deney başlangıcında kolonlarda eğilme çatlakları, düğüm bölgelerinde ise kesme çatlakları oluşmuştur. Deneyin ilerleyen bölümlerinde ise kolonların üst kısımlarında gözlenen bu kesme çatlakları artarak ve ilerleyerek eleman davranışını kontrol etmeye başlamıştır. Duvarda, sadece köşe bölgelerde hafif ezilmeler olmasına rağmen, kolonların üst uçlarında ağır kesme hasarlarının ortaya çıkması (Resim 5.6, 5.7), elemanın yük kapasitesinin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Kolon üst uçlarında ortaya çıkan hasarın etkisiyle kolon boyuna donatıları pandül gibi davranmaya başlamış ve kiriş bu donatıların üstünde ileri geri hareket etmeye başlamıştır. Deney sonuna kadar duvar, kiriş ve kolon alt uçlarında önemli bir hasar gözlenmemiştir. Bu elemanın güçlendirilmiş duvarındaki hasarlar yok denecek kadar sınırlı kalmış ancak bunun dışındaki davranış R2 referans elemanı ile oldukça benzer gelişmiştir. *Bu deneyden sonra çerçeve güçlendirmesinde sadece duvar güçlendirmesinin yeterli olmayacağı sonucuna varılmış, beton dayanımı düşük ve etriyesi seyrek olan kolonların da güçlendirmesine karar verilmiştir.* S1ZN200 elemanının yük-yatay deplasman grafiği ise Şekil 5.3'de verilmiştir.

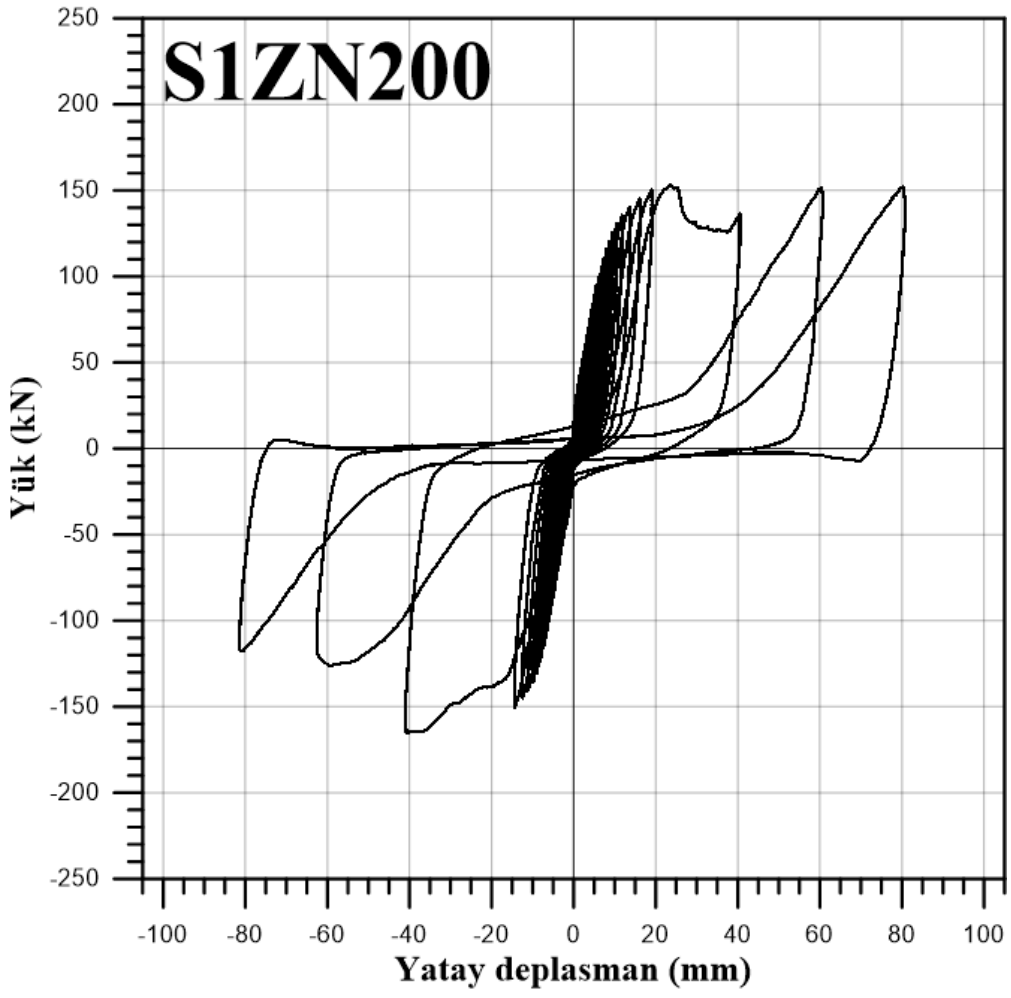


Resim 5.6. S1ZN200 deney elemanı göçme modu (arka yüz)

Deney elemanı ileri yönde 153 kN, geri yönde ise 165 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ötelenme oranlarına bakıldığında ise ileri yönde yaklaşık %3'ten, geride ise %4'ten sonra dayanımda kayıplar olmaya başlamıştır.



Resim 5.7. S1ZN200 deney elemanı göçme modu (ön yüz)



Şekil 5.3. S1ZN200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.4. S1ZN150 Deneyi

5.4.1. Materyal ve yöntem ilavesi

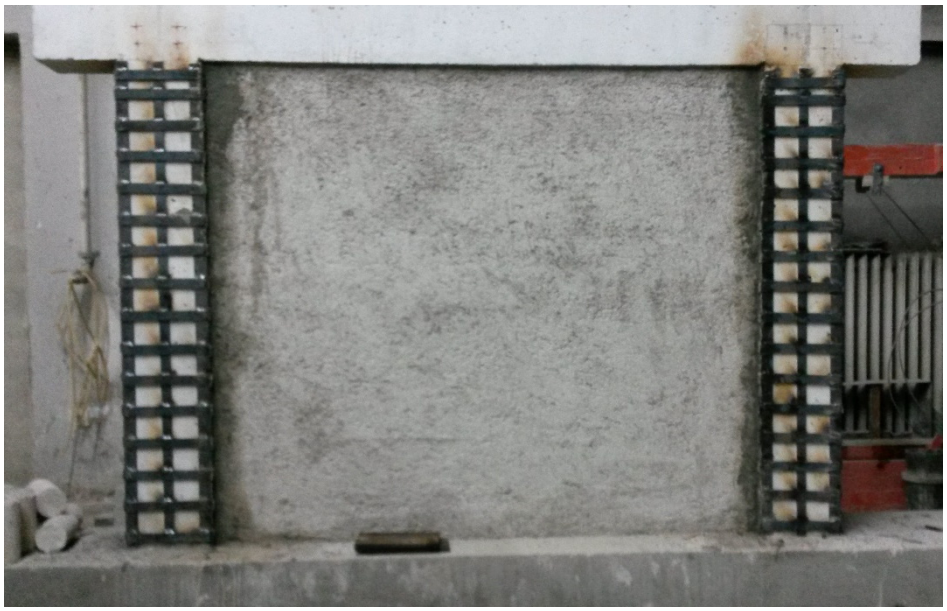
Yapılan S1ZN200 deneyi, duvar güçlendirme işleminin başarılı olabilmesi için kolonlarda ortaya çıkabilecek kesme kırılmasının önlenmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Hatırlanacağı gibi S1ZN200 elemanı, her iki kolon üst uçlarında ortaya çıkan ağır kesme hasarının etkisiyle kısa kolon davranışı göstermiştir. Güçlendirilmiş duvarlarda köşelerde çok sınırlı ezilmeler haricinde neredeyse hiç hasar ortaya çıkmamış ve eleman beklenen kapasitesine ulaşamadan kesmeden göçmüştür. Bundan sonra yapılacak olan delikli levhalarla takviye edilmiş elemanların deneylerinde, duvar güçlendirilmesinin etkisinin anlaşılabilmesi ve kolonlardaki kesme kırılmasının önlenmesi amacıyla çalışma başlangıcında düşünülmemiş olan aşağıdaki güçlendirme işlemlerine başvurulmuştur:

a) Köşebentler ve lamalardan oluşturulan çelik kafes yardımıyla kolonların mantolanması

Öncelikle kolonların kenarları pahlanmıştır. Kolonların dört köşesine kolon yüksekliği boyunca uzanan L30.30.3 köşebentler yerleştirilmiştir. Daha sonra etkin bir sargılamanın sağlanması için kolonun serbest olan üç yüzünün ortalarına yine boyuna yönde 25×3 mm kesitindeki lamalar eklenmiştir. Son olarak köşelerdeki köşebentler dört yüzden birbirine 75 mm aralığındaki (eksenden eksene) lamalar (25×3 mm) ile enine yönde kaynaklanarak bağlanmıştır (Resim 5.8, Şekil 5.4).

Resim 5.8. Kolonların mantolanması

Mantolama işlemi sırasında duvarda ortaya çıkan boşluklar ve kolon etrafında yer alan çelik lamaların kolonla temas etmeyen kısımları çimento esaslı seramik yapıştırıcı ile doldurularak Resim 5.9'da gösterildiği gibi mantolama işlemi tamamlanmıştır.



Resim 5.9. Boşlukların seramik yapıştırıcı ile doldurulması

Kolon etrafında oluşturulan manto, kolonda oluşturacağı sargılama etkisi ve sağlayacağı ilave kesme dayanımıyla kolonlarda ortaya çıkan kesme kırılmasını önleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Mantolama sadece kesme kuvvetine karşı tasarlanmıştır. Ancak mevcut çelik manto çok küçük ilavelerle kesme kuvvetinin yanında eksenel yük de taşıyacak hale getirilebilir.

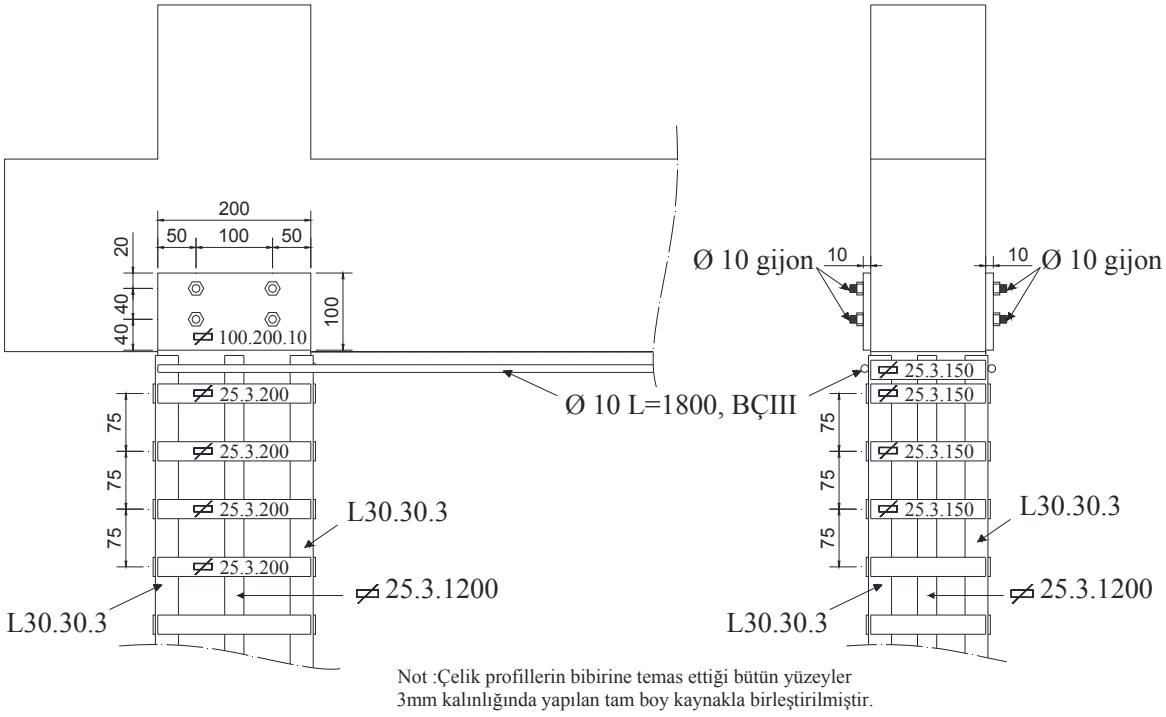
b) Kolon-kiriş birleşimlerinin baskılanması

S1ZN200 deneyinde kolon-kiriş birleşimlerinin özellikle kolona yakın kısımlarında büyük hasarlar meydana gelmiş (bkz. Resim 5.7) ve eleman davranışı bu hasarlardan önemli derecede etkilenmişti. Üç boyutlu çerçevelerden meydana gelen gerçek yapısal sistemlerde düzlemsel elemanların yanı sıra kolon-kiriş birleşim bölgelerinde düzlem dışı kirişler de yer almaktadır. Düzlem dışı kirişlerin varlığı birleşim bölgelerinde rijitliği arttırarak oluşacak hasarların daha sınırlı düzeylerde kalmasını sağlamaktadır.

Düzlem dışı kirişlerin yapacağı bu kuşaklama etkisini az da olsa benzeştirmek amacıyla, kolon-kiriş birleşimlerinin her iki yüzüne 200×100 mm kesitli ve 10 mm kalınlığında birer çelik levha yerleştirilmiş ve iki yüzdeki levhalar birbirlerine 4 adet 10 mm çaplı bulon yardımıyla bağlanmıştır. Somunların bir miktar sıkılmasıyla beraber düğüm bölgesinin baskılanması sağlanmıştır (Resim 5.10, Şekil 5.4).

c) Kolonların birbirlerine bağlanması

Duvardan kolon üst ucuna köşegen doğrultusunda aktarılan yükün bir kısmının diğer kolona da aktarılabilmesi amacıyla her iki kolon üst uçtan ve her iki yüzden birbirine 10 mm çaplı S420 kalitesinde boyuna donatılar ile kaynaklanarak bağlanmıştır (Resim 5.10, Şekil 5.4).



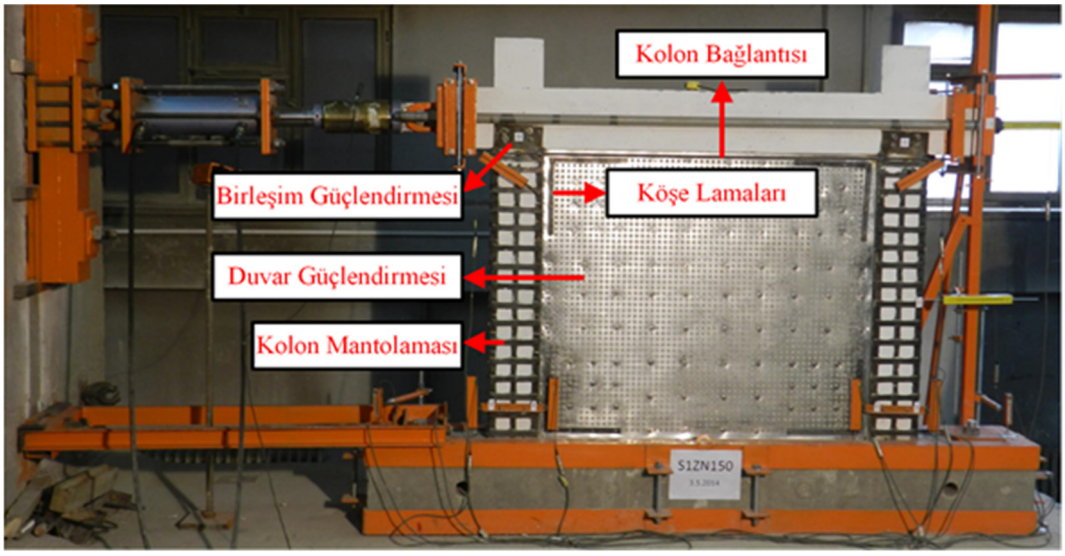
Şekil 5.4. Kolon ve birleşim bölgesi güçlendirme detayları

Resim 5.10. Birleşim bölgesi baskılanması ve kolonları bağlayan çubuk

5.4.2. S1ZN150 deneyi sonuçları

Delikli çelik levha kalınlığı : 1 mm
Bulon aralığı : 150 mm
Kolonlara bağlantı : Yok

S1ZN200 elemanında göçmenin, tamamen kolonlarda ortaya çıkan ağır kesme hasarı sebebiyle olması, dolgu duvarda yapılan güçlendirme işleminin çerçeve davranışı üzerindeki etkisinin anlaşılamamasına neden olmuştur. Bundan dolayı deney elemanına Bölüm 5.4.1'de anlatılan takviyeler yapılmıştır. Deneye hazır hale getirilmiş S1ZN150 elemanı ilave edilen materyal ve yöntemleriyle beraber Resim 5.11'de gösterilmiştir.



Resim 5.11. S1ZN150 deney elemanı

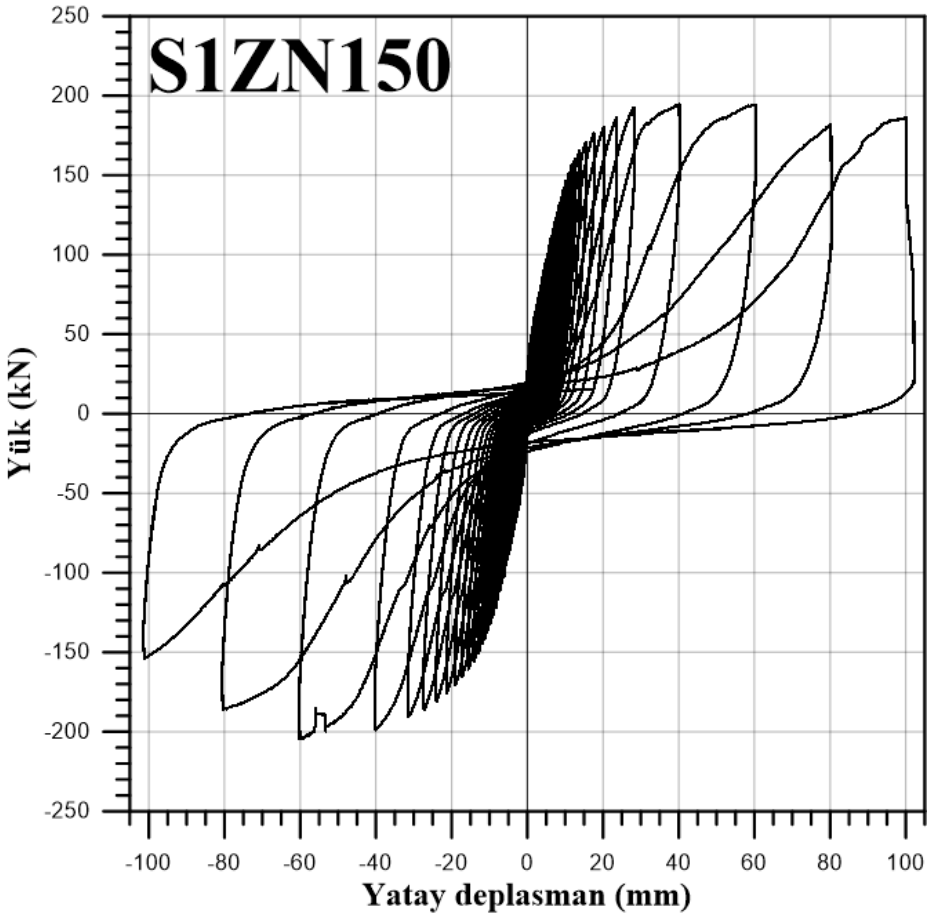
Bu elemanın kolon uçlarında toplam dört adet plastik mafsal oluşmuştur. Kiriş uç bölgelerinde eğilme hasarı, kiriş üst kısmında ise aderans çatlakları meydana gelmiştir. Eleman, taşıma gücüne ulaştıktan sonra dayanımda önemli bir kayıp olmadan büyük deformasyonlar yapabilmiştir. % 7,5 ötelenme oranlarında bile güçlendirilmiş duvardaki hasarların sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür. Duvar köşelerinde kullanılan lamaların, köşelerdeki hasarların sınırlı kalmasında etkili olduğu gözlenmiştir. Duvarla kolonlar arasında ayrışmalar oluşmuş ve bu ayrışmanın kolon uçlarına yakın bölgelerde yataydaki açıklığı 50 mm'ye çıkmıştır. Duvara uygulanan güçlendirme yönteminin etkisiyle delikli levhalarda buruşmalar olmasına rağmen duvar deney sonuna kadar bütünlüğünü korumayı başarmış ve dağılmamıştır. İlerleyen deney aşamalarında kolonun temelle birleşen alt ucunda dış yüze yakın donatıların bazıları kopmuş ve deney sonlandırılmıştır (Resim 5.12).

Bu eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 194 kN, geri yönde ise 204 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri yönde %7,5, geri yönde ise %6,6'dan büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.5). Bu ötelenme oranlarından sonra meydana gelen dayanımdaki düşüşün sebebi kolonun temelle birleşen alt ucundaki donatıların bazılarında meydana gelen kopmalar olmuştur.

Deney esnasında kirişin üst yüzünde ileri derecede aderans çözülmelerinin oluştuğundan bahsedilmişti. Ancak gerçek bir yapıda kirişlere etkiyen duvar yükü ve kirişin üst kısmını destekleyen oldukça rijit bir tabliye de kuvvetle muhtemel bulunacaktır. Bu sebepten dolayı bahsedilen hasarın endişe verici olmadığı düşünülmektedir.

Bu deneyde uygulanan yeni yöntem ve materyal ilavesi (bkz. Bölüm 5.4.1) sistem davranışını oldukça olumlu yönde etkilemiştir. Ortaya çıkan olumlu gelişmeyle beraber bundan sonraki bütün güçlendirme elemanlarında bulunan betonarme çerçevelerin benzer şekilde takviye edilmesine karar verilmiştir.

Resim 5.12. S1ZN150 deney elemanı göçme modu

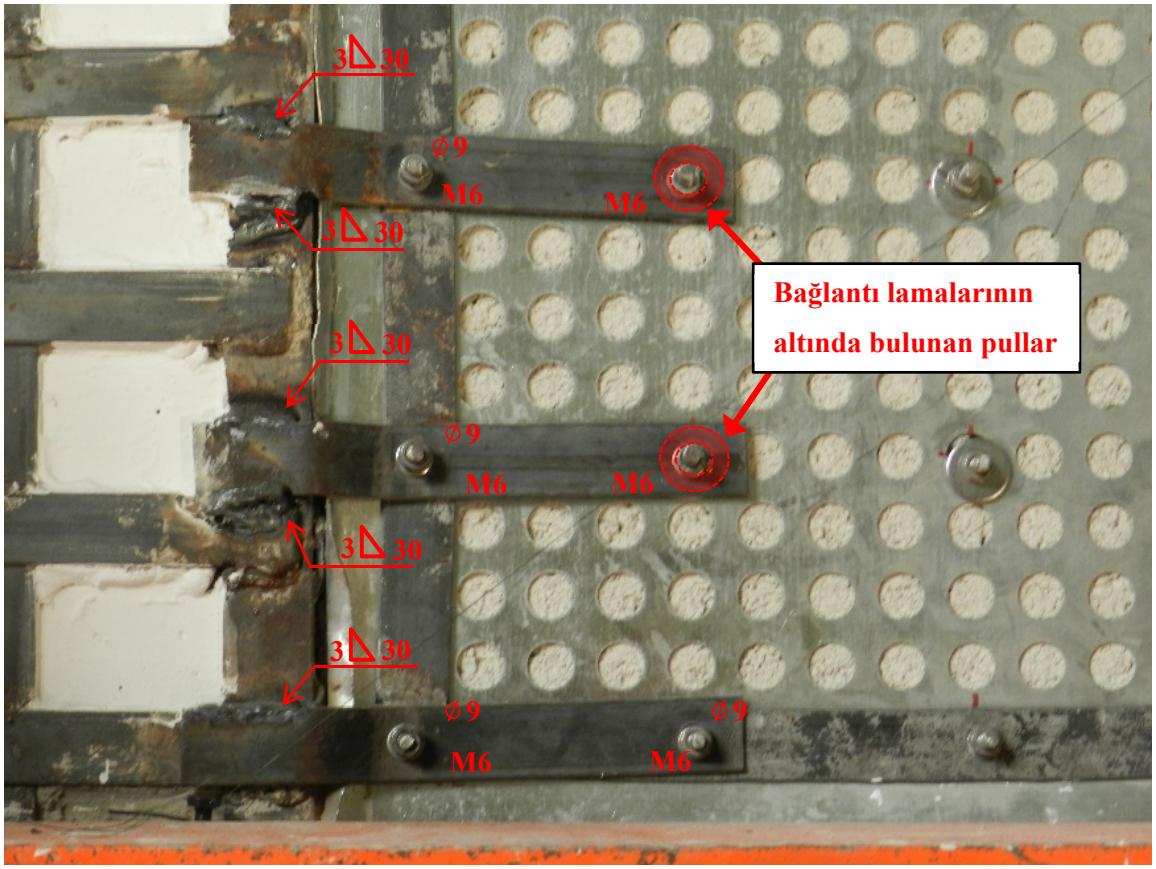


Şekil 5.5. S1ZN150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.5. S1ZY200 Deneyi

5.5.1. Güçlendirilmiş duvarı kolonlara bağlama yöntemi

Güçlendirilmiş duvar, kolonlara 25×3 mm kesitli lamalarla tutturulmuştur. Bu lamalar duvar üzerindeki kolon kenarlarına en yakın mevcut iki bulona bağlandıktan sonra lamaların boşta kalan ucu, kolonlarda kesmeye karşı önlem olarak yapılmış olan çelik mantonun köşebentleri üzerine alttan ve üstten 30 mm boyunca kaynaklanmıştır (Resim 5.13). Uygulama duvarın her iki yüzünde ve her bulon sırasında yapılmıştır.



Resim 5.13. Güçlendirilmiş duvarın kolonlara bağlanması

Bu şekilde uygulanan teknikle, kolonların kesmeye karşı güçlendirilmesi için yapılmış olan hazır çelik mantodan istifade edilmesi sağlanarak, pratik bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Her bir bağlama laması iki adet bulona tutturulmuştur. Bunun sebebi betonarme çerçeveden duvara lamalar boyunca aktarılacak büyük çekme kuvvetlerinin, bulon başına yarısı kadar bir kesme kuvveti oluşturmasını sağlamaktır.

Yapılan tasarımda 25×3 mm kesitli lamalarda delikler 9 mm çapında açılmıştır. Mevcut bulonlar 6 mm çapında (M6) olduğu için aralarında oluşan 3 mm tolerans sayesinde, bağlantı lamalarının yerine montajı zahmetsizce yapılabilmiştir. Delik çapı olan 9 mm aynı zamanda St 37 kalitesindeki çelik lamanın (25×3 mm) kopmasını ön gören yükle St 37 kalitesindeki bulonların (M6) kesilmesini ön gören yükün teorik hesapta yaklaşık eşit çıkmasını sağlamaktadır.

Betonarme çerçevenin kolonlarına en yakın bulonlara takılan somunların dışa doğru sıyrılmasını önlemek için bu bulonlara ikişer adet somun takılmıştır (Resim 5.13).

Duvar köşelerinde "L" şeklinde ezilmeyi geciktirici çelik takviyeler bulunmasından dolayı duvarda 3 mm yüksekliğinde çıkıntı oluşmakta ve bu bölgedeki bağlantı lamaları duvar düzlemine tam oturmamaktadır. Bu durumda bağlantı lamasının arkasında oluşan 3mm yükseklik farkı, buraya M6 bulonlarla beraber takılan eşit kalınlıktaki pullarlarla eşitlenmiştir (Resim 5.13).

5.5.2. S1ZY200 deneyi sonuçları

Delikli çelik levha kalınlığı	: 1 mm
Bulon aralığı	: 200 mm
Kolonlara bağlantı	: Var

Bu eleman, çerçeve içerisindeki duvarın her iki yüzüne 1 mm kalınlığında delikli çelik levha eklenmesi ve bu levhaların birbirlerine karşılıklı olarak duvara orta bölgede 200 mm aralıklı olarak "M6" bulonları yardımıyla bağlanmasıyla elde edilmiştir. Güçlendirilmiş duvar daha sonra kolonlara Bölüm 5.1.1'de anlatılan yöntemle bağlanmıştır (Resim 5.14).

Hatırlanacağı gibi R1 deneyinde yatay yükün verildiği temsili kiriş uçlarında beton dayanımının düşük, etriye sargılamasının yetersiz olmasından dolayı ezilmeler, ufalanmamalar oluşmuş; yükleme sisteminde sorun oluşturabilecek bu olumsuz durumun sınırlandırılabilmesi için bu temsili konstrüktif kiriş parçaları çelik profiller ve ard germeli gijonlarla sargılanarak R2, S1ZN200, S1ZN150 elemanlarında takviye edilmiştir. Bu işe yarayan ancak teferruatlı işlem yerine bu elemanla birlikte yeni üretilen tüm elemanların bu konstrüktif kirişlerinde etriye kalınlığı 8 mm'ye çıkarılmıştır.

Resim 5.14. S1ZY200 deney elemanı

Bu elemanda, kolon uçlarında plastik mafsallar, kiriş uç bölgelerinde eğilme hasarı ve kiriş üst kısmında aderans çatlakları meydana gelmiştir (Resim 5.15). Dolgu duvarın maruz kaldığı önemli diyagonal basınç kuvvetlerinin etkisiyle delikli çelik levhalarda buruşmalar ve dolgu duvarda çatlaklar meydana gelmiş, ancak ileri deformasyon düzeylerinde dahi bu levhalar duvarın dağılmasını engelleyerek eleman bütünlüğünün devam etmesini sağlamıştır. Duvar-kolon bağlantıları etkin bir şekilde çalışmış, duvarla kolon arasındaki ayrışmanın deney boyunca çok sınırlı düzeylerde (maksimum 3-4 mm) kalmasını sağlamıştır. S1ZY200 elemanında duvar-kolon teması deney boyunca hiçbir zaman tam olarak yitirilmemiştir. Duvar köşelerinde kullanılan lamalar, köşelerdeki hasarların sınırlı düzeylerde kalmasında etkili olmuştur. İlerleyen deney aşamalarında köşelerdeki bulonların bazıları kesilerek kopmaya başlamıştır. Kolonun temelle birleşen alt ucundaki donatılarda kopmalar meydana gelince deney sonlandırılmıştır (Resim 5.15).

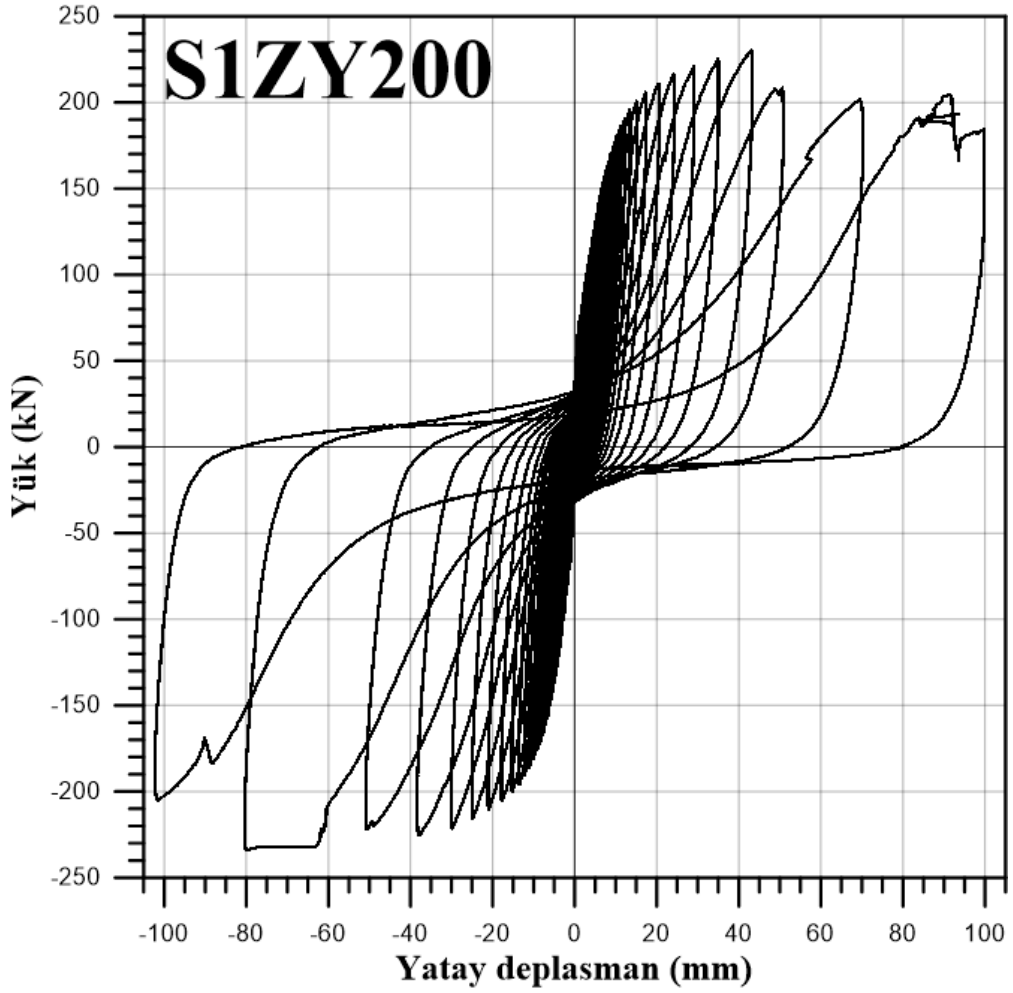
Gerçek bir yapıda kirişlere etkiyen duvar yükü ve kirişin üst kısmını destekleyen oldukça rijit bir tabliye de kuvvetle muhtemel bulunacaktır. Bu sebepten dolayı kiriş üst kısmında oluşan aderans çatlaklarının endişe verici olmadığı düşünülmektedir (Resim 5.15).

Bu eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 230 kN, geri yönde ise 234 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri yönde %7,2, geri yönde ise %7,5'den büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.6). Bu ötelenme oranlarından sonra meydana gelen dayanımdaki düşüşün sebebi kolonun temelle birleşen alt ucundaki donatıların bazılarında meydana gelen kopmalar olmuştur.

Resim 5.15. S1ZY200 deney elemanı göçme modu

Deneyden sonra delikli levhalar çıkarılarak dolgu duvarın hasar durumuna bakılmıştır. Resim 5.16'ya bakıldığında delikli levhaların oldukça iyi bir sargılama yaparak, ağır hasar almış tuğla duvarın dağılmasını engellediği böylece yük taşımaya devam etmesini sağladığı anlaşılmaktadır.

Resim 5.16. S1ZY200'de tuğla duvar hasar durumu

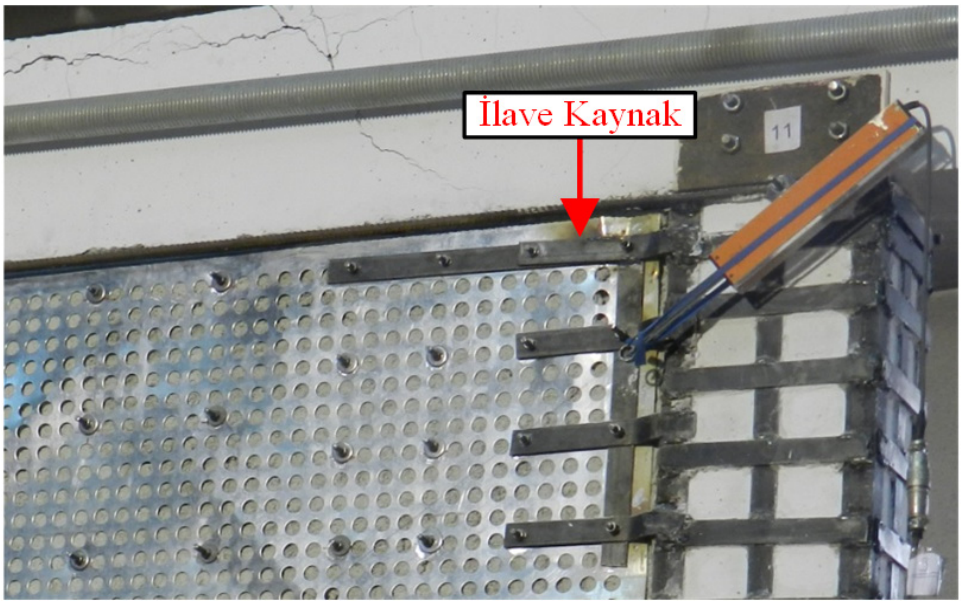


Şekil 5.6. S1ZY200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

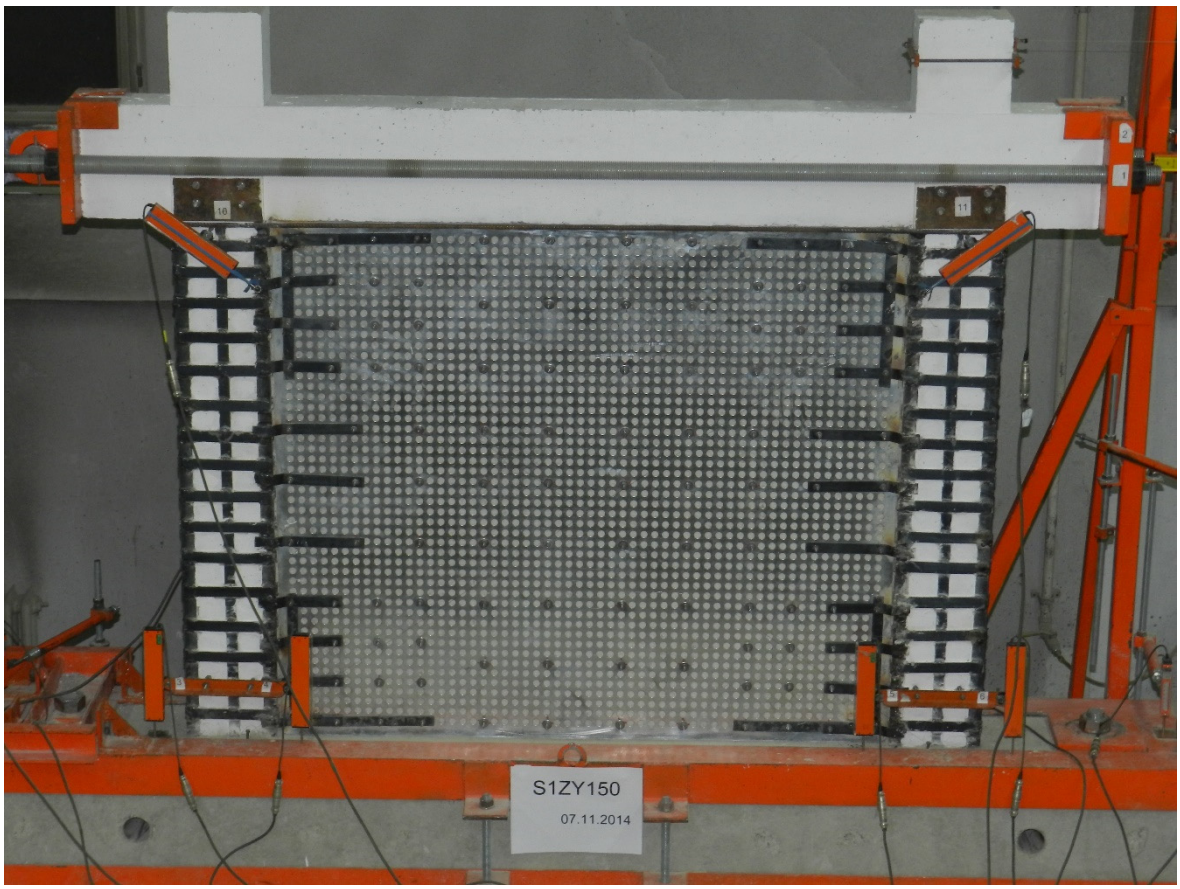
5.6. S1ZY150 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı : 1 mm
Bulon aralığı : 150 mm
Kolonlara bağlantı : Var

Bu elemanın duvar orta bölgesindeki bulon aralığı 150 mm olup diğer bütün özellikleri S1ZY200 elemanı ile aynıdır. S1ZY200 elemanında duvar köşelerindeki bulonların kesme kuvvetlerinin etkisi altında koptuğu görüldüğünden, S1ZY150 elemanında bu bulonlar için ilave bir önlem alınmıştır. Duvar-kolon bağlantı lamalarından en uçta yer alanlar, duvar köşe bölgelerinde yer alan "L" şeklindeki lamalara kaynaklanarak (Resim 5.17), bu sıra boyunca yer alan 4 bulonun beraber çalışması sağlanmıştır. Deneye hazır hale getirilmiş S1ZY150 elemanı Resim 5.18'de gösterilmiştir.



Resim 5.17. Kolon-duvar bağlantı levhalarıyla köşe lamaları arasındaki kaynak



Resim 5.18. S1ZY150 deney elemanı

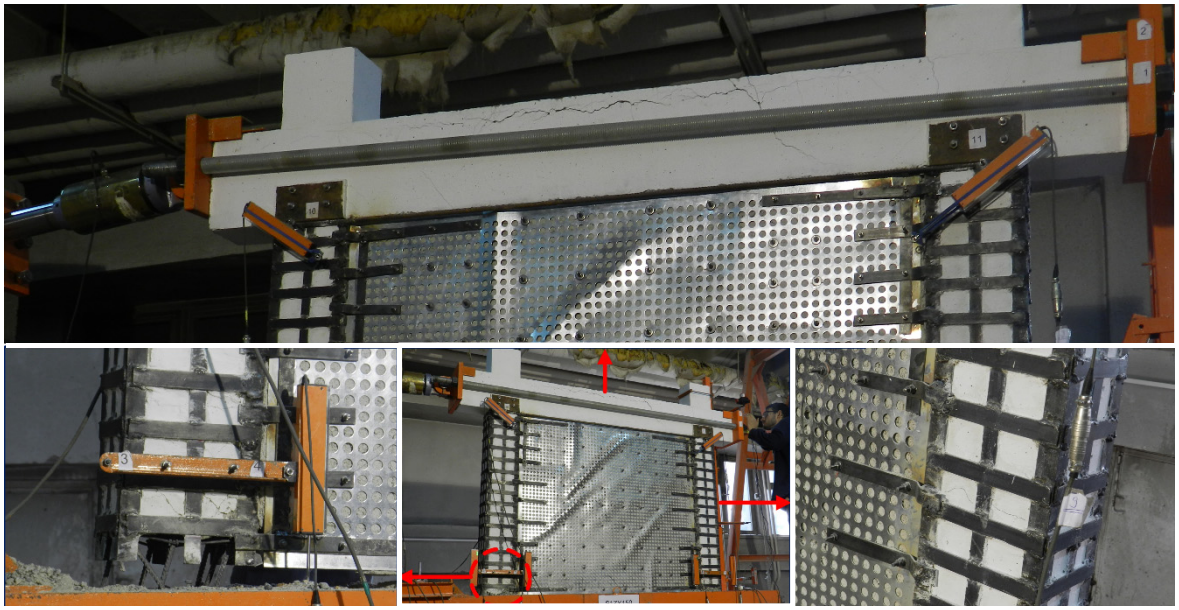
Bu elemanda, kolon uçlarında plastik mafsallar, kiriş uç bölgelerinde eğilme hasarı ve kiriş üst kısmında aderans çatlakları meydana gelmiştir (Resim 5.19). Dolgu duvarın maruz kaldığı önemli diyagonal basınç kuvvetlerinin etkisiyle delikli çelik levhalarda buruşmalar ve dolgu duvarda çatlaklar meydana gelmiş; ancak ileri deformasyon düzeylerinde dahi bu levhalar, duvarın dağılmasını engelleyerek eleman bütünlüğünün devam etmesini sağlamıştır. Duvar-kolon bağlantıları etkin bir şekilde çalışmış, duvarla kolon arasındaki ayrışmanın deney boyunca çok sınırlı düzeylerde (maksimum 2-3 mm) kalmasını sağlamıştır. S1ZY150 elemanında duvar-kolon teması deney boyunca hiçbir zaman tam olarak yitirilmemiştir. Duvar köşelerinde kullanılan lamalar, köşelerdeki hasarların sınırlı kalmasında etkili olmuştur. Köşelerdeki bulonlar için alınan ilave önlem (bkz. Resim 4.17), bulon başına düşen kesme kuvvetini azaltarak, bulonların kesilerek kopmasını önlemiştir. Deney, sol kolonun temele birleşen alt ucundaki donatılarda kopmalar meydana gelince sonlandırılmıştır (Resim 5.19).

Gerçek bir yapıda kirişlere etkiyen duvar yükü ve kirişin üst kısmını destekleyen oldukça rijit bir tabliye de kuvvetle muhtemel bulunacaktır. Bu sebepten dolayı kiriş üst kısmında oluşan aderans çözülmelerinin endişe verici olmadığı düşünülmektedir (Resim 5.19).

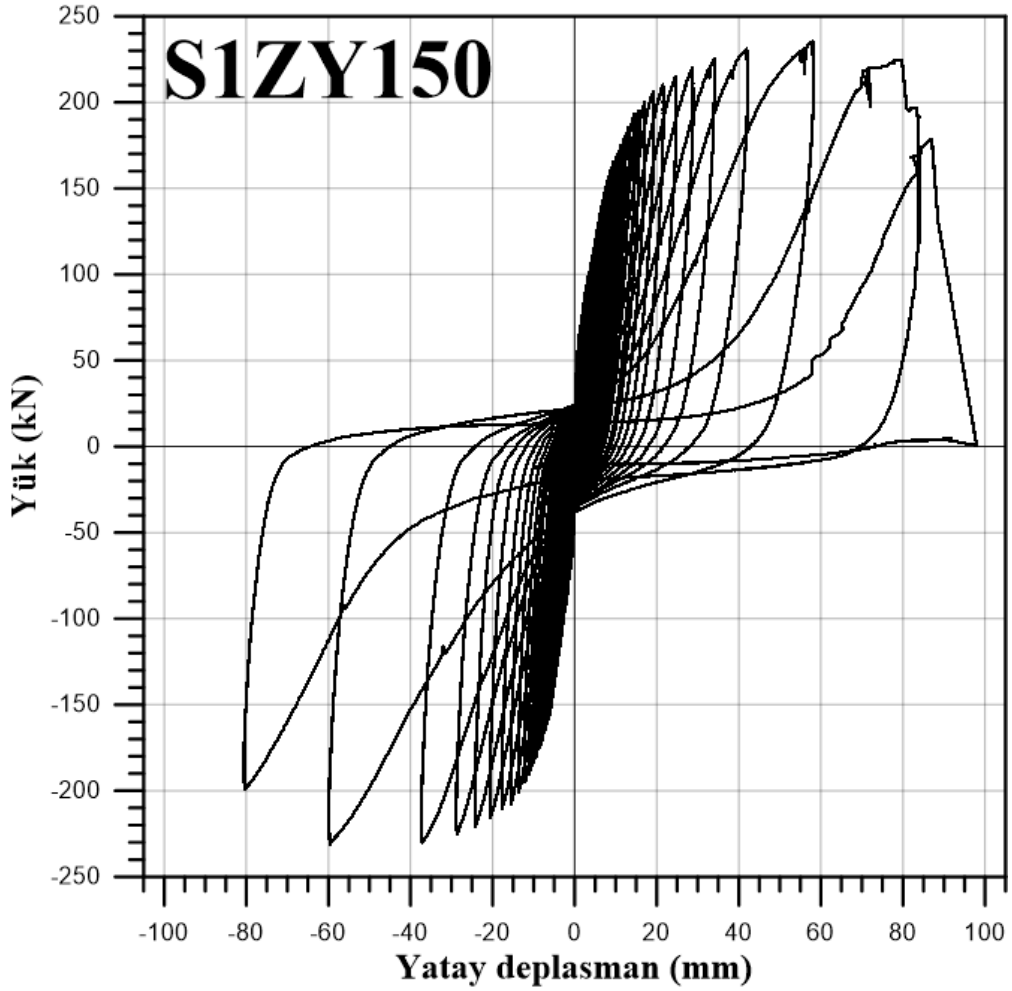
Bu eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 235 kN, geri yönde ise 231 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri yönde %6,3 geri yönde ise %6'dan büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.7). Bu ötelenme oranlarından sonra meydana gelen dayanımdaki düşüşün sebebi kolonun temelle birleşen alt ucundaki donatıların bazılarında meydana gelen kopmalar olmuştur.

Köşelerdeki bulonlar için alınan ilave önlem (bkz. Resim 5.17), işe yaradığı ve davranışı olumlu yönde etkilediği için bundan sonra kolonlara bağlantının olduğu tüm deney elemanlarında bu yöntemin uygulanmasına karar verilmiştir.

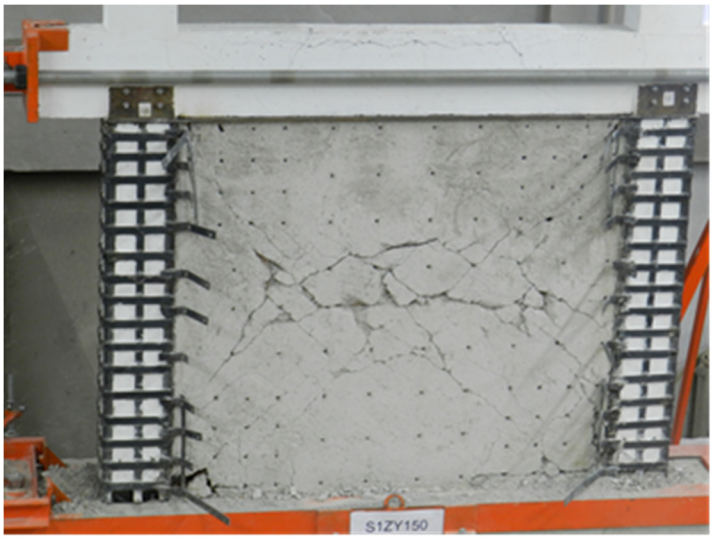
Deneyden sonra delikli levhalar çıkarılarak dolgu duvarın hasar durumuna bakılmıştır. Resim 5.20'ye bakıldığında delikli levhaların oldukça iyi bir sargılama yaparak, ağır hasar almış tuğla duvarın dağılmasını engellediği böylece yük taşımaya devam etmesini sağladığı anlaşılmaktadır. Ayrıca köşelerde ezilmelerin oldukça sınırlı olduğu gözlenmiştir.



Resim 5.19. S1ZY150 deney elemanı göçme modu



Şekil 5.7. S1ZY150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi



Resim 5.20. S1ZY150'de tuğla duvar hasar durumu

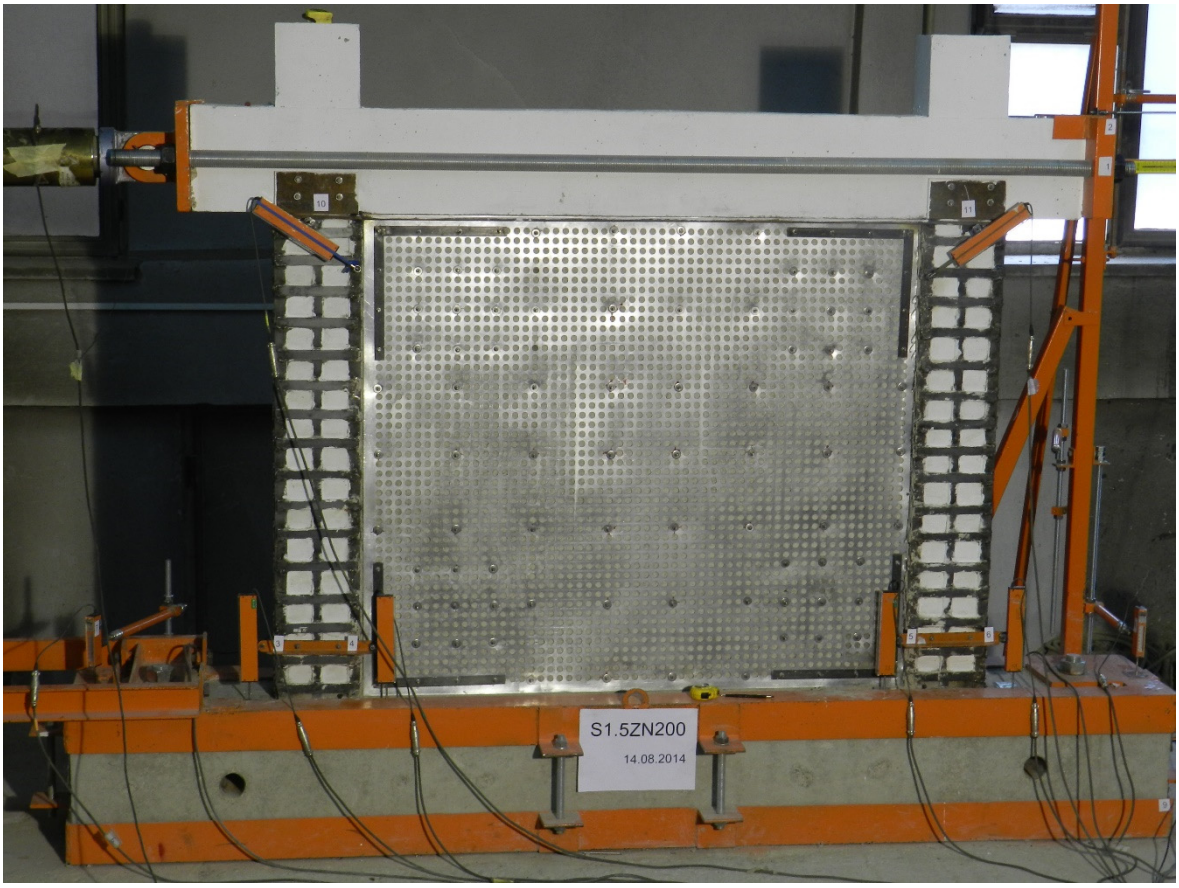
5.7. S1.5ZN200 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı	: 1,5 mm
Bulon aralığı	: 200 mm
Kolonlara bağlantı	: Yok

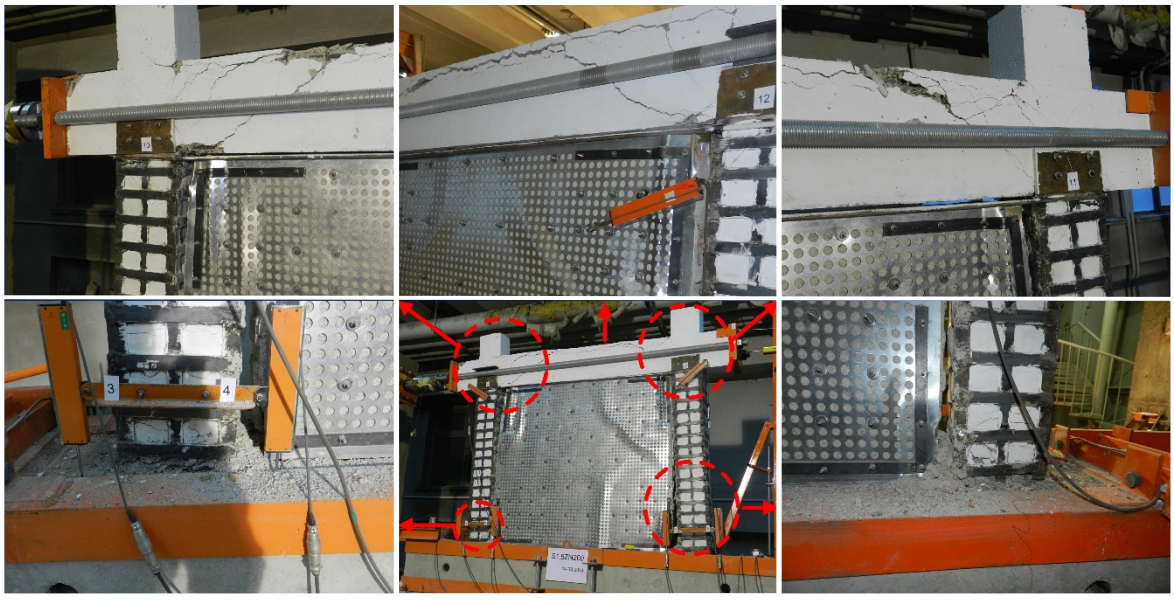
Bu elemanda levha kalınlığı 1.5 mm, duvar orta bölgesinde bulon aralığı 200 mm olup, delikli levhalar kolonlara bağlanmamıştır. Bütün güçlendirilmiş elamanlarda artık standart olarak yapılan imalatlar, (kolonlardaki çelik kafes manto, köşe bölgelerde bulon aralığının 100 mm'ye düşürülmesi, köşelerin ezilmesini geciktiren çelik lamalar, kolon-kiriş birleşim güçlendirmesi, iki kolonun üst uçtan ve her iki yüzden birbirine çelik çubuklar ile bağlanması) bu elemana da uygulanmıştır (Resim 5.21)

S1.5ZN200 elemanında da kolon uçlarında plastik mafsallar, kiriş uç bölgelerinde eğilmeyle birlikte kesme hasarı ve kiriş üst kısmında gerçekte bu kısımda rijit bir tabliye olacağı için endişe verici olmayan aderans çatlakları meydana gelmiştir (Resim 5.22). Duvar köşelerinde kullanılan lamalar, köşelerdeki hasarların sınırlı kalmasında etkili olmuştur. Delikli levhalarda buruşmalar, duvarda çekme çatlakları ve köşelerde ezilmeler olmasına (Resim 5.23) rağmen, duvar deney sonuna kadar bütünlüğünü korumayı başarmış ve dağılmamıştır. Duvarla kolonlar arasındaki maksimum ayrılma 40 mm civarında olmuştur. Duvarla kolonlar arasındaki ayrışma, deney sonlarına doğru iyice belirgin hale

gelmiştir (Resim 5.22). Bu deney, eleman yük almadığı ya da yükte büyük kayıp oluştuğu için değil ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için bitirilmiştir.



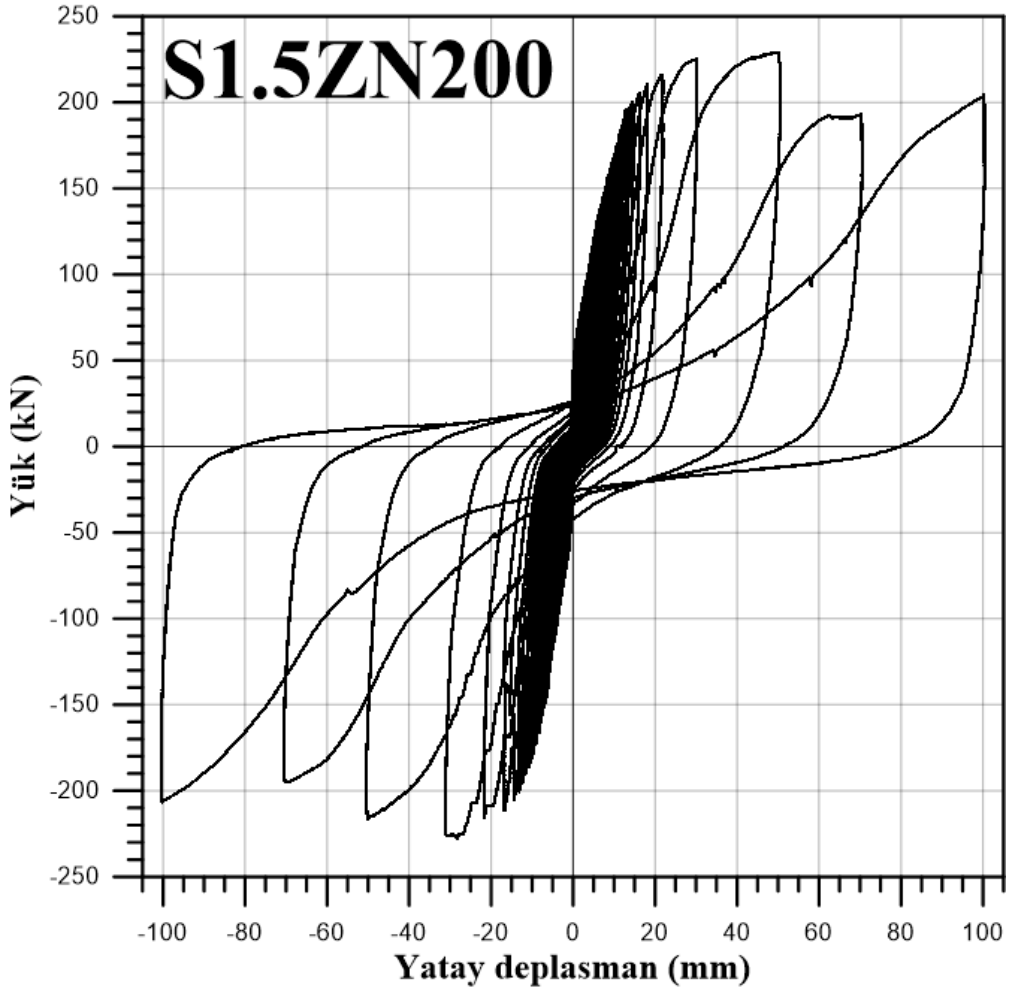
Resim 5.21. S1.5ZN200 deney elemanı



Resim 5.22. S1.5ZN200 deney elemanı göçme modu

Resim 5.23. S1.5ZN200'de tuğla duvar hasar durumu

S1.5ZN200 oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 229 kN, geri yönde ise 227 kN dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri ve geri yönde %7,5' dan büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.8).

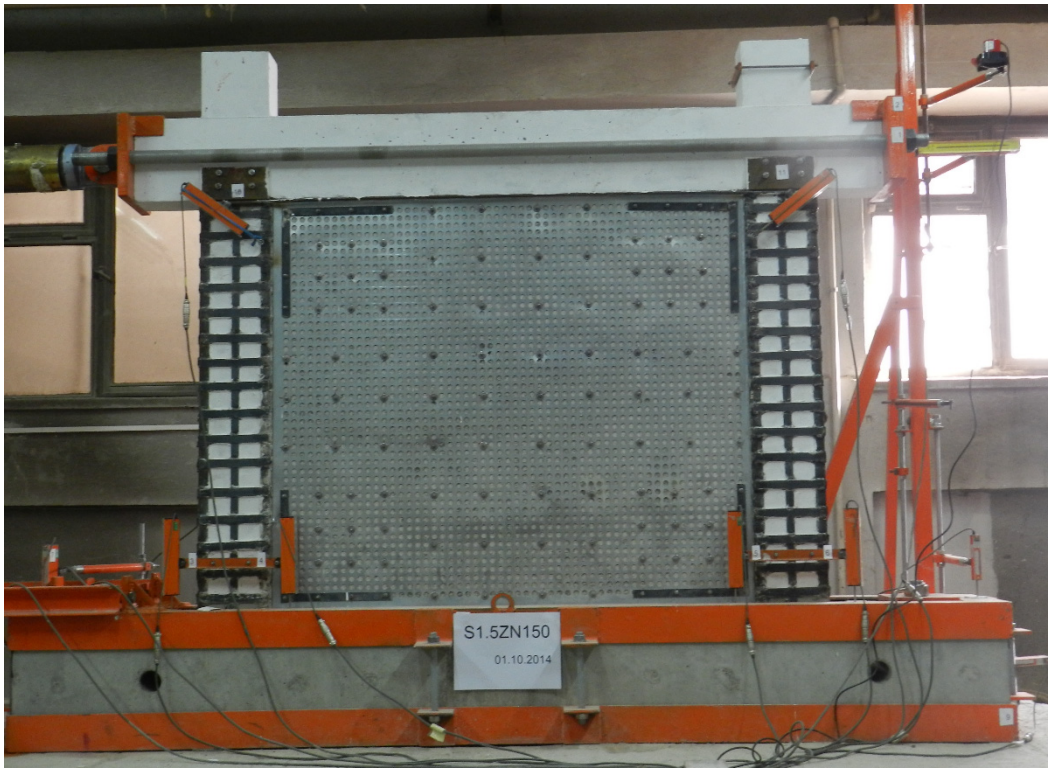


Şekil 5.8. S1.5ZN200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.8. S1.5ZN150 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı : 1,5 mm
Bulon aralığı : 150 mm
Kolonlara bağlantı : Yok

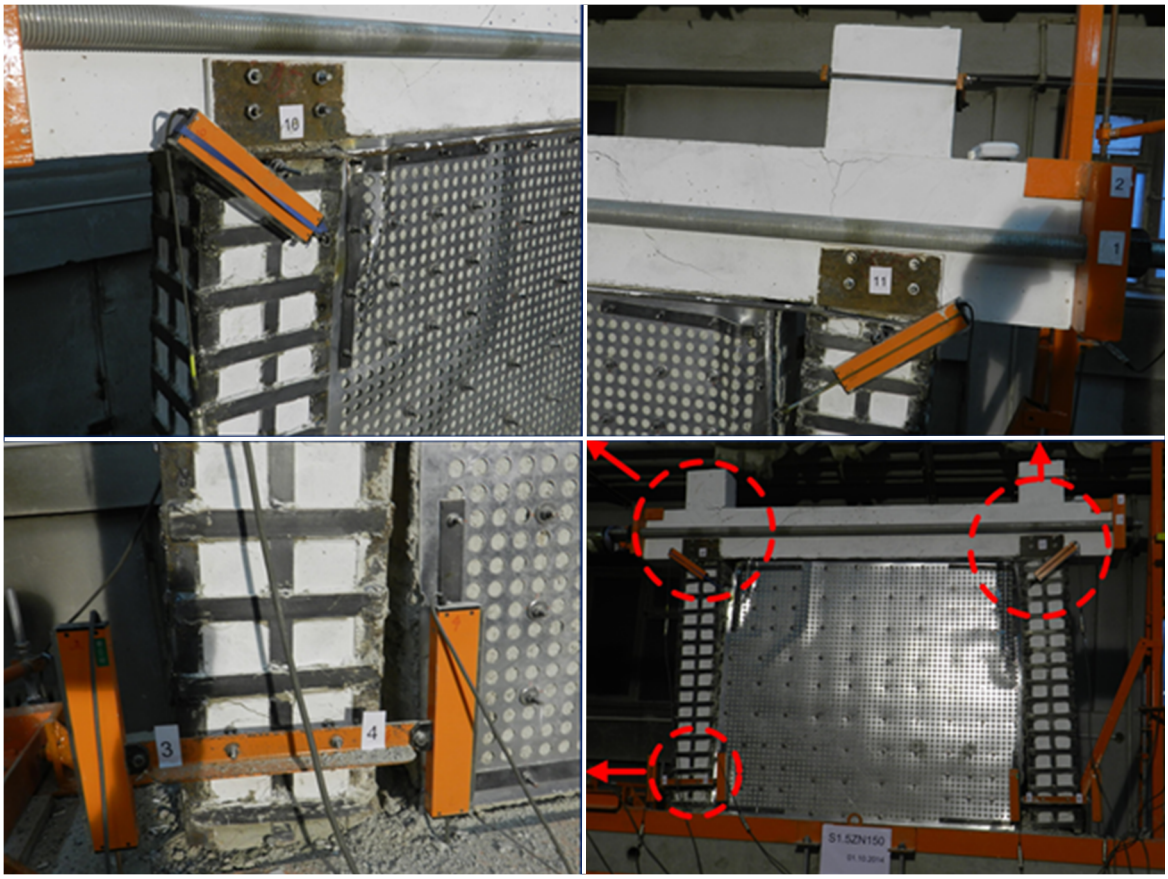
S1.5ZN150 elemanının orta bölgesindeki bulon aralığı 150 mm olup diğer bütün özellikleri bir önceki bölümde (Bölüm 5.6) anlatılmış olan S1.5ZN200 elemanı ile aynıdır. Deneye hazır hale getirilmiş S1.5ZN150 elemanı Resim 5.24'de gösterilmiştir.



Resim 5.24. S1.5ZN150 deney elemanı

S1.5ZN150 deney elemanı, kolon uçlarında plastik mafsallar, kiriş uç bölgelerinde eğilmeyle beraber kesme hasarları ile göçmeye ulaşmıştır (Resim 5.25). Diğer elemanlarda olduğu gibi bu elemanın da kiriş üst kısmında, gerçekte bu kısımda rijit bir tabliye olacağı için endişe verici olmayan aderans çatlakları meydana gelmiştir. Duvar köşelerinde kullanılan lamalar, köşelerdeki hasarların sınırlı kalmasında etkili olmuştur (Resim 5.25). Delikli levhalarda buruşmalar, duvarda diyagonal çatlaklar ve duvar köşelerinde ezilmeler olmasına rağmen duvar deney sonuna kadar bütünlüğünü korumayı başarmış ve dağılmamıştır (Resim 5.26). Duvarla kolon yüzeyleri arasındaki maksimum ayrışma deney

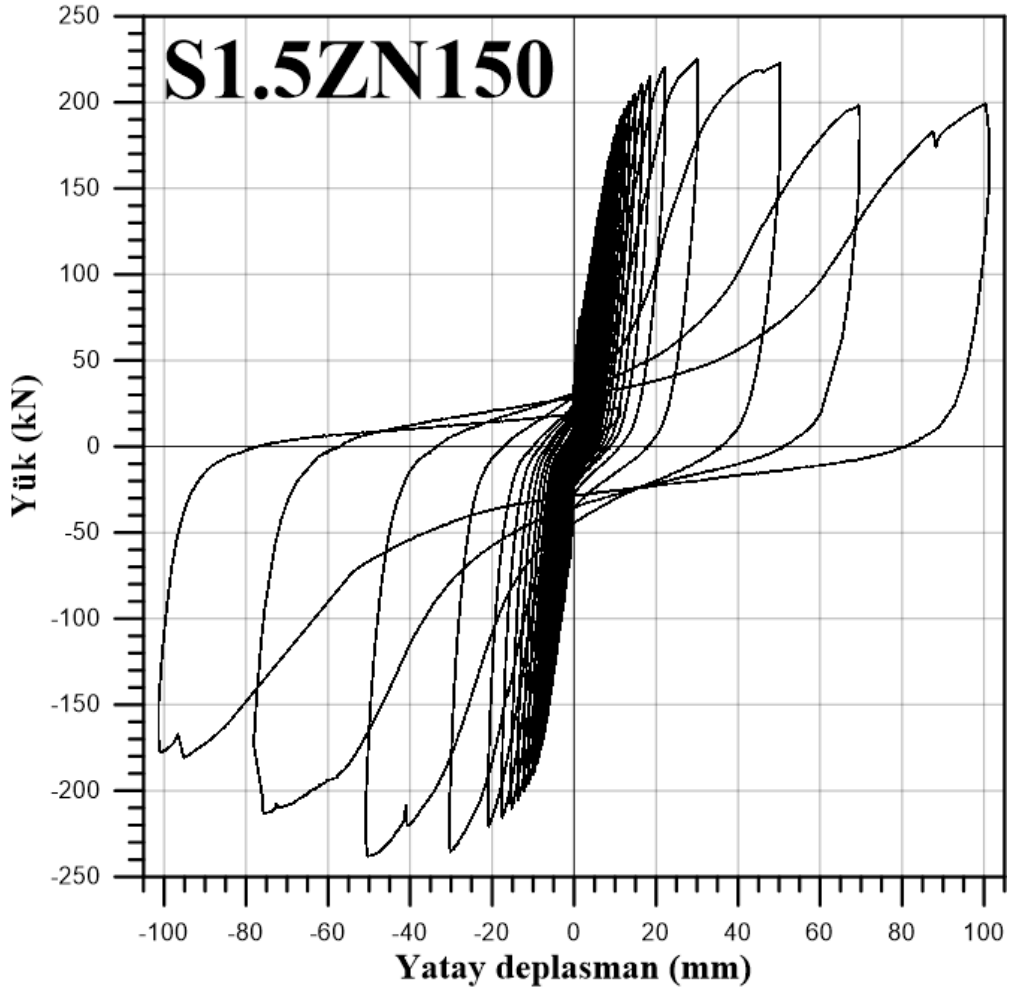
sonlarına doğru 5 cm değerine yaklaşmıştır (Resim 5.25). Bu deney, eleman yük almadığı ya da yükte büyük kayıp oluştuğu için değil ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için bitirilmiştir.



Resim 5.25. S1.5ZN150 deney elemanı göçme modu

Resim 5.26. S1.5ZN150'de tuğla duvar hasar durumu

Bu eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 225 kN, geri yönde ise 238 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri yönde %7,5 geri yönde ise %6'dan büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.9).

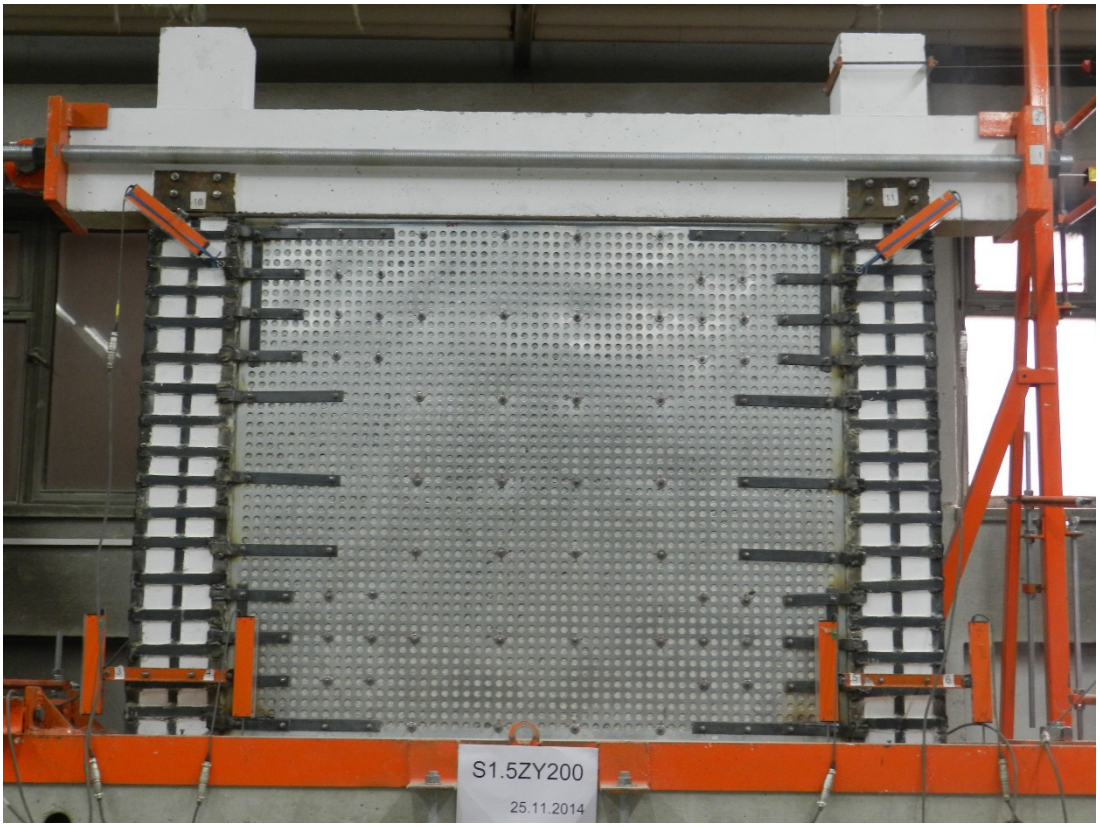


Şekil 5.9. S1.5ZN150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.9. S1.5ZY200 Deneyi

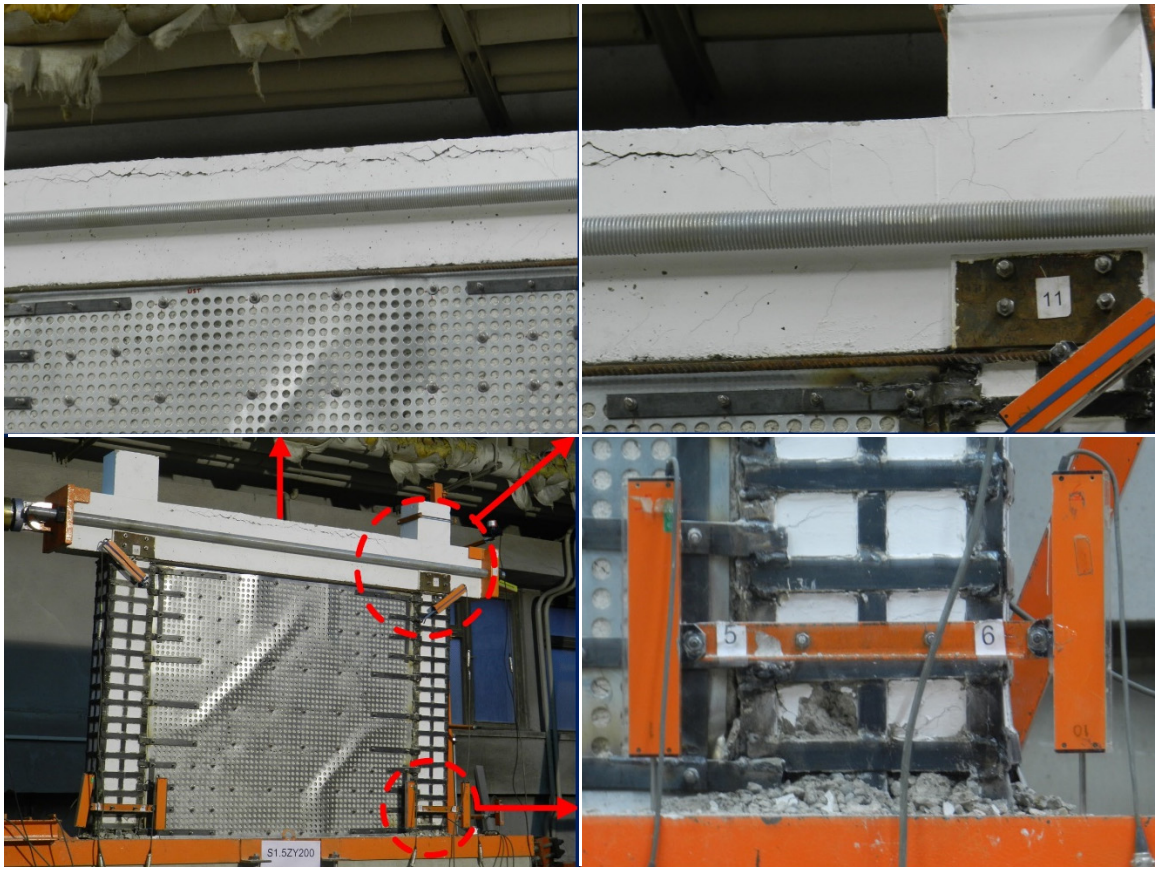
Delikli çelik levha kalınlığı : 1,5 mm
Bulon aralığı : 200 mm
Kolonlara bağlantı : Var

S1.5ZY200 elemanının S1.5ZN200 elemanından farklı sadece duvar üzerindeki delikli çelik levhaların kolonlara bağlanmış olmasıdır. S1.5ZY150'nin deneye hazırlanmış şekli Resim 5.27'de gösterilmiştir.

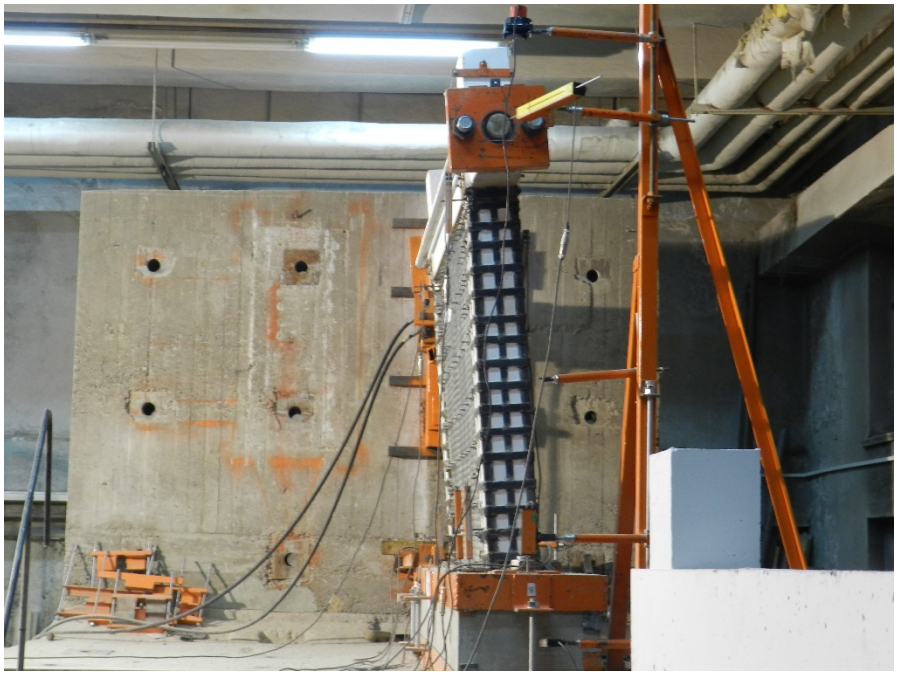


Resim 5.27. S1.5ZY200 deney elemanı

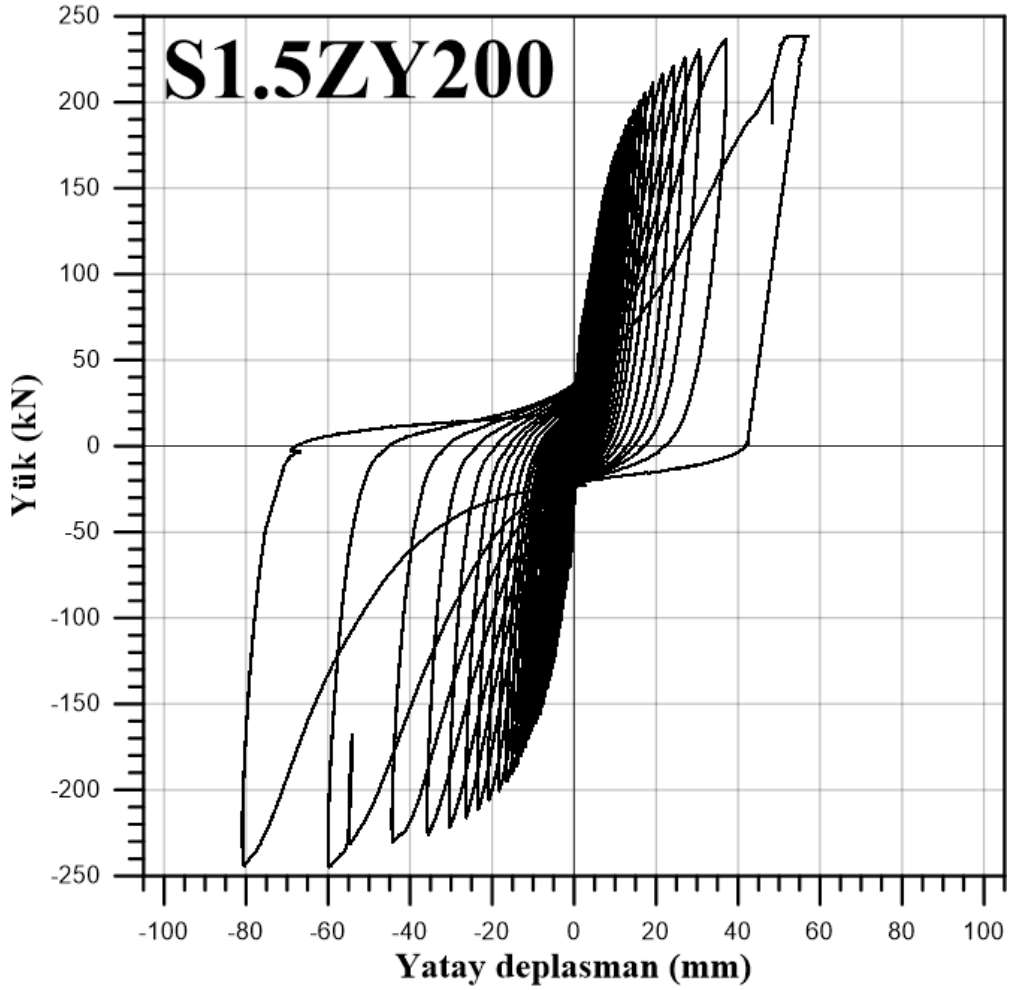
S1.5ZY200 deney elemanında, kolon uçlarında plastik mafsallar ve kiriş uç bölgelerinde ise çok ince eğilme çatlakları oluşmuştur (Resim 5.28). Diğer elemanlarda olduğu gibi bu elemanın da kiriş üst kısmında, gerçekte bu kısımda rijit bir tabliye olacağı için endişe verici olmayan aderans çatlakları meydana gelmiştir. Duvar-kolon bağlantıları etkin bir şekilde çalışmış, duvarla kolonlar arasındaki ayrışma sınırlı değerlerde (3 mm) kalmıştır. Duvar köşelerinde kullanılan lamalar, köşelerdeki hasarların sınırlı kalmasında etkili olmuştur (Resim 5.28). Deneyin ilerleyen aşamalarındaki çevrimlerin itme yapılan bölümünde eleman tehlikeli düzeyde düzlem dışı ötelenme yaptığı için deneye devam edilememiştir (Resim 5.29). Bu duruma rağmen geri çevrimlerde % 6 ve ileri çevrimlerde % 4,5 ötelenme oranlarına ulaşılmıştır. Eleman, ortaya çıkan bu olumsuzluğa rağmen sünek davranmıştır (Şekil 5.10). Deney elemanı ileri yönde 238 kN, geri yönde ise 244 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Bu deneyden sonra düzlem dışı ötelenmeyi sınırlamak amacıyla bir düzenek tasarlanmıştır.



Resim 5.28. S1.5ZY200 deney elemanı göçme modu



Resim 5.29. S1.5ZY200 deney elemanının düzlem dışı ötelenmesi



Şekil 5.10. S1.5ZY200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

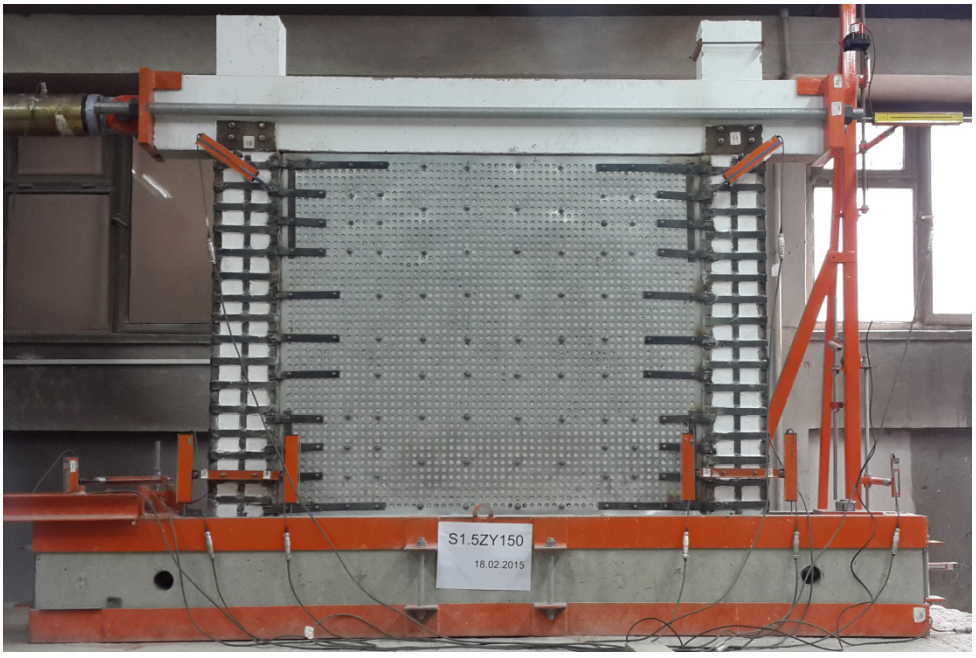
5.10. S1.5ZY150 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı : 1,5 mm
Bulon aralığı : 150 mm
Kolonlara bağlantı : Var

S1.5ZY150 elemanında orta bölgede bulon aralığı 150 mm olup diğer bütün ana parametreler S1.5ZY200 elemanı ile aynıdır. Ancak daha önceki deneylerde kolonların üst uçlarını birbirine bağlayarak kolonlar arasında yük aktarmak amacıyla kullanılan 2 adet çekme çubuğu bu elemanda deneme amaçlı kullanılmamıştır.

Ayrıca S1.5ZY200 elemanının deneyinde ortaya çıkan düzlem dışı ötelenme probleminin çözülebilmesi amacıyla Resim 5.30'da gösterilen düzenek hazırlanmıştır. Bu düzenekte kriko, düşey yönlü hareketi serbest kalacak şekilde manşonlu çelik halatlarla rijit reaksiyon duvarına sabitlenmiştir. Deneye hazır hale getirilen S1.5ZY150 elemanı ise Resim 5.31'de gösterilmiştir.

Resim 5.30. Düzlem dışı ötelenmeleri sınırlayan mekanizma

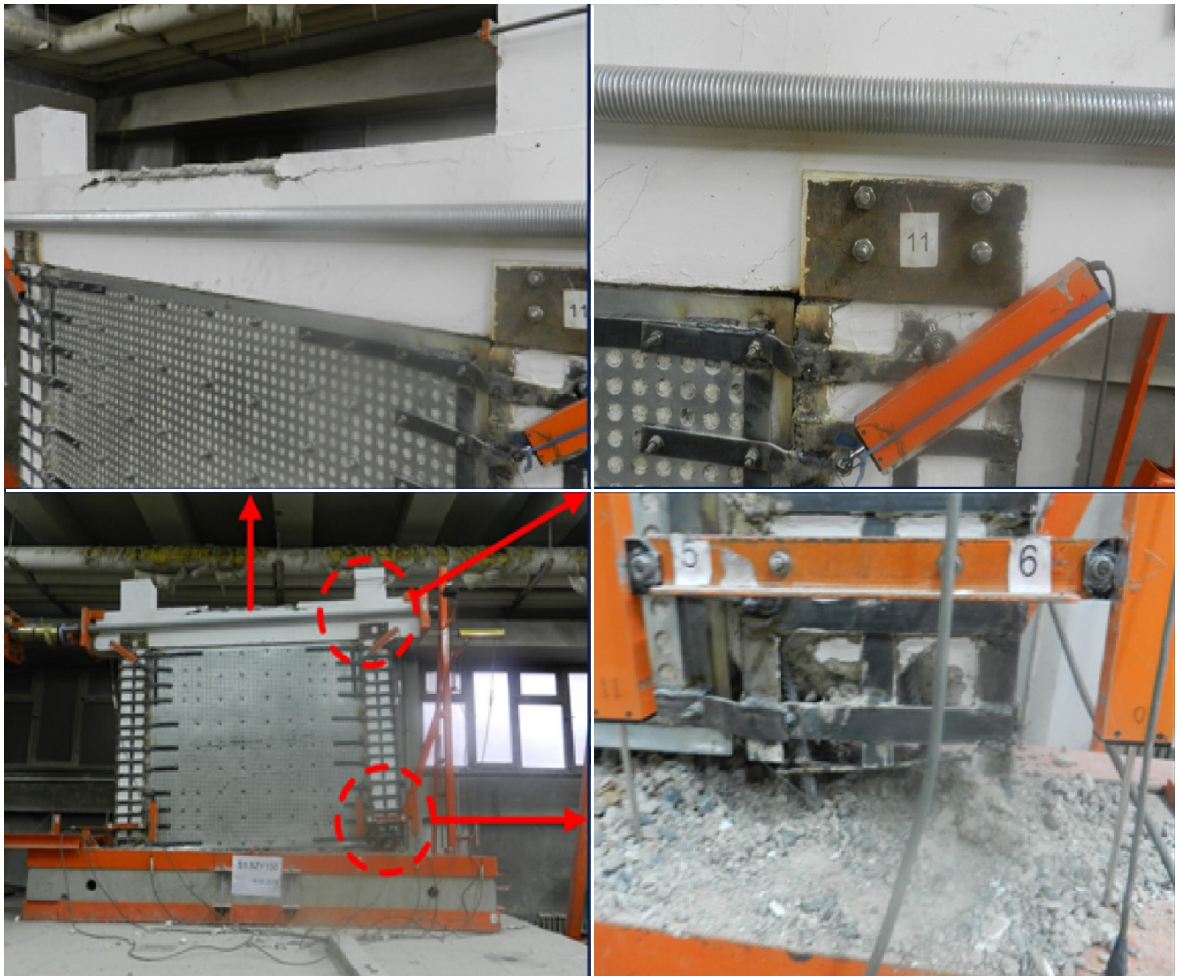


Resim 5.31. S1.5ZY150 deney elemanı

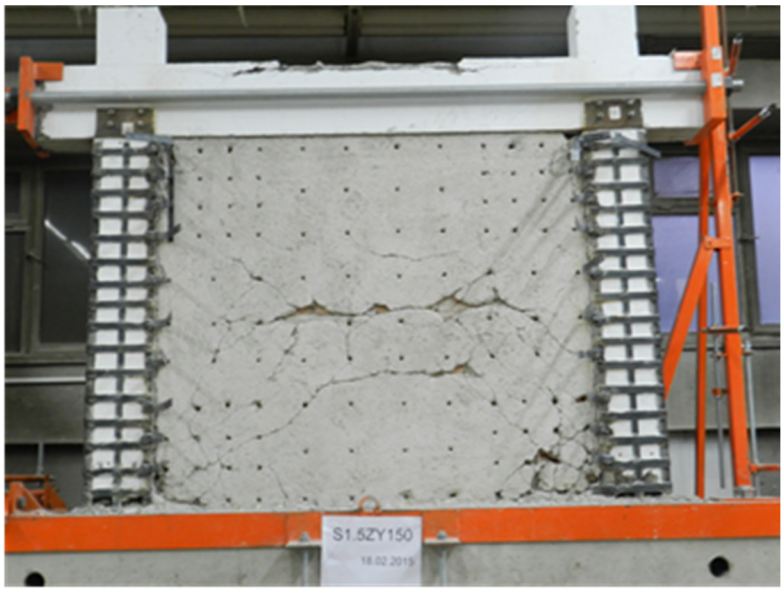
Hazırlanan yeni düzenek (Resim 5.30), deney boyunca oldukça etkin çalışmış ve düzlem dışı hareketi kısıtlamıştır. Bundan sonra yapılacak deneylerde de kullanılmasına karar verilmiştir. Bu elemanda yine kolon uçlarında plastik mafsallar ve kiriş uç bölgelerinde eğilme hasarı ile kiriş üst kısmında tabliye olmadığı için aderans çatlakları meydana gelmiştir (Resim 5.32). Duvar-kolon bağlantıları etkin bir şekilde çalışmış, duvarın kolona temas ettiği yüzeyden ayrılması en fazla 2 mm seviyelerinde kalmıştır. Duvar köşelerinde kullanılan lamalar, köşelerdeki hasarların sınırlı kalmasında etkili olmuştur. Duvara uygulanan güçlendirme yönteminin etkisiyle delikli levhalarda buruşmalar ve duvarda çatlaklar olmasına rağmen duvar, deney sonuna kadar bütünlüğünü korumayı başarmış ve dağılmamıştır (Resim 5.33).

Kolonları üst ucundan birbirine bağlayan çekme çubuklarının kaldırılması herhangi bir olumsuz sonuç doğurmamıştır. Bunun sebebinin delikli levhaların kolonlara bağlı olması ve böylece yatay yükün kolonlar arasında daha dengeli paylaşılması olduğu düşünülmektedir. Son çevrimde köşelerde bulunan gijonlardan iki tanesi (sol üst, sağ alt) kesilerek kopmuştur. Yine bu son çevrimde duvarın kolonlarla birlikte temel üst yüzüne göre rölatif harekette bulunduğu bir başka deyişle duvarla temel arasında aderansın kalmadığı gözlenmiştir. Sağ kolonun temelle birleşen alt ucundaki tüm donatılarda kopma meydana gelince deney sonlandırılmıştır (Resim 5.32).

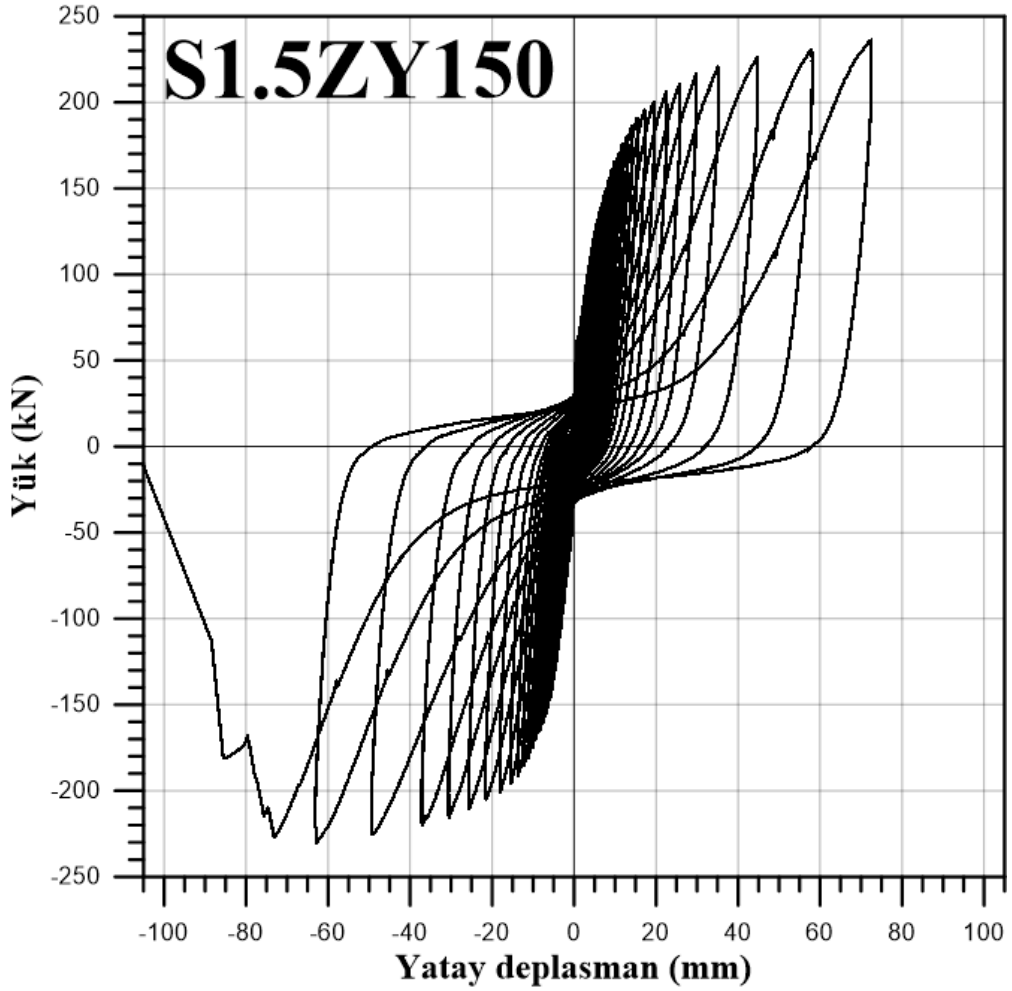
Bu eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 236 kN, geri yönde ise 230 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri yönde %5,5'den büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamış, geri yönde ise %6'lık ötelenme oranına dayanımda kayıp olmadan gelindiğinde sağ kolonun boyuna donatılarının hepsi kolon-temel ara kesitinden ardı ardına kopmuştur (Şekil 5.11).



Resim 5.32. S1.5ZY150 deney elemanı göçme modu



Resim 5.33. S1.5ZY150'de tuğla duvar hasar durumu

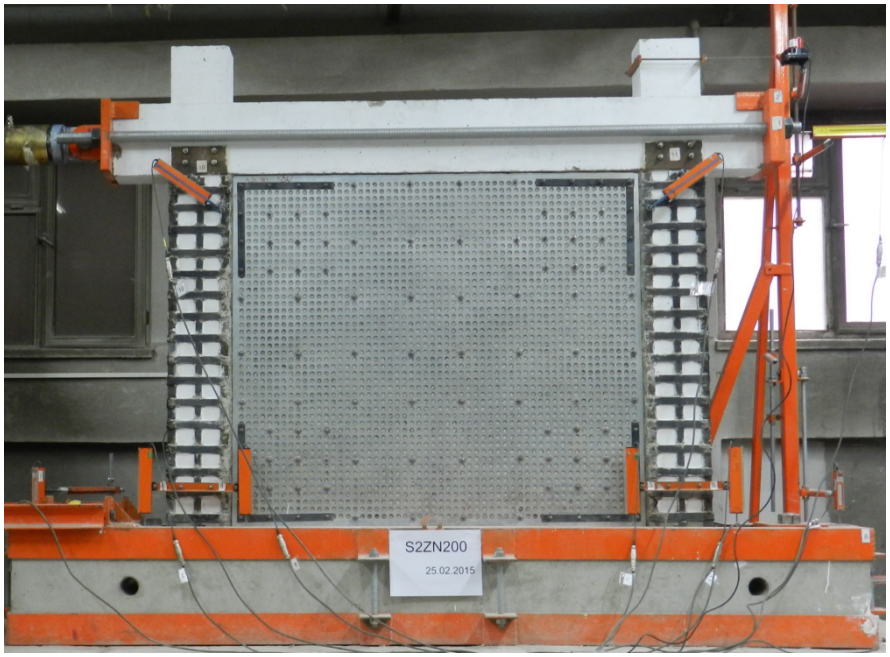


Şekil 5.11. S1.5ZY150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.11. S2ZN200 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı : 2 mm
Bulon aralığı : 200 mm
Kolonlara bağlantı : Yok

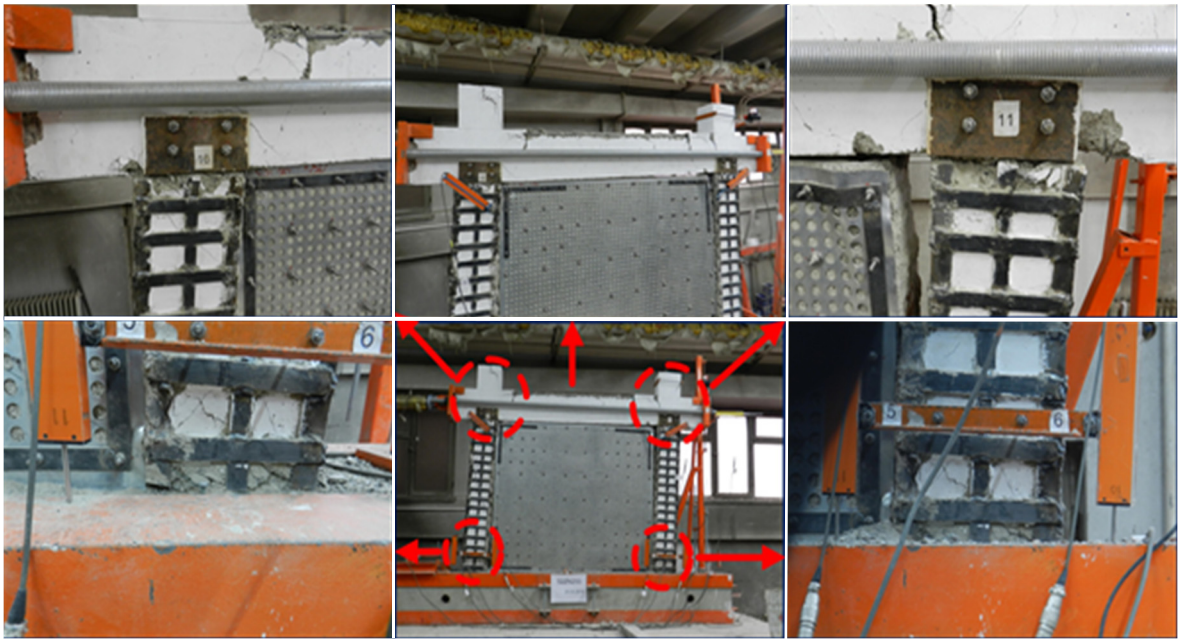
Yukarıda özellikleri verilmiş S2ZN200 elemanında S1.5ZY150'de olduğu gibi kolonların üst uçları arasında yük aktarımı amacıyla kullanılan 2 adet çekme çubuğu yine deneme amaçlı kullanılmamıştır. Ancak S2ZN200'de delikli çelik levhaların kolonlara bağlı olmadığı burada tekrar hatırlatılmak istenmiştir. Deneye hazır hale getirilen S2ZN200 elemanı ise Resim 5.34'de gösterilmiştir.



Resim 5.34. S2ZN200 deney elemanı

S2ZN200 elemanı oldukça sünek bir davranış göstermiş olmakla beraber, 1 ve 1,5 mm güçlendirme levhalı elemanlara göre önemli bazı davranış farklılıklarına sahiptir. Betonarme çerçevede kolonların alt ve üst uçlarında toplam dört adet plastik mafsal oluşmuş ve bu mafsallara ek olarak, kolon iç yüzlerinden yaklaşık 20'şer cm ötede kiriş açıklığı üzerinde de plastik mafsallar ortaya çıkmıştır (Resim 5.35). Bu mafsalların kirişin duvar üzerine kısmi mesnetlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha önce test edilen elemanlara benzer olarak kiriş boyunca yine aderans çatlakları oluşmuştur (Resim 5.35). Ancak gerçek bir yapıda kirişlere etkiyen duvar yükü ve kirişin üst kısmını destekleyen döşemenin varlığı dolayısıyla bu hasarın endişe verici olmadığı düşünülmektedir. Deneyin son aşamalarındaki çevrimlerde kolonlardan birinin duvardan tamamen ayrıldığı bir başka deyişle kolon-duvar temas yüzeyinin %0 olduğu görülmüştür. Bu ayrılma, kolonların alt ve üst uçlarında kısa konsol davranışına benzer olarak ortaya çıkan kesme hasarı sebebiyle kolonların çerçevenin bütününden dışa doğru uzaklaşması dolayısıyla meydana gelmiştir (Resim 5.35). Bu ayrılmaya kolonların üst uçları arasında yük aktarımı amacıyla kullanılan 2 adet çekme çubuğunun kaldırılmasının neden olup olmadığı ve bu çubukların davranışa olumlu katkısının ne kadar olabileceğinin sonraki deneyde (yine levhaları kolonlara bağlı olmayan S2ZN150) incelenmesine karar verilmiştir.

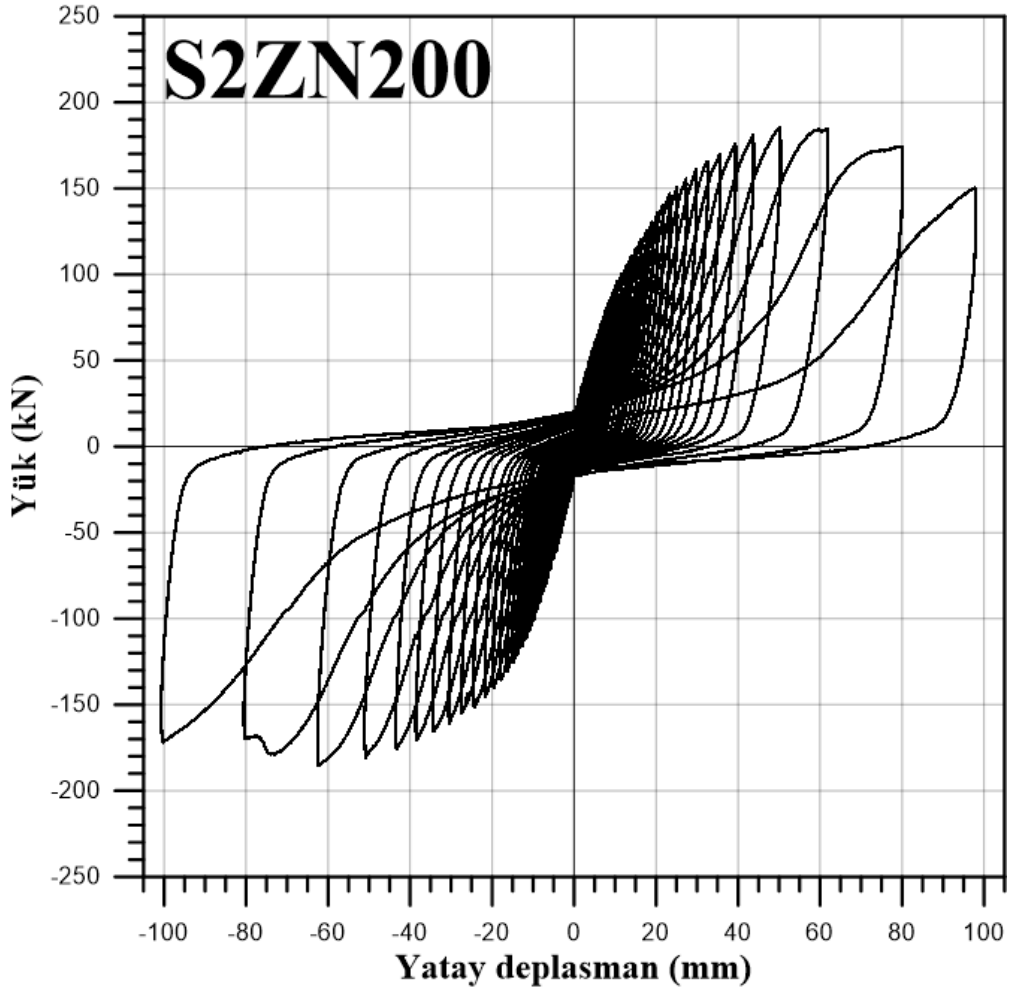
Duvar köşelerinde kullanılan lamalar ve delikli levhanın 2 mm kalınlığında olması köşelerde tuğla duvarın ezilmesini önlemiştir (Resim 5.36). Delikli levhada oluşan buruşmalar ile tuğla duvardaki çatlaklar oldukça sınırlı ve bölgesel düzeyde kalmış, duvarda deney sonuna kadar önemli bir hasar oluşmamıştır (Resim 5.36). Bu deney, eleman yük almadığı ya da yükte büyük kayıp oluştuğu için değil, ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için bitirilmiştir.



Resim 5.35. S2ZN200 deney elemanı göçme modu

Resim 5.36. S2ZN200'de tuğla duvar hasar durumu

Bu eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri ve geri yönde eşit 185 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri yönde %7,2, geri yönde ise %7,5'dan büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.12).

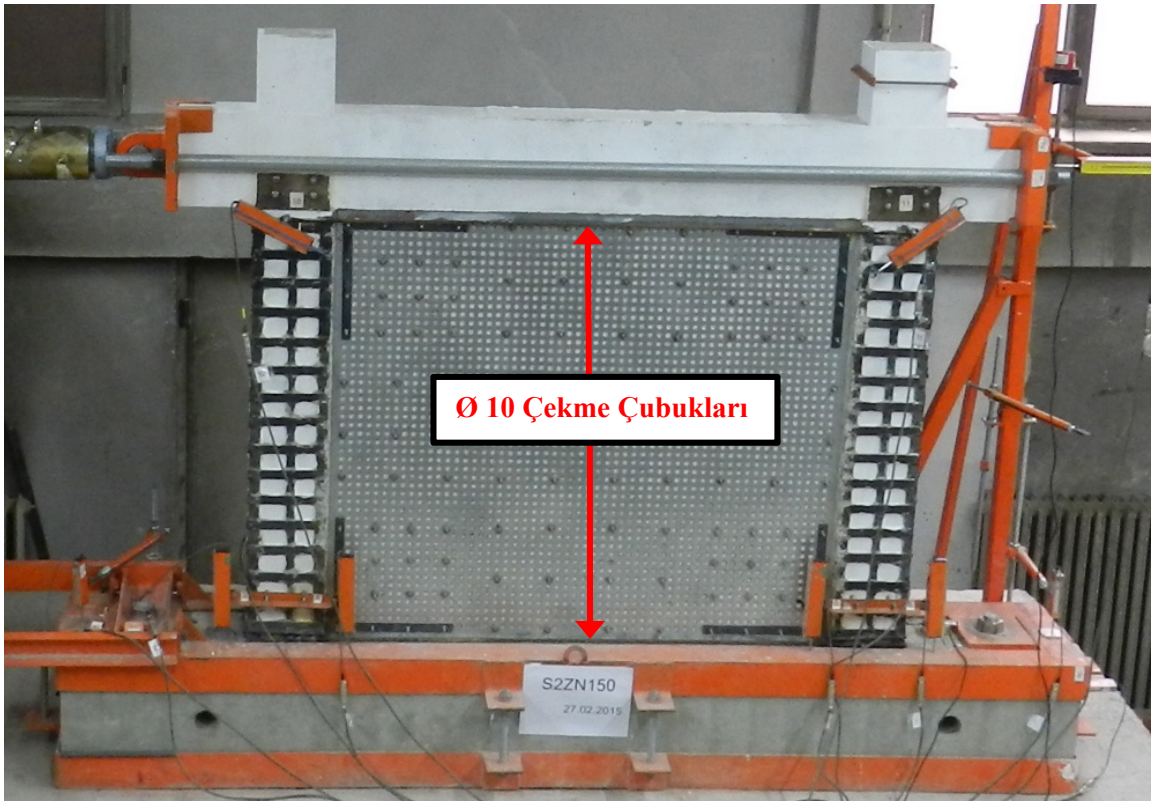


Şekil 5.12. S2ZN200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.12. S2ZN150 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı : 2 mm
Bulon aralığı : 150 mm
Kolonlara bağlantı : Yok

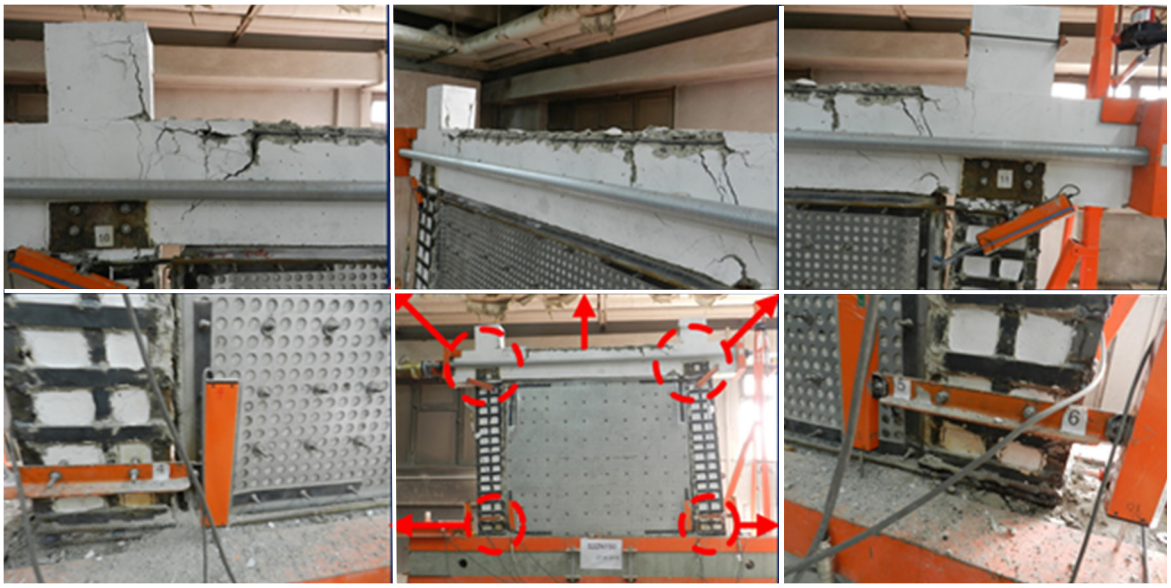
Yukarıda özellikleri verilmiş S2ZN150 elemanında daha önce test edilen elemanlardan farklı olarak, kolonların hem alt hem de üst uçları ön ve arka yüzden çekme çubukları (ø10, S420) vasıtasıyla birbirlerine bağlanarak kolonlar arası yük aktarımının kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Bu şekilde S2ZN200 deneyinin ileri aşamalarında ortaya çıkan kolonların iç yüzleri arasındaki mesafe artışının ve kesme hasarının sınırlandırılabileceği ve böylece davranışın biraz daha iyileştirilebileceği düşünülmüştür. Bu deneyde sağ kolonun alt ucunun temele göre yatay ötelenmesini ölçmek amacıyla 25 mm genliğinde yeni bir potansiyometre de ilave edilmiştir (bkz. Resim 4.11). Deneye hazır hale getirilmiş S2ZN150 elemanı Resim 5.37'de gösterilmiştir.



Resim 5.37. S2ZN150 deney elemanı

S2ZN200 elemanına benzer olarak, bu elemanda da kolonların alt ve üst uçlarında toplam dört adet ve kiriş açıklığında kolon yüzlerinden yaklaşık 20 cm uzaklıkta iki adet plastik mafsal oluşmuştur. Diğer elemanlarda olduğu gibi bu elemanın da kiriş üst kısmında, gerçekte bu kısımda rijit bir tabliye olacağı için endişe verici olmayan aderans çatlakları meydana gelmiştir (Resim 5.38).

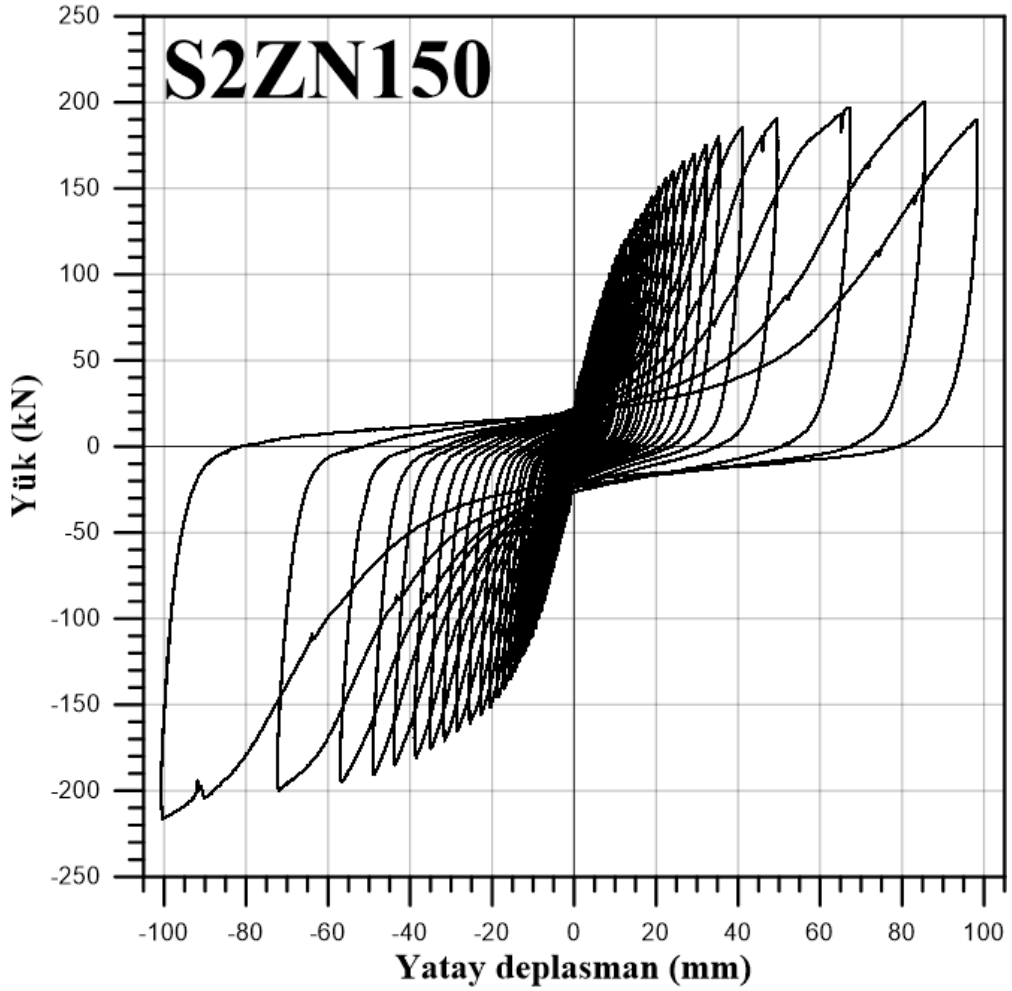
Kullanılan çekme çubukları etkili olsa da deneyin ileri aşamalarında, kolon uçlarında meydana gelen kısa konsol tipi kesme hasarları neticesinde kolonlarda dışa doğru ötelenme olmuş ve kiriş duvar üzerinde göreceli hareket etmiştir. Son çevrimlerde bu göreceli hareketin, kiriş alt kenarı ortasında 65 mm dolaylarında olduğu görülmüştür. Duvar köşelerinde kullanılan lamalar ve delikli levhanın 2 mm kalınlığında olması köşelerde tuğla duvarın ezilmesini önlemiştir. Delikli levhalarda oluşan buruşmalar ile tuğla duvardaki çatlaklar oldukça sınırlı ve bölgesel düzeyde kalmış, duvarda deney sonuna kadar önemli bir hasar oluşmamıştır (Resim 5.39).



Resim 5.38. S2ZN150 deney elemanı göçme modu

Resim 5.39. S2ZN150'de tuğla duvar hasar durumu

Bu deney, eleman yük almadığı ya da yükte büyük kayıp oluştuğu için değil ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için bitirilmiştir. Eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 200 geri yönde ise 216 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri ve geri yönde %7,5' den büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.13).



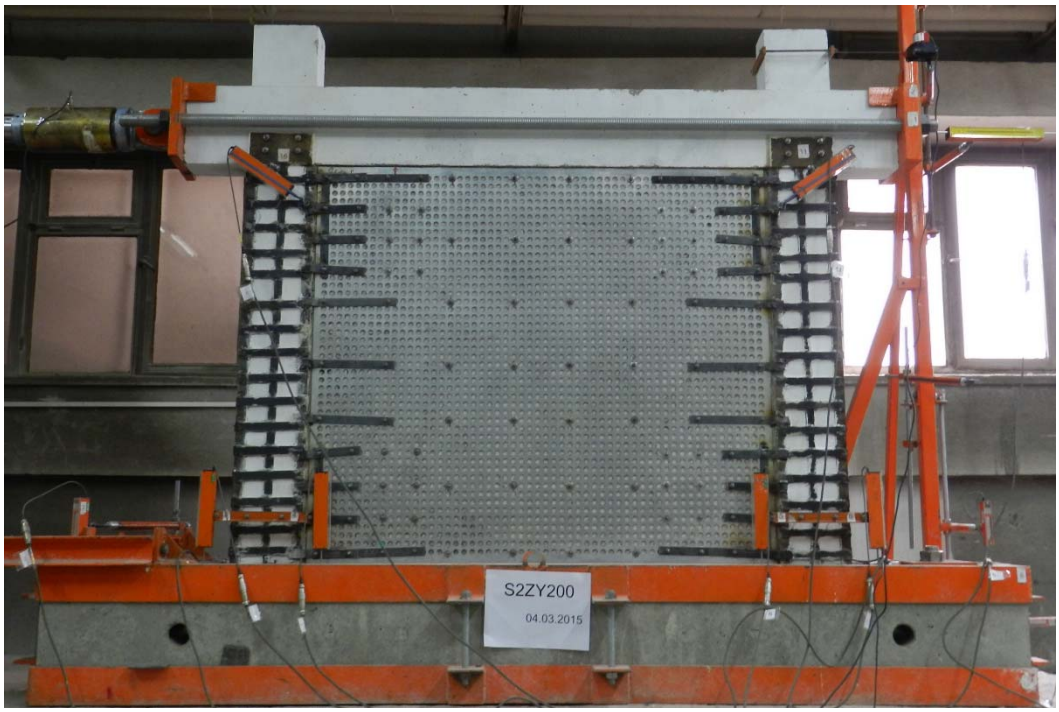
Şekil 5.13. S2ZN150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.13. S2ZY200 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı	: 2 mm
Bulon aralığı	: 200 mm
Kolonlara bağlantı	: Var

Yukarıda özellikleri verilmiş S2ZY200 elemanında delikli güçlendirme levhaları kolonlara bağlanmıştır. Hem S1ZY150 deneyi gözlemlerine dayanarak hem de duvar-kolon bağlantıları sayesinde kolonların üst ve alt uçları arasında yük aktarımının zaten sağlanabileceği düşünülerek, kolon üst ve alt uçlarını birleştiren çekme çubukları bu elemanda kullanılmamıştır. Ayrıca duvar-kolon bağlantı lamalarından en dışta yer alan dört sıra, duvar köşelerinde yer alan "L" şeklindeki lamalara üst yüzünden kaynaklanarak (Resim 5.40), duvarın bu bölgesinde yer alan bulonların beraber çalışması sağlanmıştır. Deneye hazır hale getirilmiş S2ZY200 elemanı Resim 5.41'da gösterilmiştir.

Resim 5.40. S2ZY200'de duvar kolon bağlantısında ilave kaynaklar

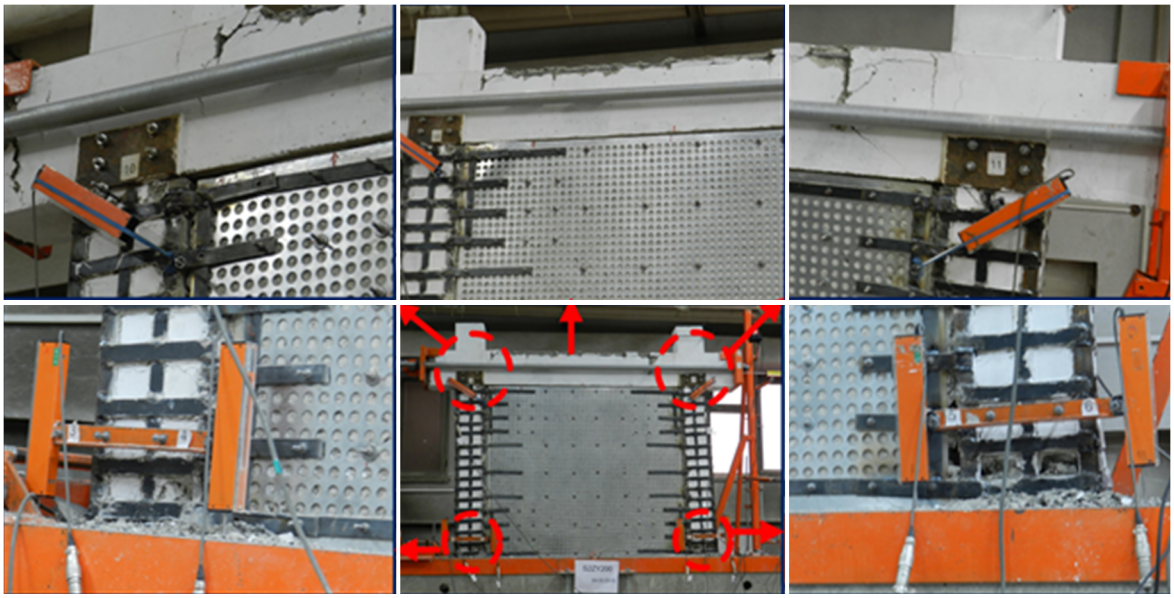


Resim 5.41. S2ZY200 deney elemanı

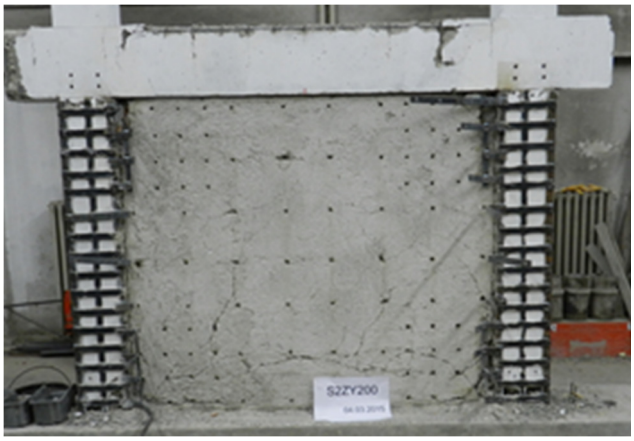
Deneyde kolonların alt ve üst uçlarında toplam dört adet ve kirişin kolon yüzlerine yakın bölgelerinde iki adet plastik mafsal oluşmuştur. Ek olarak kolon alt ve üst uçlarında kesme çatlakları meydana gelmiştir. Diğer elemanlarda olduğu gibi bu elemanın da kiriş üst kısmında, gerçekte bu kısımda rijit bir tabliye olacağı için endişe verici olmayan aderans çatlakları oluşmuştur (Resim 5.42).

Deneyin ileri aşamalarında, kolon uçlarında meydana gelen kısa konsol tipi kesme hasarları neticesinde kolonlarda dışa doğru ötelenme olmuş ve kiriş duvar üzerinde göreceli hareket etmiştir. Bu göreceli hareketin, son yük çevriminde kirişin alt kısmında 25 mm ve temelin hemen üstünde 60 mm dolaylarında olduğu belirlenmiştir. Kolon alt uçlarındaki plastik mafsallarda ilave kesme çatlakları da oluştuğu için bu bölgeler yoğun hasar görmüştür. Duvar-kolon bağlantıları etkin bir şekilde çalışmış ve duvarla kolon arasındaki ayrışma 2 mm dolaylarında kalmıştır (Resim 5.42).

Duvar köşelerindeki bulonların bazıları deneyin son aşamasında kesilerek kopmuştur. Duvar köşe bölgelerinde kullanılan “L” şeklindeki lamalar ve delikli levhanın 2 mm kalınlığında olması tuğla duvarın ezilmesini önlemiştir. Delikli levhada oluşan buruşmalar ile tuğla duvardaki çatlaklar oldukça sınırlı ve bölgesel düzeyde kalmış, duvarda deney sonuna kadar önemli bir hasar oluşmamıştır (Resim 5.43). Bu deney, eleman yük almadığı ya da yükte büyük kayıp oluştuğu için değil ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için bitirilmiştir.

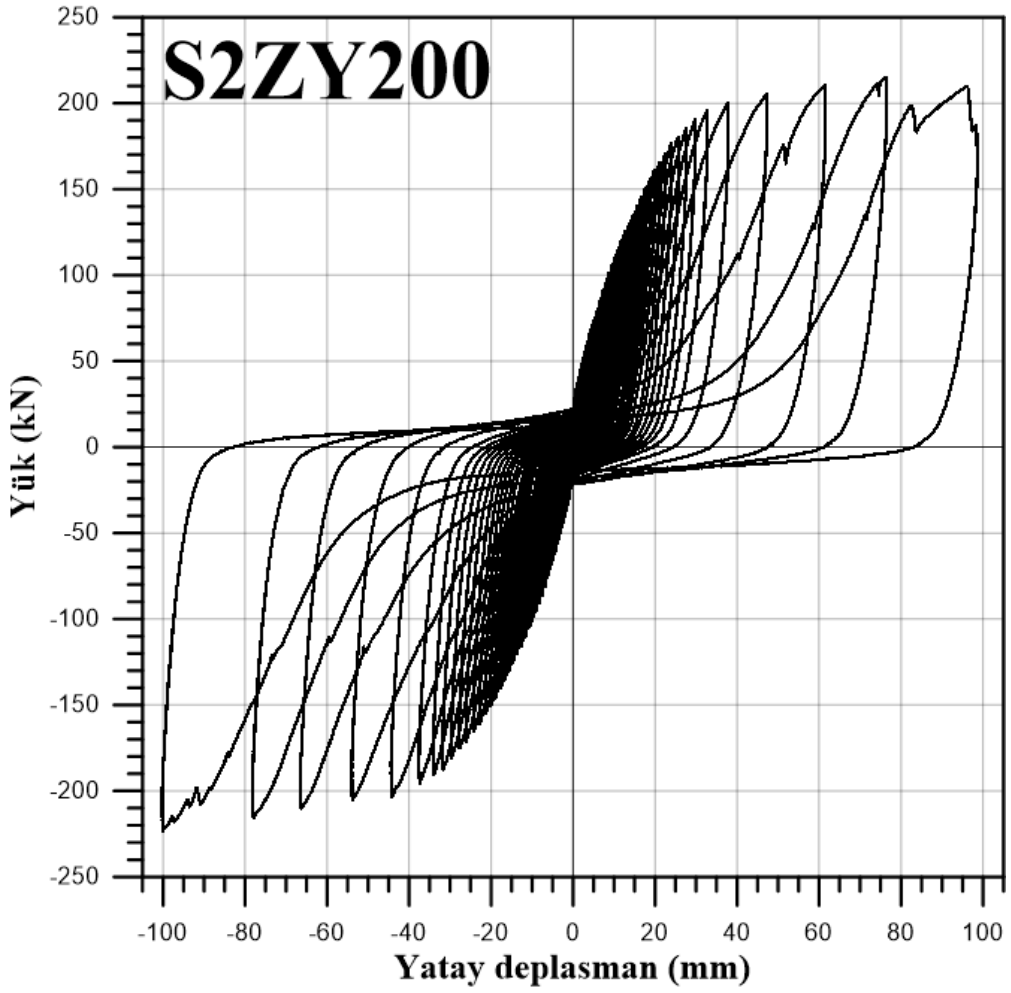


Resim 5.42. S2ZY200 deney elemanı göçme modu



Resim 5.43. S2ZY200'de tuğla duvar hasar durumu

Eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 215 kN, geri yönde ise 223 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri ve geri yönde %7,5'den büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.14).

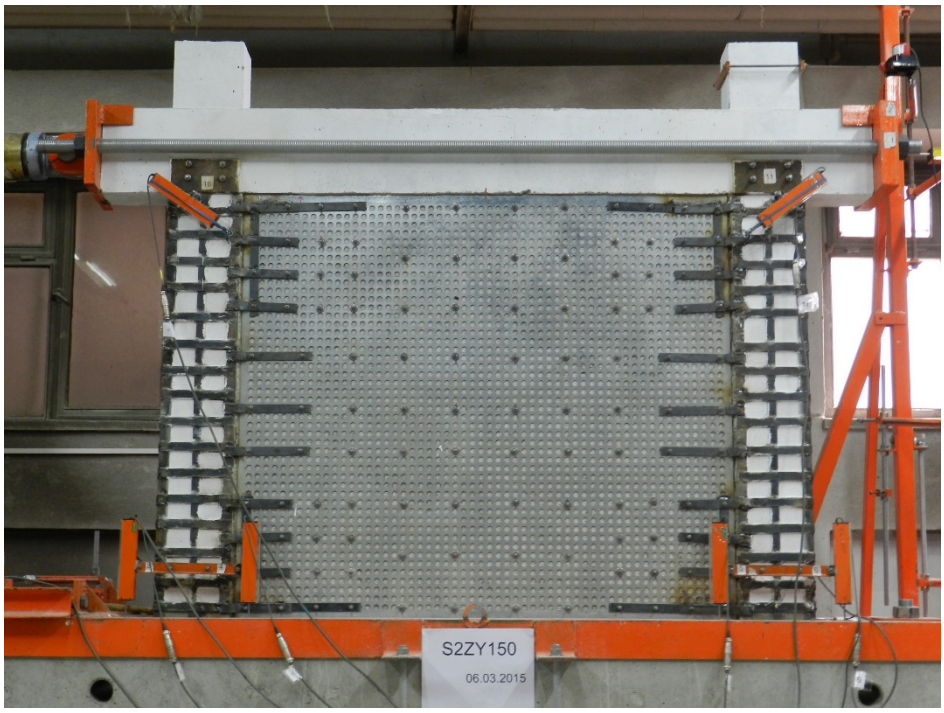


Şekil 5.14. S2ZY200 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.14. S2ZY150 Deneyi

Delikli çelik levha kalınlığı : 2 mm
Bulon aralığı : 150 mm
Kolonlara bağlantı : Var

Yukarıda özellikleri verilmiş S2ZY150 elemanı S2ZY200 elemanına benzer olarak üretilmiş olup tek farkı orta bölgede bulon aralığının 150 mm olmasıdır. Deneye hazır hale getirilmiş S2ZY150 elemanı Resim 5.44'de gösterilmiştir.

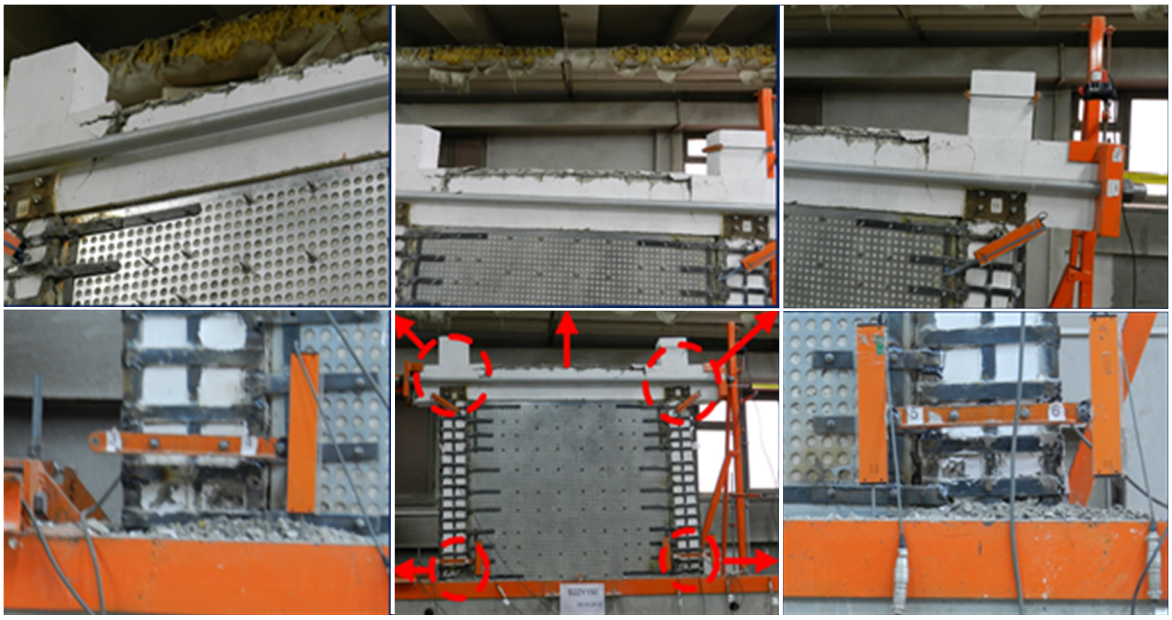


Resim 5.44. S2ZY150 deney elemanı

S2ZY150 deney elemanın davranışı S2ZY200 elemanıyla önemli benzerlikler göstermiştir. Betonarme çerçevede, kolonların alt ve üst uçlarında toplam dört adet ve kiriş açıklığında iki adet plastik mafsal oluşmuştur. Kolon alt ve üst uçlarında kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Diğer elemanlarda olduğu gibi bu elemanın da kiriş üst kısmında, gerçekte bu kısımda rijit bir tabliye olacağı için endişe verici olmayan aderans çatlakları oluşmuştur. Deneyin ileri aşamalarında kolonların uçlarında kısa konsol tipi kesme hasarından dolayı ötelenme olmuş, kiriş duvar üzerinde hareket etmiş, ancak bu ötelenme sınırlı kalmıştır. Kirişin duvara göre göreceli hareketinin, duvarın ve temelin üst yüzüne bakıldığında yaklaşık 15 mm olduğu görülmüştür (Resim 5.45).

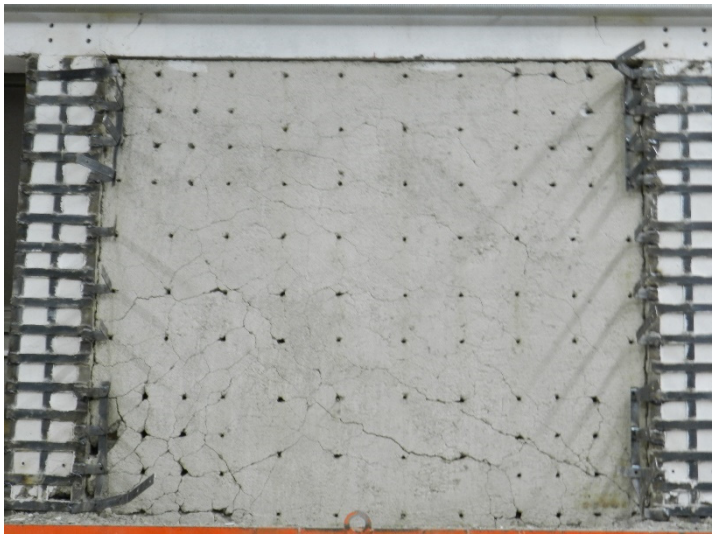
Kolon alt uçlarındaki plastik mafsallarda ilave kesme çatlakları da oluştuğu için hasarlar bu bölgede yoğunlaşmıştır. Kolonlarda çapraz kesme çatlakları ortaya çıkmış olsa da, davranışı etkileyen asıl kesme çatlağının kolon-temel ara kesitinde ortaya çıkan olduğu görülmüştür (Resim 5.45).

Duvar-kolon bağlantıları etkin bir şekilde çalışmış, duvarın kolona temas ettiği yüzeydeki ayrılma 2 mm seviyelerinde kalmıştır. Duvar köşelerindeki bulonların bazıları deneyin son aşamalarında kopmuştur. Duvar köşelerinde kullanılan "L" şeklindeki lamalar ve delikli levhanın 2 mm kalınlığında olması tuğla duvarın köşelerinde ezilme olmasını önlemiş, delikli levhada buruşma oluşmamış ve tuğla duvardaki çatlaklar oldukça sınırlı ve bölgesel düzeyde kalmıştır. Duvarda deney sonuna kadar önemli bir hasar oluşmamıştır (Resim 5.46).

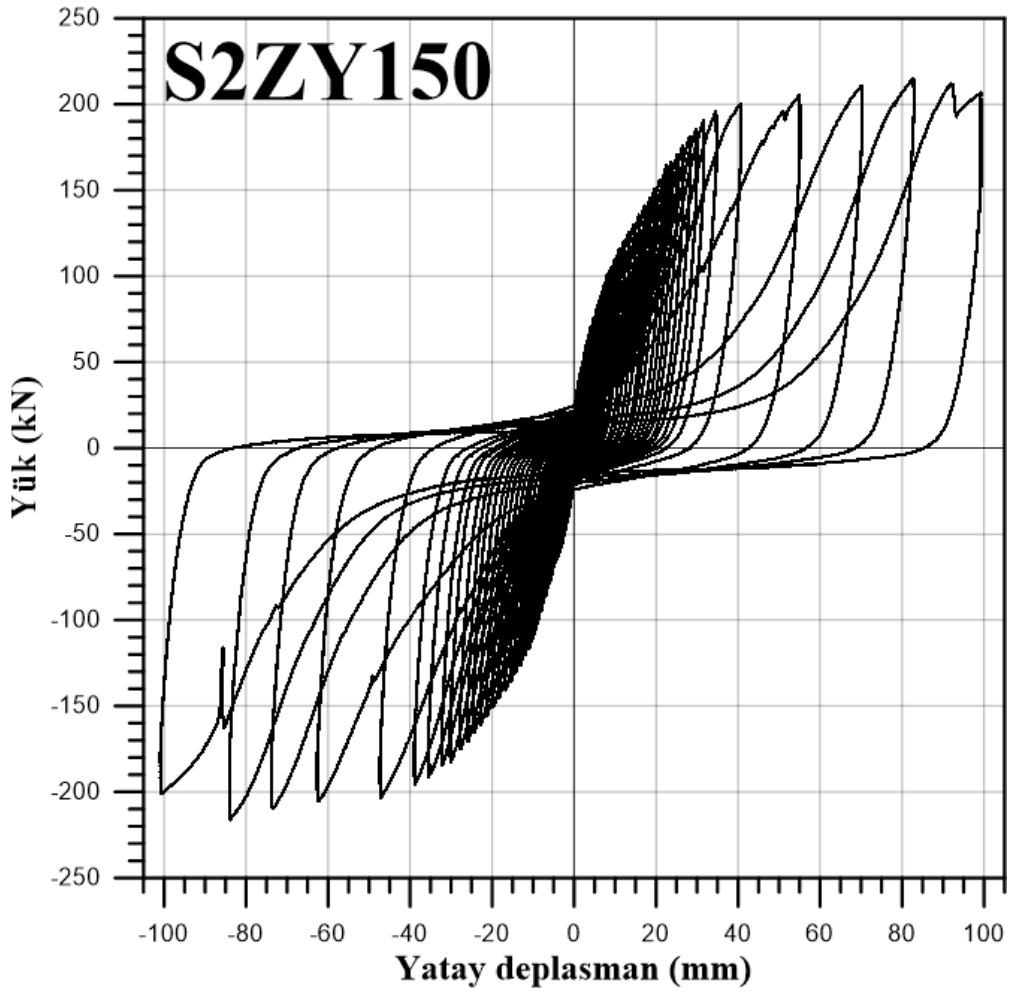


Resim 5.45. S2ZY150 deney elemanı göçme modu

Eleman, güçlendirilmiş duvarın da katkısıyla oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Deney elemanı ileri yönde 215 kN, geri yönde ise 216 kN maksimum dayanıma ulaşabilmiştir. Ek olarak ileri ve geri yönde %7,5'den büyük ötelenme oranlarında bile dayanımda önemli bir kayıp oluşmamıştır (Şekil 5.15).



Resim 5.46. S2ZY150'de tuğla duvar hasar durumu



Şekil 5.15. S2ZY150 deney elemanı yük-yatay deplasman ilişkisi

5.15. Deneysel Süreç Özeti

Güçlendirmiş ilk eleman olan S1ZN200 deneyi, duvar güçlendirme işleminin başarılı olabilmesi için kolonlarda ortaya çıkabilecek kesme kırılmasının önlenmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Bundan sonraki süreçte geliştirilen materyal ve yöntem ilavelerinin özeti Bölüm 4.3'de (bkz. Sayfa 28) verilmiştir.

S1.5ZY200 elemanının deneyinde düzlem dışı ötelenme problemi ortaya çıkmış, bu sorun S1.5ZY150 deneyinde yükleme düzeneğine yapılan ilave mekanizma ile aşılmıştır (bkz. Bölüm 5.8). Bu düzenek sonraki tüm deneylerde de başarıyla kullanılmaya devam edilmiştir.

R1 deneyinde yatay yükün verildiği temsili kiriş uçlarında beton dayanımının düşük, etriye sargılamasının yetersiz olmasından dolayı ezilmeler, ufalanmamalar ve dökülmeler oluşmuş; yükleme sisteminde sorun oluşturabilecek bu olumsuz durumun sınırlandırılabilmesi için bu temsili konstrüktif kiriş parçaları çelik profiller ve ard germeli gijonlarla sargılanarak R2, S1ZN200, S1ZN150 elemanlarında takviye edilmiştir. Bu, işe yarayan ancak teferruatlı işlem yerine, yeni üretilen diğer tüm elemanların, konstrüktif kirişlerinde etriye aralığı sabit tutulup, kalınlığı 8 mm'ye çıkarılmıştır. İmalatı kolaylaştırmak için bu etriyelerin kancaları 90 derece bükülmüş, birleşimler kaynakla yapılmıştır. Bu şekilde arttırılan sargılama basıncıyla oluşabilecek ezilme hasarları sınırlandırılmıştır.

S2ZN150 deneyinde sağ kolonun alt ucunun temele göre yatay ötelenmesini ölçmek amacıyla 25 mm genliğinde yeni bir potansiyometre de ilave edilmiştir (bkz. Resim 4.11). Bu ölçüm son iki deney olan S2ZY200 ve S2ZY150'de alınmaya devam edilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

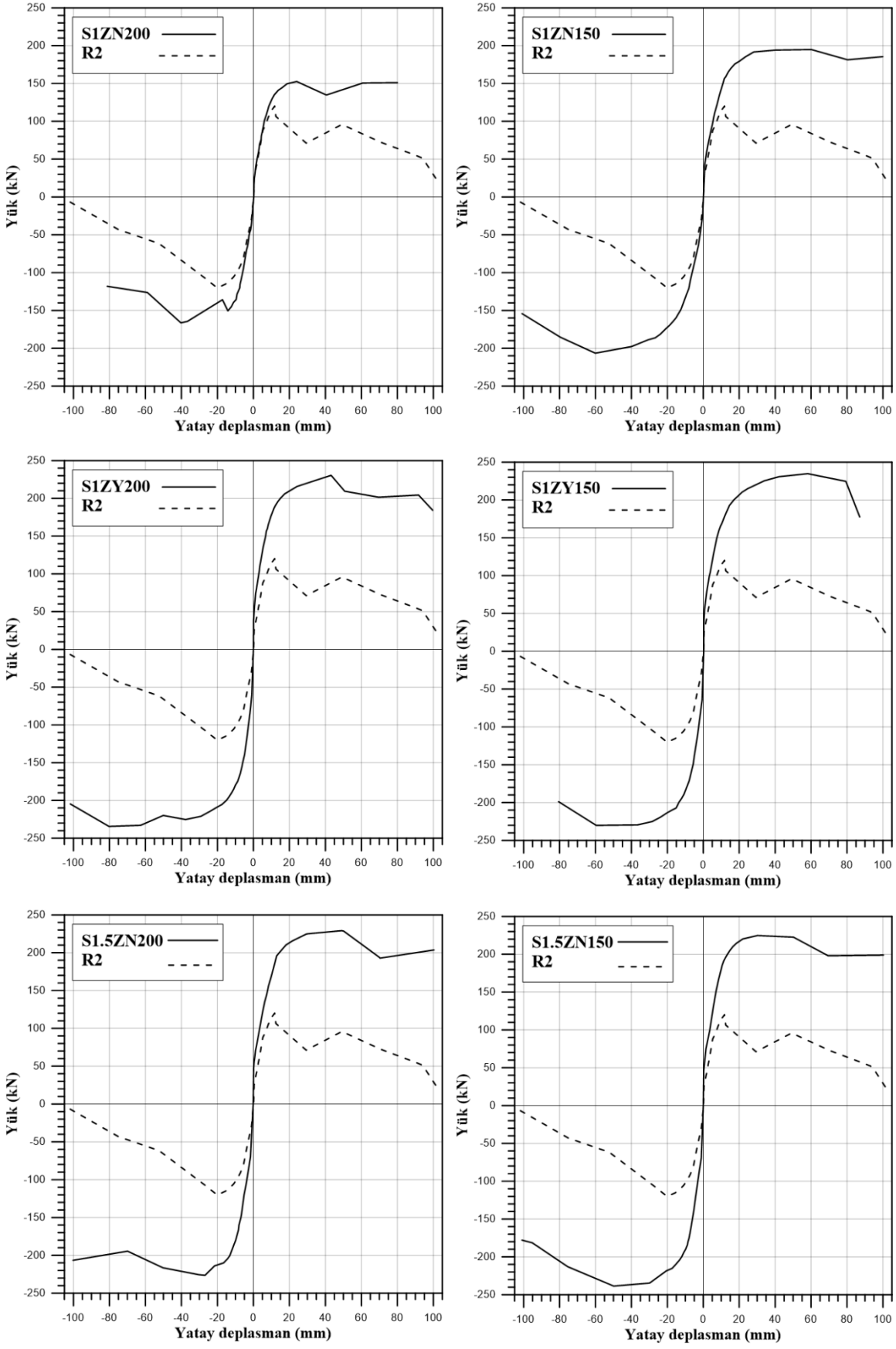
6.1. Genel

Bilindiği gibi depreme dayanıklı bir yapının temel olarak taşıma gücü, ötelenme rijitliği ve sünekliği yeterince yüksek olmalıdır. Bu bölümde deneylerden elde edilen veriler, bahsedilen üç temel şartı da içeren dayanım, süneklik, göreli kat ötelenme oranları, rijitlik ve enerji dönüştürme ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. İlgili bölümlerin başlığı altında verilerin nasıl analiz edildiği açıklanmıştır. Analizlerde çoğu zaman deneyde elde edilen yük-yatay deplasman grafiklerinin zarf eğrilerine başvurulmuştur. Bu eğriler her çevrimde oluşan tepe noktalarının doğrusal olarak birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Karşılaştırmada da kolaylık sağlamak amacıyla her bir güçlendirilmiş deney elemanının zarf eğrisi, tuğla dolgu duvarlı referans elemanına (R2) ait eğri ile birlikte Şekil 6.1 ve 6.2'de topluca verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.3'de ise yalın betonarme çerçeveden oluşan deney elemanı (R1) ile R2 zarf eğrileri birlikte aynı ölçekte verilmiştir.

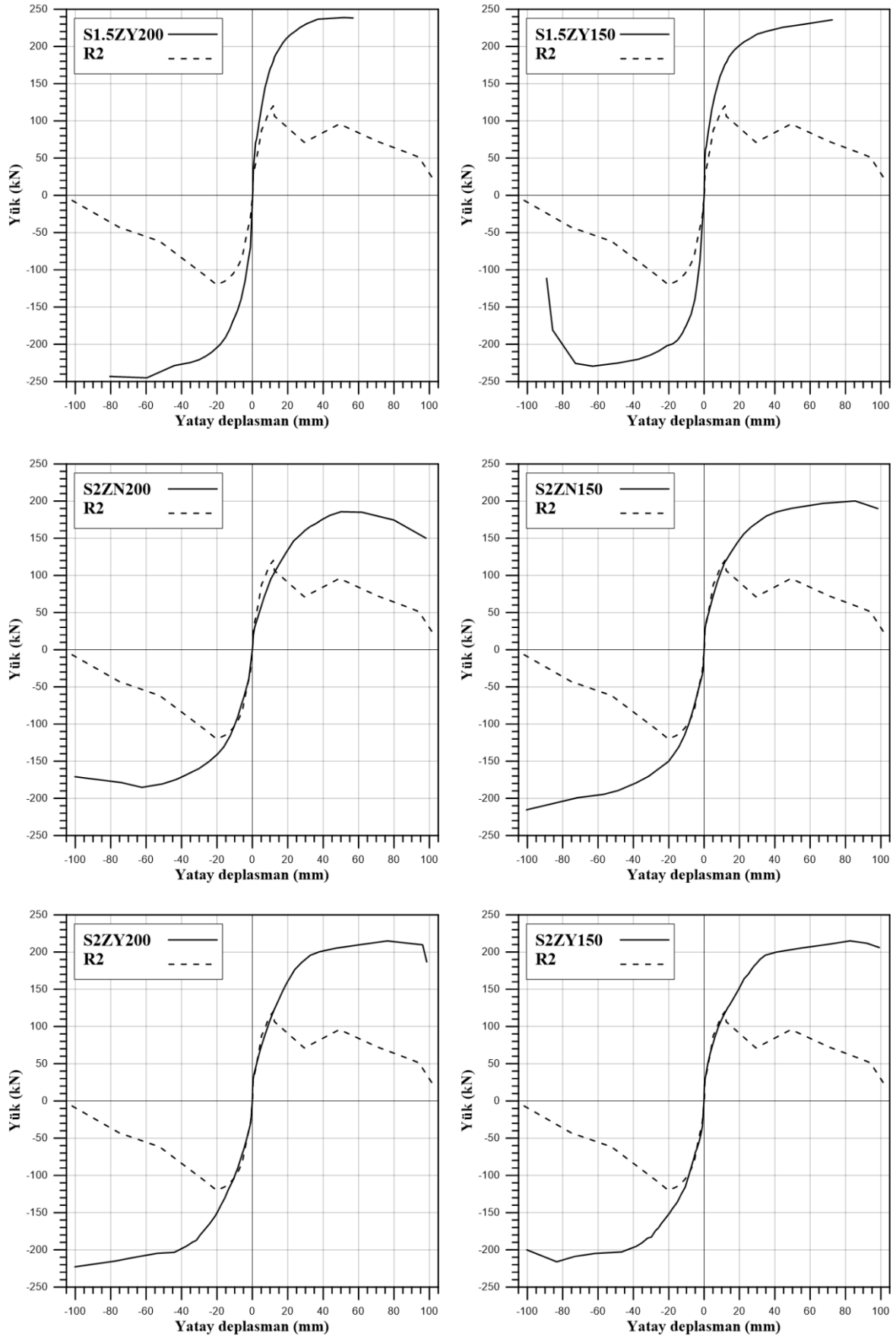
Birinci aşamada analizlerde yapılan karşılaştırmalar ve yorumlar daha çok referans elemanlarıyla güçlendirilmiş elemanlar arasında olmuştur. Bir başka deyişle bu aşamada referans elemanları ile güçlendirilmiş elemanlar arasındaki temel davranış farklılıkları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

İkinci aşamada ise deney parametrelerinin davranışı nasıl değiştirdiğini anlamak amacıyla güçlendirilmiş deney elemanları arasında sistematik karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar yapılırken genel davranış yorumlarından ve yine temel ölçütlerden (dayanım, süneklik, ötelenme oranları, rijitlik ve enerji dönüştürme) yararlanılmıştır.

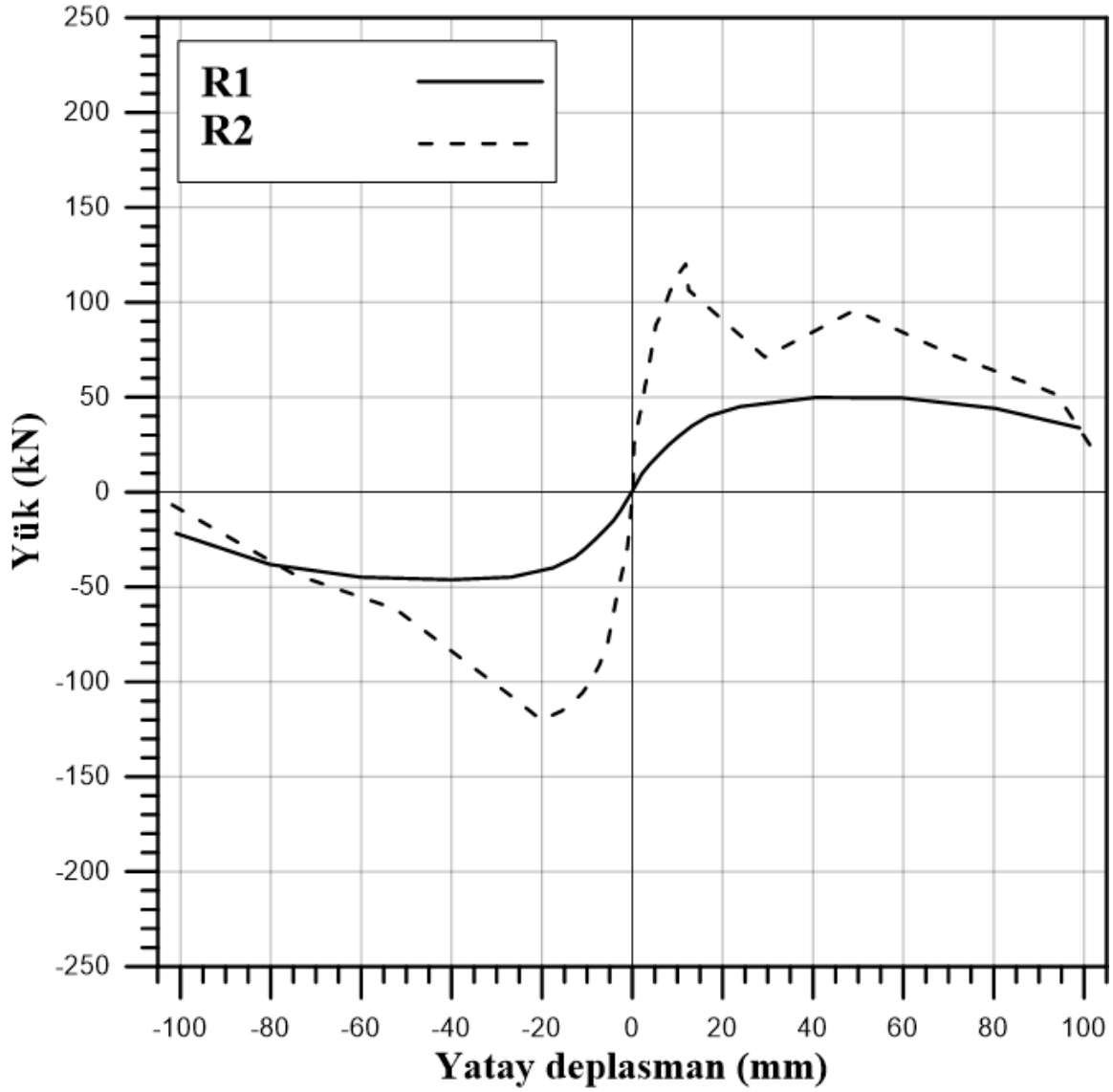
Üçüncü aşamada ise ötelenme ve dayanım oranları ölçütüne göre bu çalışmanın deneysel sonuçları ile geçmişte karbon lifli kumaşlar kullanarak yapılmış benzer deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.1. Güçlendirilmiş elemanların R2 ile karşılaştırmalı yük-deplasman zarf eğrileri (a)



Şekil 6.2. Güçlendirilmiş elemanların R2 ile karşılaştırmalı yük-deplasman zarf eğrileri (b)

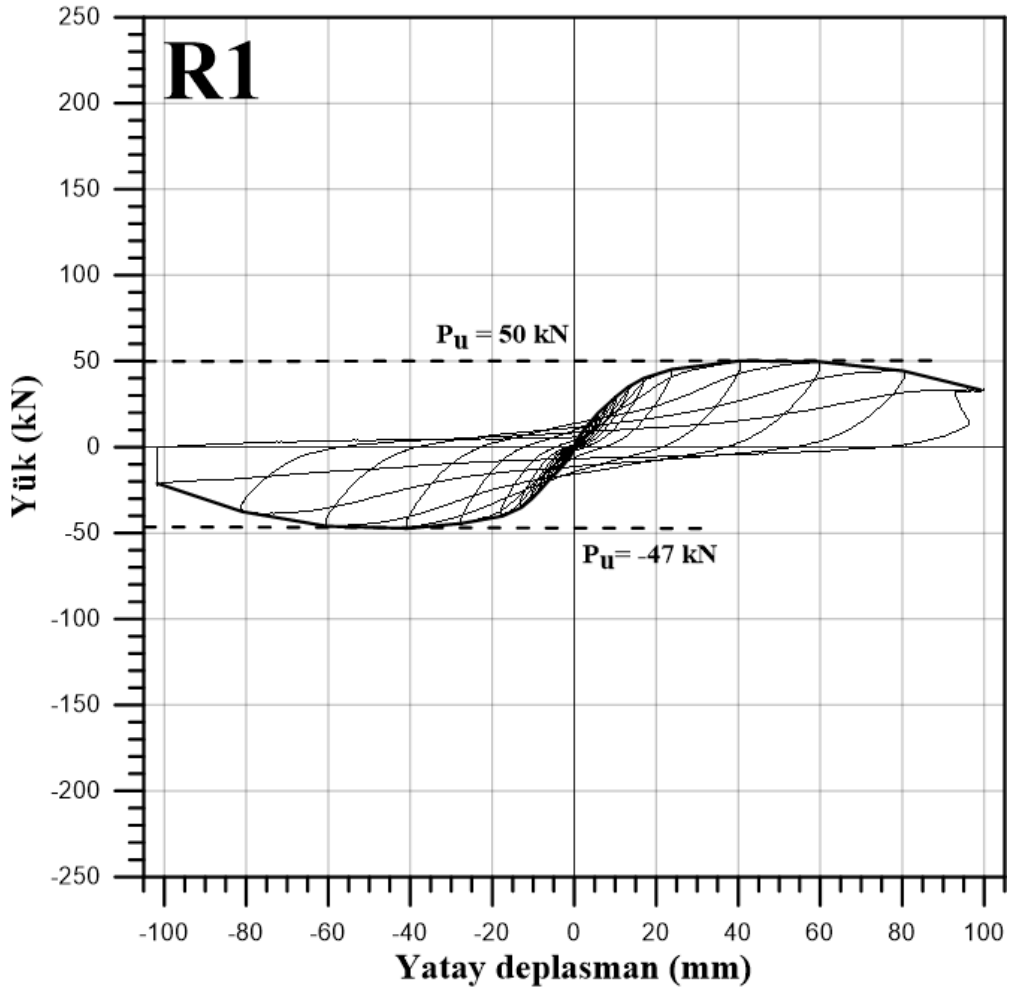


Şekil 6.3. R1 ve R2 referans elemanlarının yük-yatay deplasman zarf eğrileri

6.2. Temel Ölçütlere Göre Değerlendirmeler

6.2.1. Dayanım

Deney elemanlarının dayanımlarını belirlemek için öncelikle her deney elemanının yük-yatay deplasman zarf eğrileri çizilmiştir (Şekil 6.1, 6.2, 6.3). Ardından elde edilen zarf eğrilerinde ulaşılan en büyük yük değerleri ileri ve geri yönler için ayrı ayrı bulunmuştur. Örnek uygulama R1 elemanı için Şekil 6.4'de şematik olarak gösterilmiştir. Her eleman için bu şekilde bulunan en yüksek dayanım değerleri ise Çizelge 6.1'de özetlenmiştir. Çizelge 6.1'de gösterilmiş olan ortalama dayanım değerleri, ileri ve geri yöndeki çevrimlerde elde edilmiş maksimum iki yük değerinin aritmetik ortalamasıdır. Göreceli dayanım oranları ise referans elemanı R2 ve R1'e göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamada ise iki yönde elde edilen maksimum dayanımların ortalaması (P_{uort}) kullanılmıştır.



Şekil 6.4. R1 deney elemanında dayanımın bulunuşu

Çizelge 6.1. Deney elemanlarının dayanım değerleri

Deney Elemanı Adı	Maksimum Dayanım (kN) P_u		Ortalama Dayanım (kN) P_{uort}	Göreceli Dayanım R2'ye göre (kN/kN)	Göreceli Dayanım R1'e göre (kN/kN)
	İleri yön (+)	Geri yön (-)			
R1	+50	-47	49	0,41	1,00
R2	+120	-120	120	1,00	2,45
S1ZN200	+153	-165	159	1,33	3,24
S1ZN150	+194	-204	199	1,66	4,06
S1ZY200	+230	-234	232	1,93	4,73
S1ZY150	+235	-231	233	1,94	4,75
S1.5ZN200	+229	-227	228	1,90	4,65
S1.5ZN150	+225	-238	232	1,93	4,73
S1.5ZY200	+238	-244	241	2,01	4,92
S1.5ZY150	+236	-230	233	1,94	4,75
S2ZN200	+185	-185	185	1,54	3,76
S2ZN150	+200	-216	208	1,73	4,24
S2ZY200	+215	-223	219	1,83	4,47
S2ZY150	+215	-216	216	1,80	4,41

Hatırlanacağı gibi kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200'de; dayanımdaki artış Çizelge 6.1 incelendiğinde tuğla dolgu duvarlı referans elemanına (R2) göre sınırlı (1,3 kat) olmuştur. Onun dışında genel olarak Çizelge 6.1 incelenecek olursa; kolonların kesmeye karşı mantolanarak güçlendirilmesiyle birlikte delikli levhalarla yapılan takviyenin, R2'ye göre dayanıma sağladığı katkı yaklaşık 1,5 ile 2 kat arasında değişmiştir. Hiçbir deney elemanı delikli levhalarla takviye edilmiş tuğla duvarda oluşan hasarlardan ötürü taşıma gücüne ulaşmamıştır.

En yüksek dayanımlara delikli levhaların kolonlara bağlandığı deney elemanlarında ulaşılmıştır. Bu elemanların R2'ye göre dayanımındaki artışı en düşük 1,8, en yüksek 2,0 kat olmuştur. Aynı zamanda bahsi geçen bu altı elemanın dayanım değerlerinin aritmetik ortalaması alındığında R2 elemanına göre toplamda %90 genel bir artış sağlanmıştır (Çizelge 6.1).

Delikli levhaları kolonlara bağlanmayan deney elemanlarında dayanım artışının nispeten daha az olduğu görülmüştür. Kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200 elemanı değerlendirmeye alınmadığında R2'ye göre dayanımındaki artış en düşük yaklaşık 1,5, en yüksek 1,9 kat düzeyinde olmuştur. Aynı zamanda bahsi geçen bu elemanların dayanım değerlerinin aritmetik ortalaması alındığında R2 elemanına göre %75 dayanımda genel bir artış sağlandığı anlaşılmıştır (Çizelge 6.1).

Kolonlara bağlantı yönteminin dayanıma etkisinin genel sonucuna bakılacak olursa, bağlantının var olduğu elemanların yük kapasitesindeki artış daha kararlı ve daha yüksek olmuştur. Aynı zamanda ulaşılan nihai dayanımların standart sapması ise daha düşük çıkmıştır.

Bilindiği gibi çalışmada üç farklı kalınlıkta (1, 1,5, 2 mm) delikli levha kullanılmıştır. Deney elemanları levha kalınlıklarına göre gruplandırılıp dayanım değerlerinin aritmetik ortalaması alındığında R2 elemanına göre 1 mm levha kalınlığına sahip elemanlarda % 84, 1,5 mm levha kalınlığına sahip elemanlarda % 94, 2 mm levha kalınlığına sahip elemanlarda ise % 73 dayanımda genel bir artış sağlandığı anlaşılmıştır (Çizelge 6.1). Levha kalınlığının arttırılması görüldüğü gibi her zaman beraberinde dayanım artışını getirmemiştir. Bu durumun sebepleri şöyle yorumlanmaya çalışılmıştır.

Deneylerin gelişimi takip edilecek olursa, delikli levha takviyesiyle birlikte tuğla duvarın güçlenerek betonarme çerçevede ani kesme kırılmasına sebebiyet vermiş olduğu görülmüştür (bkz. S1ZN200 deneyi). Daha sonra kolonlarda kesmeye karşı güçlendirilmiş ve 1 ile 1,5 mm delikli levha kalınlığına sahip deney elemanlarında tuğla duvar ve betonarme çerçeve beraber etkin bir şekilde çalışmıştır. Bu elemanlarda kolon uçlarında sadece eğilme hasarları oluşmuştur. Dolgu duvarın takviyesinde 2 mm kalınlığındaki delikli levhalar kullanılmaya başlandığında, duvar biraz daha rijit olmuş, ancak çerçeve

nispeten yine daha zayıf kalmıştır. Bu durumda kolon uçlarında eğilme hasarlarıyla beraber kesme hasarları da oluşmuştur. Yalnız bu kesme hasarı S1ZN200'deki gibi çok tehlikeli ve ani olandan değil, kolon-temel birleşim ara kesitinde kısa konsollardakine benzer ötelenme hasarı şeklinde gerçekleşmiştir. Betonarme çerçevenin kolonlarında oluşan bu ek zorlanmaların, dayanımdaki göreceli artış beklentisini az da olsa olumsuz etkilediği düşünülmüştür. Bununla beraber 2 mm levha kalınlığına sahip deney elemanlarında beton dayanımı ön görülenden (10MPa) az çıkmakla beraber, özellikle 1,5 mm levha kalınlığına sahip elemanların beton dayanımından en az %50 daha düşük olduğu hesaplanmıştır (bkz Çizelge 4.4). Bu durumun betonarmede basit eğilme davranışına önemli etkisi olmasa da kesit kesme kapasitesini ve aderansı önemli ölçüde düşürdüğü bilinmektedir.

Çalışmada iki farklı bulon aralığı (150, 200 mm) parametre olarak kullanılmıştır. Çizelge 6.1'e göre güçlendirilmiş deney elemanları bulon aralıklarına göre toplam iki gruba ayrılıp dayanım değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Daha sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek amacıyla kolonları kesmeye karşı mantolanarak güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200 elemanı ile aynı elemanın 150 mm bulon aralığında karşılığı olan ancak kolonları mantolanmış S1ZN150 elemanının dayanım değerleri hesap dışı bırakılmıştır. Hesap sonucunda referans R2 elemanına göre 200 mm bulon aralığına sahip elemanlarda % 85, 150 mm bulon aralığına sahip elemanlarda % 87 dayanımda genel bir artış sağlandığı anlaşılmıştır.

Görüldüğü gibi bulon aralığının 200'den 150 mm'ye düşürülmesi çarpıcı bir dayanım artışını beraberinde getirmemiştir. Hatta dayanımı birçok parametreye bağlı olan ve standart sapması oldukça yüksek olan tuğla duvarlarda, sınırlı sayıdaki deney sonucunun getirdiği % 2 lik bir artışın, tamamen tesadüfü olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

Ancak geçmiş çalışmaların sonucu [5,6] bulon aralığının düşürülmesinin duvar dayanımını oldukça önemli düzeyde arttırabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada ise yaklaşık eşit çıkmasının sebebi gerilme yığılmalarının oldukça yoğun olduğu kritik köşe bölgelerinde standart bazı önlemlerin alınmış olmasına bağlanabilir (bkz Resim 4.4).

Betonarme çerçevenin içine tuğla dolgu duvar yapılmasıyla elde edilen referans elemanının (R2) dayanımı, sadece betonarme çerçeveden oluşan referans deney elemanına (R1) kıyasla yaklaşık 2,5 kat daha fazla çıkmıştır. Tuğla duvar imalatı elemanın kapasitesini boş çerçeveye göre 50 kN'dan 120 kN'a çıkarmıştır (bkz Çizelge 6.1).

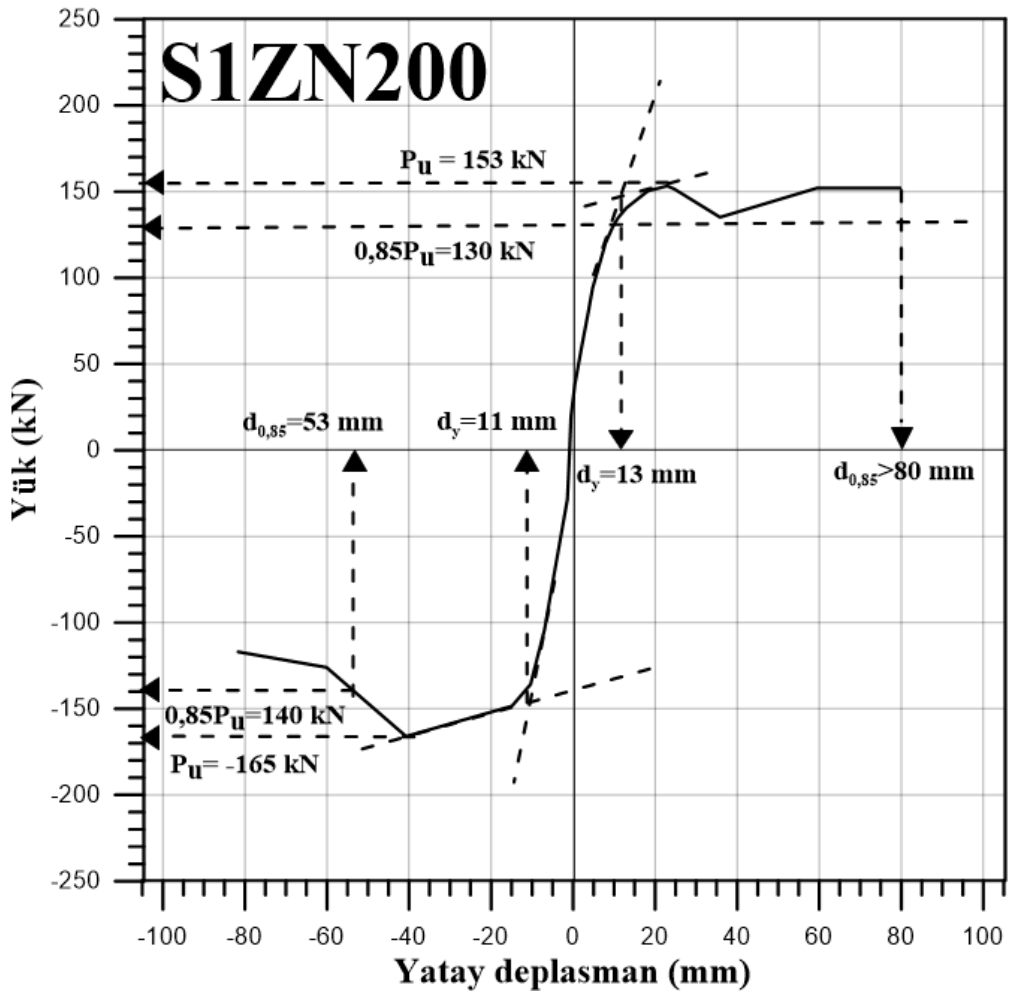
Kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200'deki dayanım artışı incelendiğinde, R1'e göre nispeten sınırlı (3,2 kat) kalındığı görülmüştür (bkz. Çizelge 6.1). Onun dışında genel olarak Çizelge 6.1 incelenecek olursa; kolonların kesmeye karşı mantolanarak güçlendirilmesiyle birlikte delikli levhalarla yapılan takviyenin, R1'e göre dayanıma sağladığı katkı yaklaşık 3,7 ile 5 kat arasında değişmiştir.

6.2.2. Süneklik

Yapıların şiddetli depremlerde ayakta kalmasını sağlayan bir diğer önemli unsurun ise sünek davranış gösterebilmesi olduğu bilinmektedir [51]. Süneklik, dayanımda önemli bir kayıp olmadan elemanın deformasyon yapabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu alandaki yaygın görüşler önemli kayıpla kast edilen değerin %15 olabileceği konusunda hem fikir olmuştur. Süneklik oranı ise elemanın dayanımında önemli kaybın yaşandığı deformasyon değerinin (süneklik deformasyonu), elemanın akma deformasyonuna bölünmesiyle elde edilmektedir.

Bu çalışmada süneklik oranlarının analizi için elemanların yük-deplasman zarf eğrileri kullanılmıştır (Şekil 6.1, 6.2, 6.3). Hesaplarda kullanılan süneklik deformasyon değeri ($d_{0,85}$) maksimum yükte %15 kaybın yaşandığı noktaya karşılık alınmıştır. Akma deformasyonu (d_y) ise bilindiği gibi zarf eğrilerinde elemanın rijitliğinin büyük ölçüde değişerek eğrinin yataya yakın eğimde gitmeye başladığı noktanın deformasyonu olmaktadır. Ancak çalışmadaki zarf eğrileri incelendiğinde akma deformasyonu belirgin tek bir nokta ile ifade edilememiştir (Şekil 6.1, 6.2, 6.3). Bir başka deyişle, akma bir süreç içinde gerçekleşerek akmanın başladığı nokta ile bittiği nokta uzun ve doğrusal olmayan bölge oluşturmuştur. Bu durumda yaklaşık bir akma noktası belirlemek amacıyla, akmanın başladığı ve bittiği kestirilen noktalardan zarf eğrisine en uygun doğrusal dış teğetler geçirilmiş ve bu teğetlerin kesiştiği tepe noktasına karşı gelen deformasyon değeri, akma deformasyonu (d_y) olarak kabul edilmiştir. Örnek uygulama S1ZN200 elemanı için Şekil

6.5'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu örnekte de görüldüğü gibi süneklik oranının doğruluğu, akma deformasyonunun doğruluğuna bağlı olmaktadır. Bu noktanın ifade zorluğunun yanında daha önceki bölümlerde aktarıldığı üzere, deney elemanlarının hepsi aynı mekanizma ile göçmeye ulaşmamıştır. Göçme moduna bazı elemanlarda eğilme davranışı, bazı elemanlarda kesme davranışı, bazılarında ise ikisi birden hakim olmuştur. Üstelik bazı elemanlarda farklı yerlerde plastik mafsallar oluşmuştur. Birbirinden farklı davranışların akma deformasyonları kullanılarak kıyaslanmasının pek de doğru olmayacağı kanısına varılmıştır. Bunun yerine tüm sistem hakkında süneklik açısından genel bilgi verebilecek, süneklik deformasyon değerleri kullanılarak hesaplanan kat ötelenmelerinin karşılaştırılmasının daha uygun ve gerçekçi olabileceği düşünülmüştür. Yine de fikir vermesi açısından tüm deney elemanlarına ait süneklik ve akma deformasyonları değerleri, süneklik oranları ve R2'ye göre göreceli oranları hem ileri hem de geri yön için ayrı ayrı Çizelge 6.2'de topluca sunulmuştur.



Şekil 6.5. S1ZN200'de akma ve süneklik deformasyonları analizi

Çizelge 6.2. Süneklik terimleri ve oranları

Deney Elemanı Adı	Süneklik Deformasyonu ($d_{0,85}$) (mm)		Akma Deformasyonu (d_y) (mm)		Süneklik oranları ($d_{0,85}$/ d_y((mm/mm)		Göreceli Süneklik (R2'ye göre)	
	İleri yön (+)	Geri yön (-)	İleri yön (+)	Geri yön (-)	İleri yön (+)	Geri yön (-)	İleri yön (+)	Geri yön (-)
R1	83	75	19	16	4,3	4,7	3,6	1,6
R2	15	30	12	10	1,2	3,0	1,0	1,0
S1ZN200	>80	53	13	11	>6	4,8	>5	1,6
S1ZN150	>100	88	16	13	>6,2	6,8	>5,2	2,3
S1ZY200	95	>100	17	10	5,6	>10	4,7	>3,3
S1ZY150	84	>80	15	11	5,6	>7,3	4,7	>2,4
S1.5ZN200	>100	>100	15	13	>6,7	>7,7	>5,6	>2,6
S1.5ZN150	>100	83	15	11	>6,7	7,5	>5,6	2,5
S1.5ZY200	>58	>80	15	11	>3,9	>7,3	>3,2	>2,4
S1.5ZY150	>73	82	14	8	>5,2	>10,2	>4,3	>3,4
S2ZN200	93	>100	21	17	4,4	>5,9	3,6	>2
S2ZN150	>100	>100	19	17	>5,3	>5,9	>4,4	>2
S2ZY200	>100	>100	19	20	>5,3	>5,0	>4,4	>1,7
S2ZY150	>100	>100	19	20	>5,3	>5,0	>4,4	>1,7

Çizelge 6.2 incelenirken şu noktaları göz önünde bulundurmakta fayda olacaktır. Bazı değerlerin önüne büyüktür (>) işareti yerleştirilmiştir. Bu işaret deneyin sonuna gelindiğinde maksimum yükte henüz %15'lik bir kaybın oluşmadığını belirtmek için kullanılmıştır. Süneklik deformasyonu ($d_{0,85}$) ">100mm" olarak tanımlanmış deneylerde ise ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için test sonlandırılmıştır. S1ZN200 elemanında kolon üst uçlarında kesme kırılması olmuştur. S1.5ZY200 elemanında ise daha önce bahsedilmiş olan ileri düzeyde düzlem dışı ötelenme meydana geldiği için deneye devam edilememiş ve bu noktaya kadar da yükte herhangi bir kayıp olmamıştır. Diğer bütün ">" işareti konan deneylerde, kolon alt uçlarından birinin temelle birleşen kesitindeki

donatıların tamamına yakınının kopması sebebiyle diğer yönde yükte önemli kayıp olmamasına rağmen teste devam edilememiştir.

Sadece betonarme çerçeveden oluşan referans deney elemanı (R1) sünek davranmış ve süneklik oranı yaklaşık 4,5 çıkmıştır. Betonarme çerçevenin içine tuğla dolgu duvar yapılmasıyla elde edilen referans elemanının (R2) kolonlarında kesme kırılması oluşmuş ve sünek bir davranış sergilememiştir. Yani sünek davranış gösteren betonarme çerçeve içine tuğla duvar örülmesiyle beraber gevrek davranış sergilemeye başlamıştır (bkz. Çizelge 6.2).

Kolonlarında kesmeye karşı önlem (çelik manto) alınarak delikli levhalarla güçlendirilen bütün elemanlar sünek davranmışlardır. Bir başka deyişle gevrek davranış gösteren tuğla duvarlı betonarme çerçeveler yapılan takviyelerden sonra oldukça sünek davranmaya başlamıştır. Elde edilen sünek davranış düzeyi şöyle de ifade edilebilir. Bilindiği gibi yapısı gereği yalın betonarme çerçeveler minimum şartlar sağlandığında genelde sünek davranış göstermektedir. R1 elemanında etriye aralıkları ve beton dayanımı, mevcut deprem yönetmeliği (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007) minimum koşullarının bile oldukça altında olmasına rağmen, davranış sünek olmuştur. Güçlendirilmiş bütün deney elemanları ise referans R1 elemanından bile daha sünek davranmıştır. Bazı deneylerde 10'dan büyük süneklik oranlarında bile dayanımda kayıp olmamıştır (bkz. Çizelge 6.2).

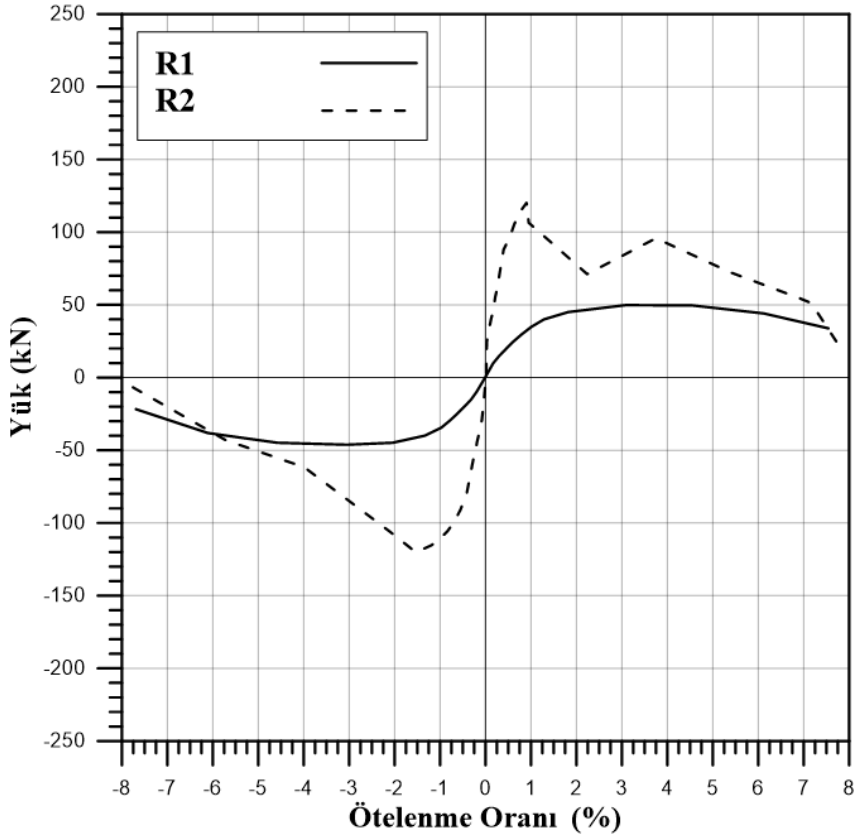
Bilindiği gibi S1ZN200 deneyinde, kolonlarda kesme kırılması gerçekleştiği için delikli levhalarla takviye edilmiş tuğla duvarın davranışa etkisi tam olarak anlaşılamamış, süneklik sınırlı kalmıştır. Ancak kolonlarda kesmeye karşı önlem (çelik manto) alınmasıyla beraber delikli levhalarla güçlendirilen bütün elemanlar sünek davranmışlardır. Yapılan çalışma, delikli levhalarla yapılan takviyenin süneklik konusunda iyileşme sağlayabilmesi için kolonlarda yeterli kesme güvenliğinin olması gerektiğini göstermiştir. Sonuçta delikli levhalar, kolonlarında kesmeye karşı takviyesiyle gevrek davranış gösteren bir sistemi şaşırtıcı ölçüde sünek duruma getirmiştir.

6.2.3. Ötelenme oranı

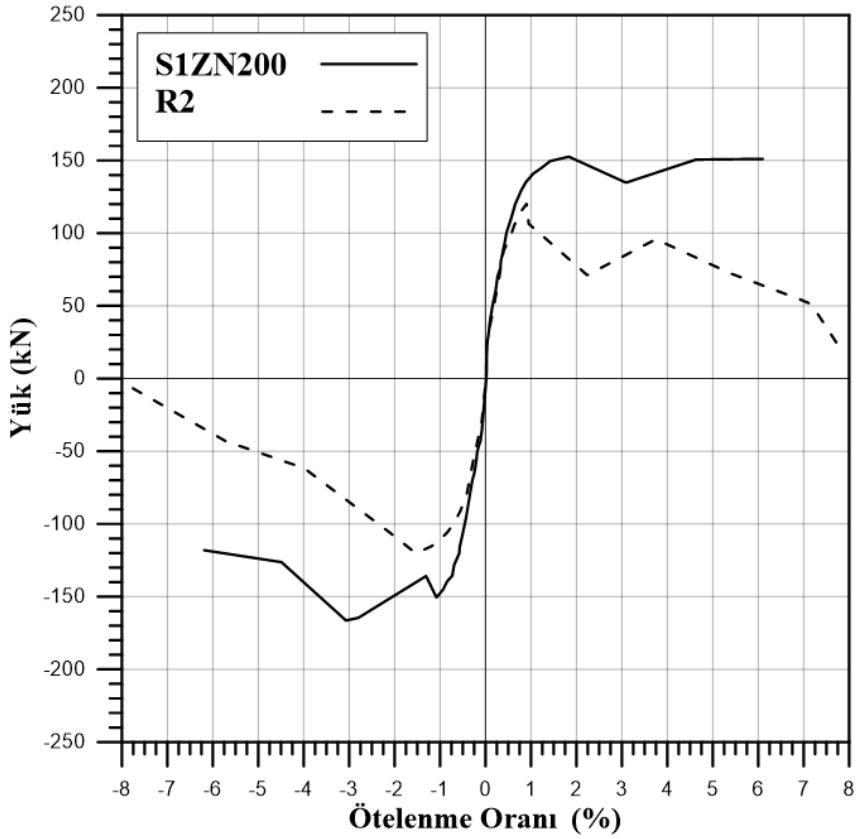
Göreli kat ötelenmesi; mevcut deprem yönetmeliğinde kolon veya perdenin alt ve üst uçları arasındaki yer değiştirme farkının elemanın yüksekliğine bölünmesiyle elde edilmektedir [52]. Deneysel çalışmada yatay ötelenmeler, sağlıklı bir ölçüm için kiriş merkez ekseni doğrultusunda alınmıştır. Kolon üst ucuna göre bu ölçümlerde normalizasyon yapıp kolon yüksekliğine oranlamaktansa, gerçek veriler kullanarak ölçüm alınan noktanın yatay ötelenmesi yine o noktanın temel üst yüzüne olan mesafesine (1330 mm) bölünmüş ve her yatay yük değeri için ötelenme oranları bulunmuştur.

Deney elemanlarına ait en yüksek ötelenme oranlarını bulmak amacıyla her deney elemanı için yatay yük-ötelenme oranı zarf eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler de yük-yatay deplasman zarf eğrilerine benzer olarak oluşturulmuş, ancak yatay eksende deplasman değerleri yerine, bu değerler kullanılarak bulunan ötelenme oranları yüzde olarak yazılmıştır. Karşılaştırmada da kolaylık sağlamak amacıyla her bir deney elemanının zarf eğrisi, tuğla dolgu duvarlı referans elemanı (R2) ile birlikte Şekil 6.6-6.18 arasında topluca verilmiştir.

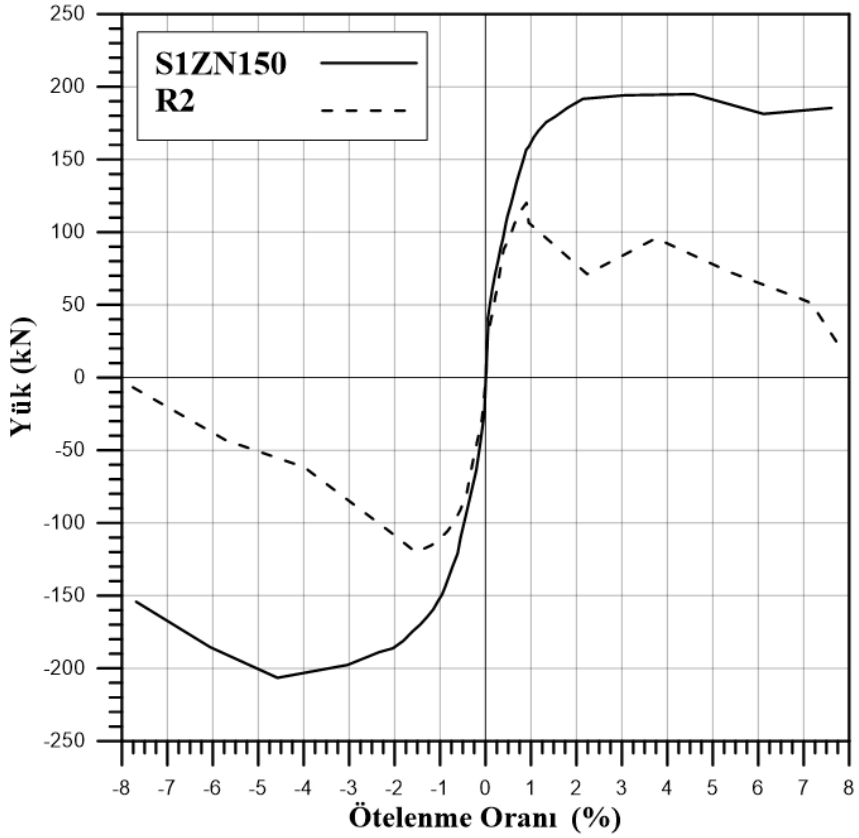
Zarf eğrilerinde maksimum yükte %15 kaybın yaşandığı noktaya karşılık gelen ötelenme oranı en yüksek ötelenme oranı olarak alınmıştır. Örnek uygulama S1ZN200 elemanı için Şekil 6.19'da şematik olarak gösterilmiştir. Her eleman için bu şekilde bulunan en yüksek ötelenme oranı değerleri ile R2 ye göre göreceli oranları hem ileri hem de geri yön için ayrı ayrı Çizelge 6.3'de topluca sunulmuştur. Çizelge 6.3'de gösterilmiş olan ortalama en yüksek ötelenme oranı değerleri, ileri ve geri yöndeki çevrimlerde elde edilmiş maksimum iki ötelenme değerinin aritmetik ortalamasıdır.



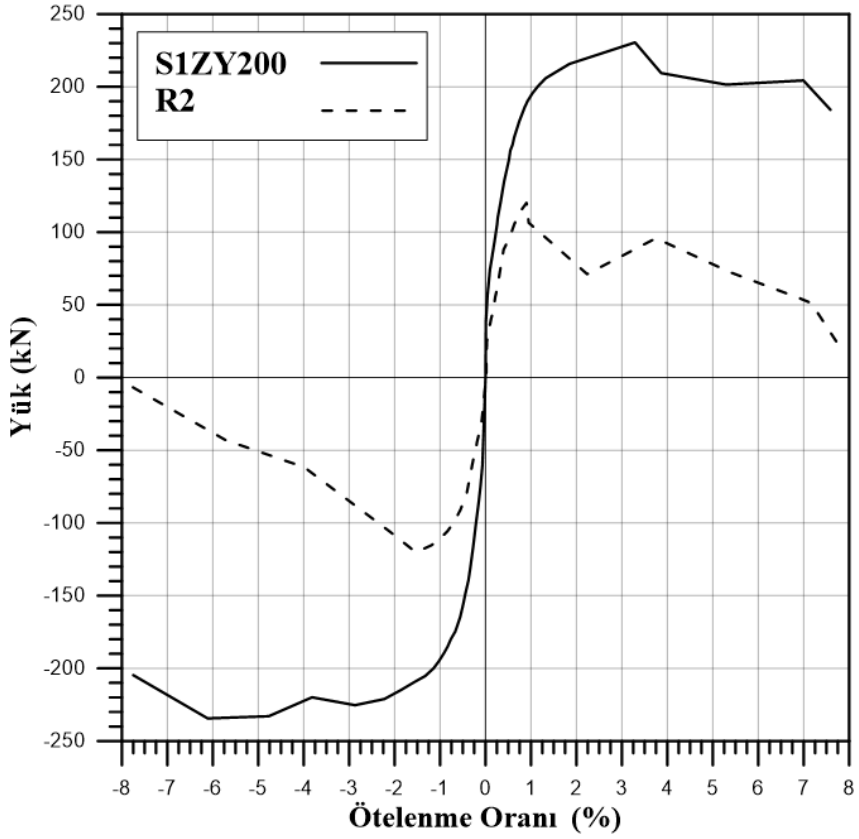
Şekil 6.6. R1 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



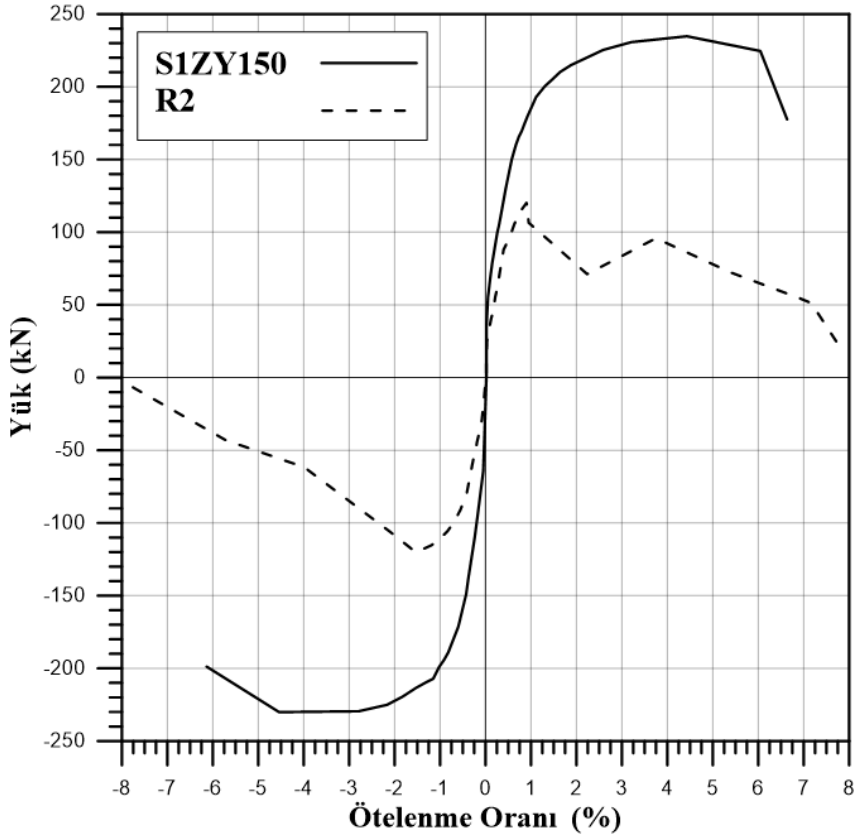
Şekil 6.7. S1ZN200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



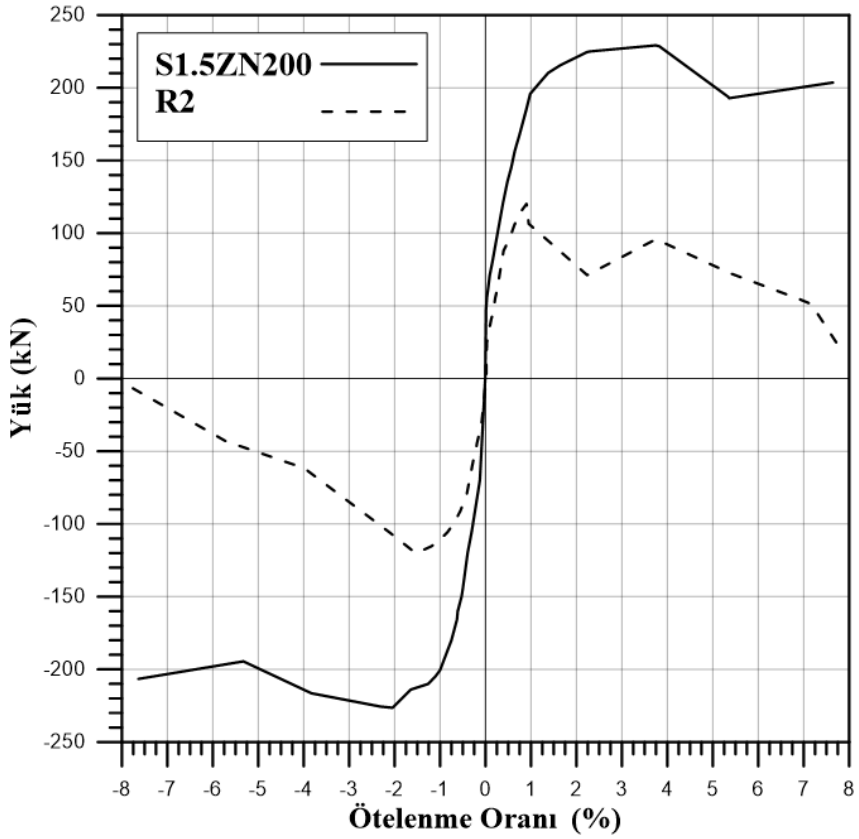
Şekil 6.8. S1ZN150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



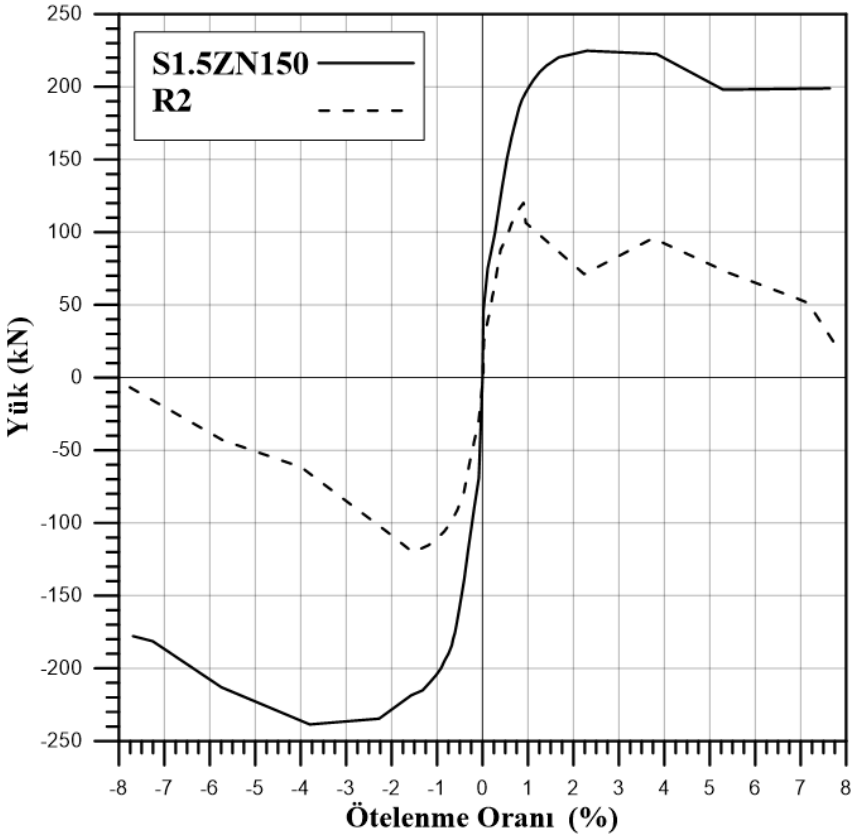
Şekil 6.9. S1ZY200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



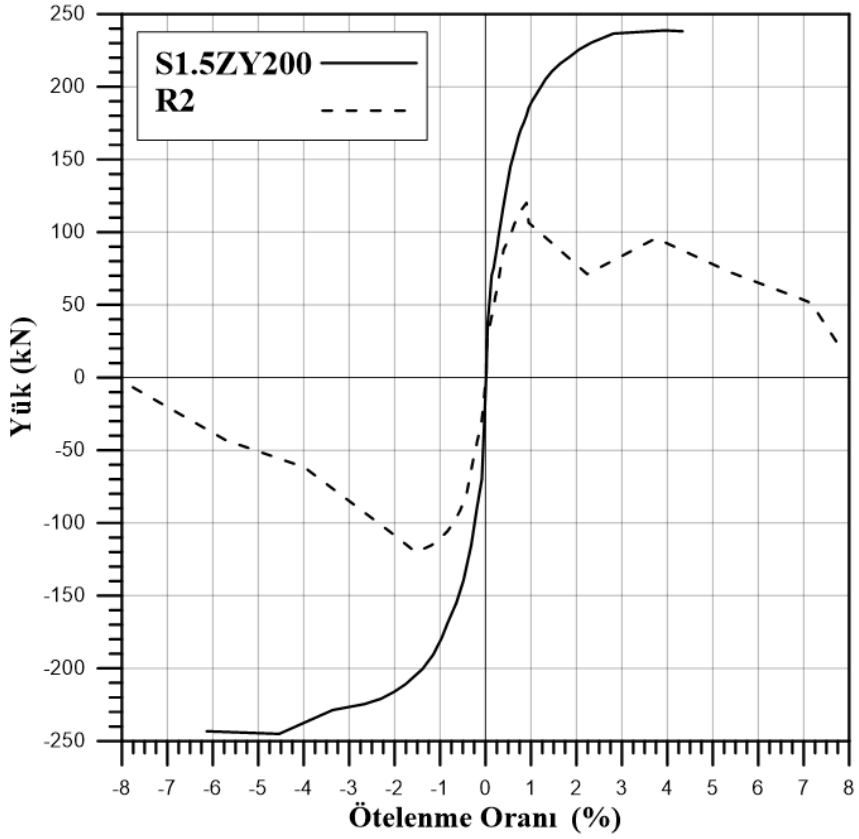
Şekil 6.10. S1ZY150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



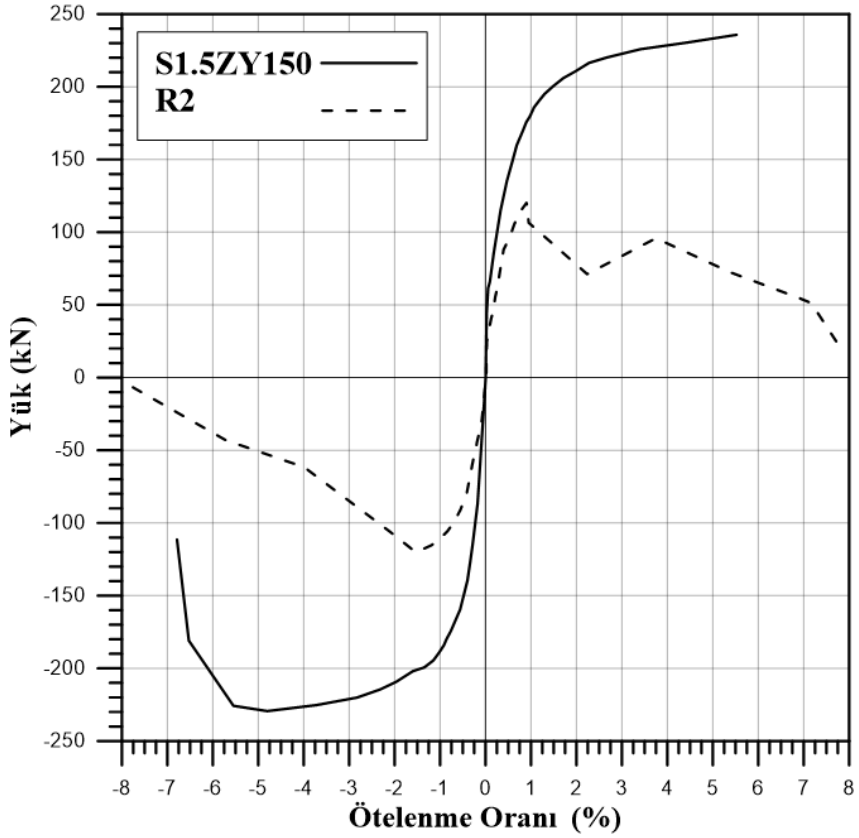
Şekil 6.11. S1.5ZN200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



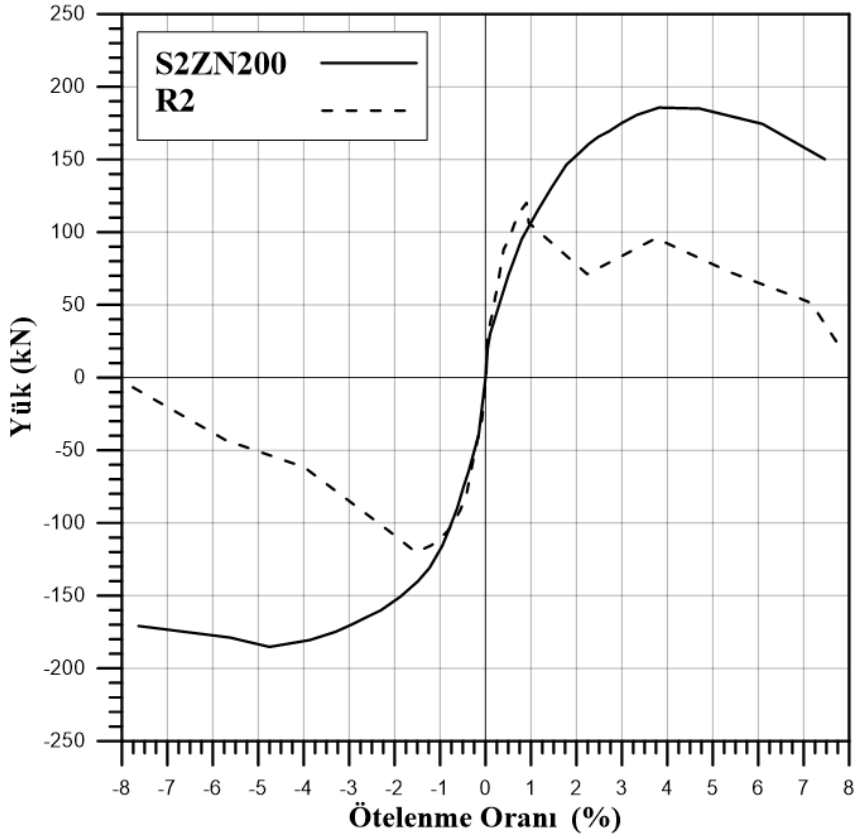
Şekil 6.12. S1.5ZN150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



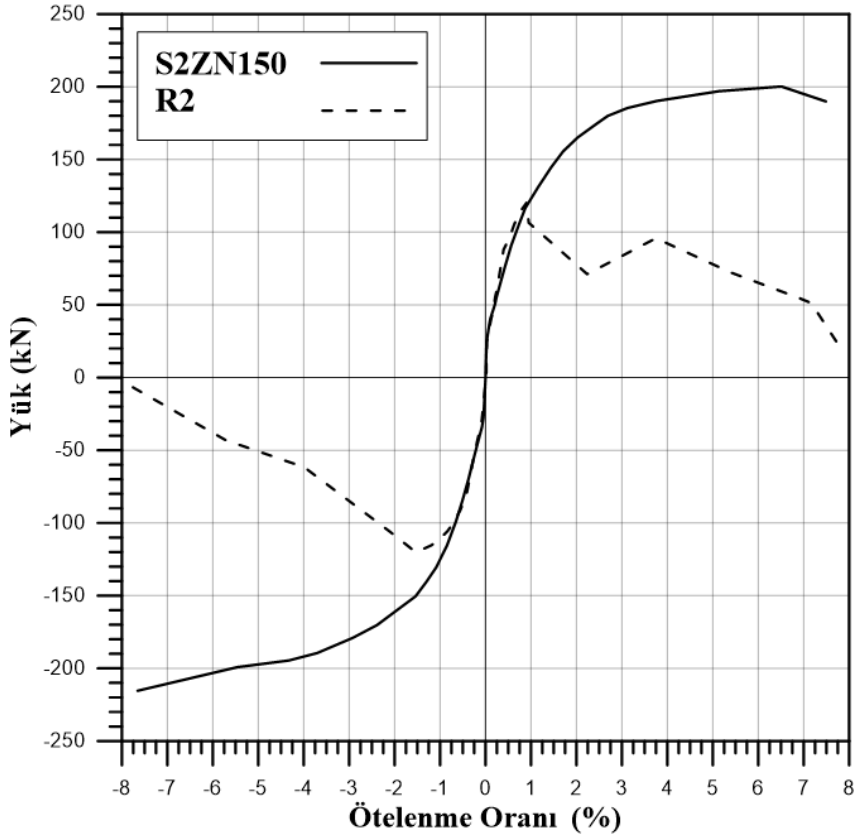
Şekil 6.13. S1.5ZY200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



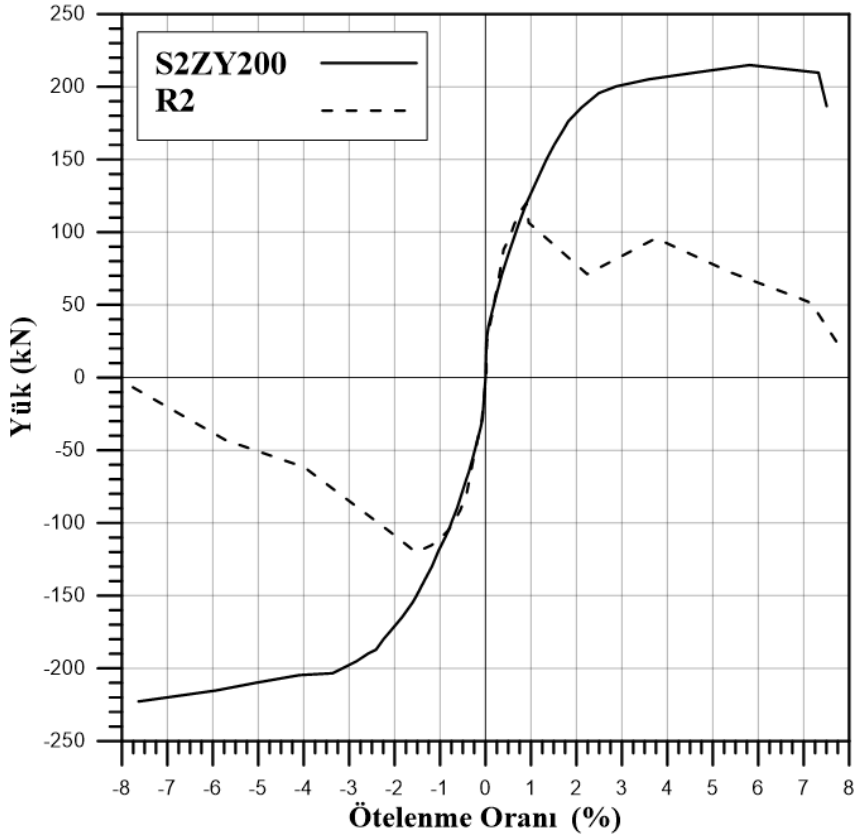
Şekil 6.14. S1.5ZY150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



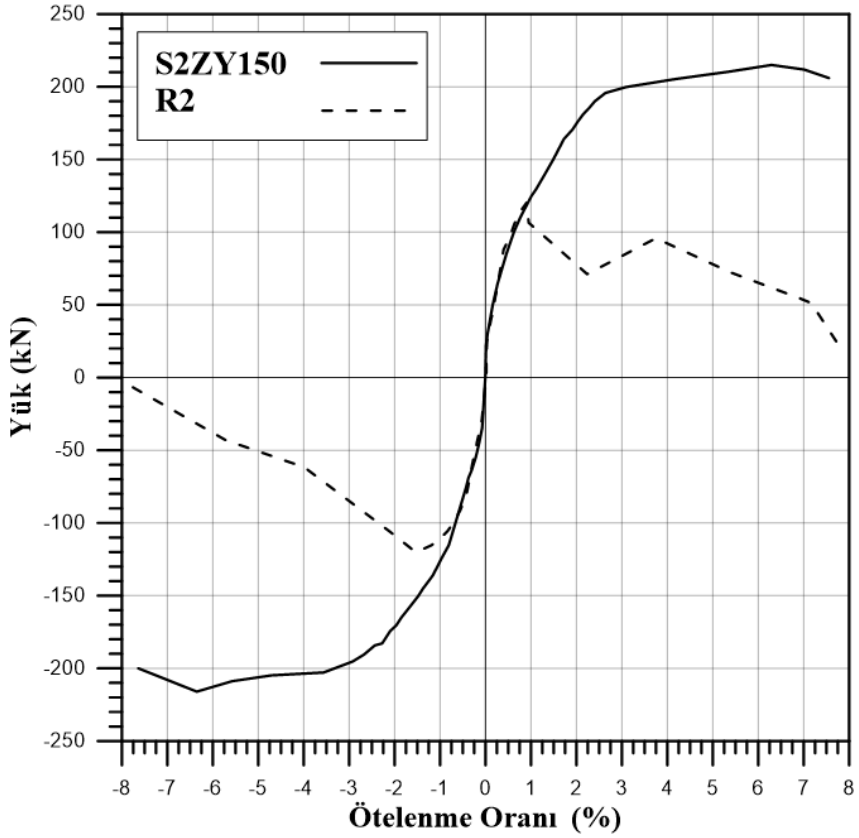
Şekil 6.15. S2ZN200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



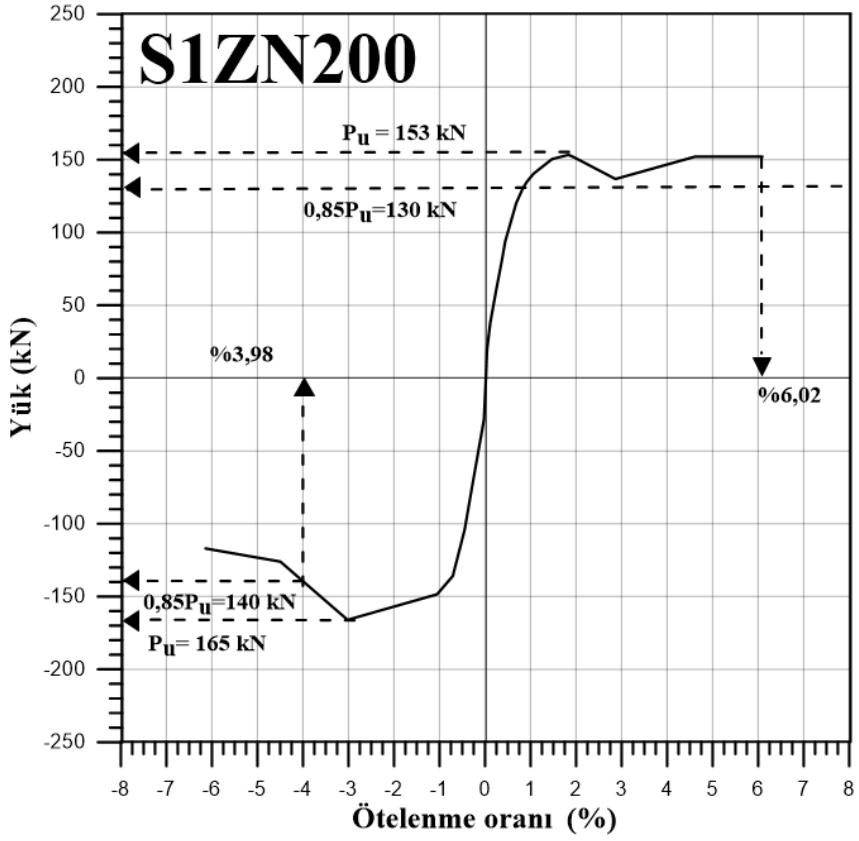
Şekil 6.16. S2ZN150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



Şekil 6.17. S2ZY200 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



Şekil 6.18. S2ZY150 ve R2 elemanlarının yük-ötelenme oranı zarf eğrileri



Şekil 6.19. S1ZN200'de en yüksek ötelenme oranı analizi

Çizelge 6.3. En yüksek ötelenme oranları

Deney Elemanı Adı	Süneklik Deformasyonu ($d_{0,85}$) (mm)		En yüksek ötelenme oranı (%)		Ortalama en yüksek ötelenme oranı (%)	Ortalama göreceli ötelenme (R2'ye göre)
	İleri yön (+)	Geri yön (-)	İleri yön (+)	Geri yön (-)		
R1	83	75	6,2	5,6	5,9	3,7
R2	15	30	1,1	2,2	1,6	1
S1ZN200	>80	53	>6	4,0	>5,0	>3,1
S1ZN150	>100	88	>7,5	6,6	>7,0	>4,4
S1ZY200	95	>100	7,1	>7,5	>7,3	>4,6
S1ZY150	84	>80	6,3	>6,0	>6,1	>3,8
S1.5ZN200	>100	>100	>7,5	>7,5	>7,5	>4,6
S1.5ZN150	>100	83	>7,5	6,2	>6,8	>4,7
S1.5ZY200	>58	>80	>4,4	>6,0	>5,2	>3,2
S1.5ZY150	>73	82	>5,5	6,2	>5,8	>3,6
S2ZN200	93	>100	7,0	>7,5	>7,2	>4,5
S2ZN150	>100	>100	>7,5	>7,5	>7,5	>4,7
S2ZY200	>100	>100	>7,5	>7,5	>7,5	>4,7
S2ZY150	>100	>100	>7,5	>7,5	>7,5	>4,7

Çizelge 6.3 incelenirken şu noktaları göz önünde bulundurmakta fayda olacaktır. Bazı değerlerin önüne büyüktür (>) işareti yerleştirilmiştir. Bu işaret deneyin sonuna gelindiğinde maksimum yükte henüz %15'lik bir kaybın oluşmadığını belirtmek için kullanılmıştır. En yüksek ötelenme oranı % ">7,5" olarak tanımlanmış deneylerde, ölçüm cihazlarının kapasitesi dolduğu için test sonlandırılmıştır. S1ZN200 elemanında kolon üst uçlarında kesme kırılması olmuştur. S1.5ZY200 elemanında ise daha önce bahsedilmiş olan, ileri düzeyde düzlem dışı ötelenme meydana geldiği için deneye devam edilememiş ve bu noktaya kadar da yükte herhangi bir kayıp olmamıştır. Diğer bütün ">" işareti konan deney elemanlarında kolonun alt uçlarından birinin temelle birleşen kesitindeki donatıların tamamına yakınının kopması sebebiyle diğer yönde yükte önemli kayıp olmamasına rağmen teste devam edilememiştir.

Hatırlanacağı gibi kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200'de; dayanımda önemli bir kayıp (%15) olmadan ulaşılan ötelenme oranındaki artış, Çizelge 6.3 incelendiğinde tuğla dolgu duvarlı referans elemanına (R2) göre nispeten sınırlı (3 kat) olmuştur. Onun dışında genel olarak Çizelge 6.3 incelenecek olursa; kolonların kesmeye karşı mantolanarak güçlendirilmesiyle birlikte delikli levhalarla yapılan takviyenin, R2'ye göre, dayanımda önemli bir kayıp (%15) olmadan ulaşılan ötelenme oranına sağladığı katkı en az 3,5 kattan büyük olmuştur. Bununla beraber güçlendirilmiş elemanların tamamına yakın bölümünde R2'ye göre 4,5 kattan büyük ötelenme oranlarında bile, dayanımda önemli bir kayıp meydana gelmemiştir.

Delikli levhalar, kolonlarında kesmeye karşı takviyesiyle beraber gevrek davranış gösteren bir sistemi oldukça sünek duruma getirmiştir. Hiçbir deney elemanı delikli levhalarla takviye edilmiş tuğla duvarda oluşan hasarlardan ötürü taşıma gücüne ulaşmamıştır. Deneyler ya ölçüm cihazlarının kapasitesinin dolmasıyla ya da betonarme çerçeve kolonlarının temelle birleşen ara kesitindeki boy donatılarının kopmasıyla oluşan yük kaybından ötürü sonlandırılmıştır. Sonuç olarak çerçevenin boy demirleri kopmadığı sürece %7,5'den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmiştir (Çizelge 6.3).

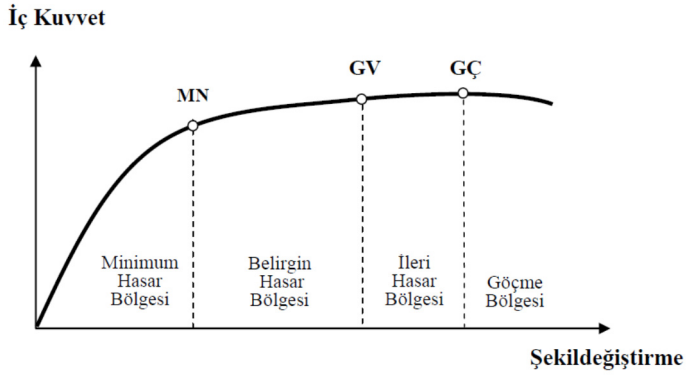
Deney değişkenleri açısından kıyaslama yapılarak Çizelge 6.3 ve davranışlar incelendiğinde tespit edilen küçük farklılıkların tamamen rassal olduğu kanaatine varılmıştır. İlk bakışta 2 mm kalınlığındaki delikli levhalarla yapılan takviyelerin süneklik açısından diğerlerine göre biraz daha üstün olduğu düşünülebilir, ancak gözüken fark, bu deneylerde kolon boy donatılarının ölçüm cihazlarının kapasitesi doluncaya kadar kopmamasından kaynaklanmıştır.

Daha önce bahsedildiği gibi bu çalışmanın en önemli amaçlarından birisi güçlendirilmiş dolgu duvarları süneklik bakımından ideal bir betonarme davranışına yaklaştırmaktır. Bu çalışma kapsamında süneklik bakımından varılan noktanın durumu Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) (2007)'e göre incelenmeye çalışılacaktır.

"Sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç sınır durum tanımlanmıştır. Bunlar Minimum Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ)'dır. Minimum hasar sınırı ilgili kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, güvenlik sınırı kesitin dayanımını güvenli

olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın sınırını, göçme sınırı ise kesitin göçme öncesi davranışının sınırını tanımlamaktadır" (DBYBHY, 2007).

Buna göre "Kritik kesitlerinin hasarı MN'ye ulaşmayan elemanlar minimum hasar bölgesinde, MN ile GV arasında kalan elemanlar belirgin hasar bölgesinde, GV ve GÇ arasında kalan elemanlar ileri hasar bölgesinde, GÇ'yi aşan elemanlar ise Göçme bölgesinde yer alırlar (Şekil 6.20)" (DBYBHY, 2007).



Şekil 6.20. Kesit hasar bölgeleri (DBYBHY, 2007)

Deprem şartnamesinde Çizelge 6.4'de verilen göreli kat ötelenmesi sınırları kolon veya perdeler için tasarım deprem yükleri altında hesaplanmaktadır. Hasar bölgesi tasarım deprem yükleri altında oluşan kat ötelenmeleri ile belirlenmektedir [52].

Çizelge 6.4. Göreli kat ötelenmesi sınırları [52]

Göreli Kat Ötelemesi Oranı (Kolon veya perdelerde) (%)	Hasar Sınırı		
	MN	GV	GÇ
	1	3	4

Bu çalışmada ise elemanlar tasarım yükleri altında test edilmemiştir. Yani elemanlarda ağır hasarlar oluşuncaya kadar yük arttırılmıştır. Dolayısı ile tüm elemanlarda göçme sınırı olan %4 değerinin çok ötesine gidilmiştir. Buradan ulaşılan sonuçlardan elemanların tasarım yükleri altında % 4 sınırını aştığı anlaşılmamalıdır. Tasarım yükleri altındaki ötelenme oranlarının ulaşılan oranlardan daha düşük olacağı açıktır. Ancak tasarım yükleri yapının özelliklerine (kat alanı, kat sayısı, deprem bölgesi, süneklik düzeyi, vb.) bağlı olduğundan bunun çerçeve bazında hesaplanması mümkün değildir. Zira tasarım deprem yüklerinin % kaçının çerçeve tarafından karşılanacağı bilinmemektedir. Dolayısı ile burada önemli olan

% 4 sınırının aşılıp aşılmaması değil dayanımda önemli bir kayıp olmaksızın ne kadar büyük ötelenme oranına ulaşıldığıdır.

Kolonlarında kesmeye karşı takviye edilerek tuğla dolgu duvarı delikli çelik levhalar ile güçlendirilen bu çalışmadaki deney elemanlarının davranışı şöyle özetlenebilir. Deney elemanları ileri hasarlar bölgesine %85 P_u değerlerinden sonra ulaşmış olup bu yüke karşı gelen ötelenme oranı, güçlendirilmiş duvar bazında bakıldığında deprem şartnamesindeki % 0,35'teki GV, kolon veya perde bazında bakıldığında % 3'teki GV sınırlarının çok daha ötesindedir (Çizelge 6.4, 6.5). Deprem yönetmeliğinde güçlendirilmiş dolgu duvarlar için hasar sınırlarını tanımlayan göreli kat ötelemesi oranları için Çizelge 6.5 incelenebilir.

Çizelge 6.5. Dolgu duvarlarda göreli kat ötelemesi sınırları [52]

Göreli Kat Ötelemesi Oranı (Güçlendirilmiş dolgu duvarda) (%)	Hasar Sınırı		
	MN	GV	GÇ
	0,15	0,35	-

Çizelge 6.3 incelendiğinde düzlem dışı hareketi dolayısı ile yeterince test edilemeyen S1.5ZY200 elemanı dışında ulaşılan en küçük ötelenme oranı % 5,8 olup, güçlendirilmiş duvarlar açısından GV sınırı en az 5,8/0,35= 16,5, kolonlar açısından ise GV sınırı en az 5,8/3= 1,9 kat ileri ötelenmiştir. Sonuç olarak kolonlar için güvenlik sınırı yaklaşık 2 kat, güçlendirilmiş dolgu duvarlar için ise yaklaşık 16 kat ileri taşınmış olup, ileri düzey hasarların artık eskisine göre oldukça fazla artmış olan bu yeni sınırlardan sonra oluşması beklenmektedir. Buna rağmen kolonlar eksenel yüksüz olarak test edildiği için bu yargıya kesin gözüyle bakmak en azından şimdilik doğru bir yaklaşım olmayacağından genelleme yapılmamalı ve kolonları eksenel yüklü elemanların deney sonuçları beklenmelidir.

6.2.4. Rijitlik

Rijitlik; cisimlerin şekil değiştirme tesirlerine karşı gösterdiği direncin derecesi olarak ifade edilebilir. Eğilme rijitliği ise bilindiği gibi moment-eğrilik grafiğinin eğimine eşit olmakta ve söz konusu bu eğim ise atalet momenti ve elastisite modülüne göre değişmektedir. Bu çalışmada ise her iki kolondan eğrilik ölçümleri alınmıştır. Ancak bu ölçümlerin rijitlik hesaplarında kullanılması birçok bakımdan yanıltıcı sonuçlar verebilir.

Birincisi; betonarmenin kendine özgü davranışından kaynaklanmaktadır. Beton elastik bölgede dahi doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Yani her farklı yük değerinde farklı elastisite modülüne sahip olmaktadır. Normal gerilmelerin kolon boyunca ve kolon kesiti boyunca nasıl dağılacağı tam olarak bilinemeyeceği için ölçüm alınacak bölgenin uzunluğuna karar vermek ayrı bir sorun oluşturmaktadır. Üstelik ölçüm bölgesinde oluşacak çatlakların sayısı, şekli ve türü eğriliği önemli ölçüde etkilemektedir.

İkincisi; deney elemanlarını oluşturan tüm taşıyıcı birimler (kolon, kiriş, temel, dolgu duvar, güçlendirme materyalleri, vb.) yatay yük altında sürekli bir etkileşim içinde beraber direnç göstermektedirler. Bu yatay yükün ne kadarının hangi taşıyıcı eleman tarafından ne kadarının karşılanacağı ayrı bir tartışma konusunu oluşturmaktadır. Üstelik yatay yük miktarı değiştikçe taşıyıcı birimler arası yük paylaşımları ve paylaşılan yüklerin taşıyıcı elemanlar üzerindeki dağılımı da değişmektedir.

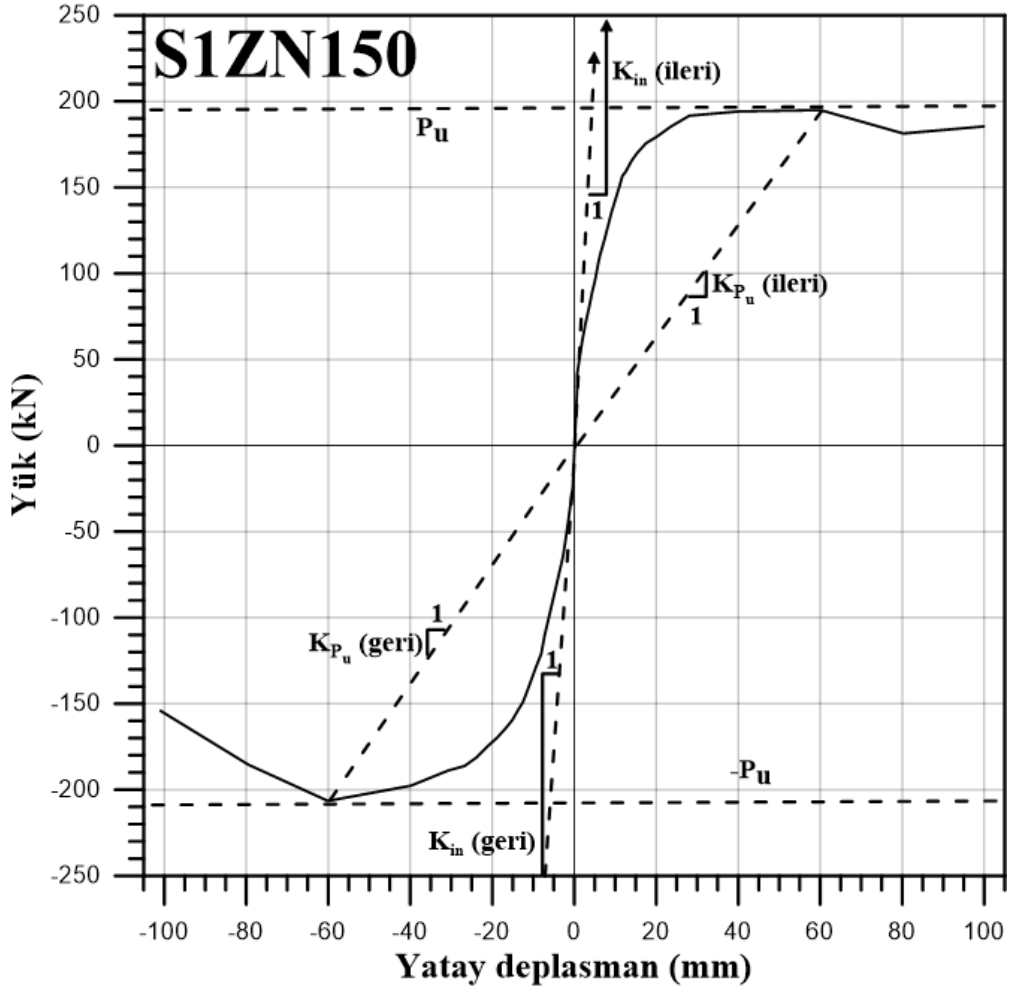
Üçüncüsü; deney elemanında kayma gerilmeleri ve deformasyonları da oluşmaktadır. Bilindiği gibi kayma rijitliği de yapı sistemlerinin deprem performansını etkileyen diğer bir faktördür.

Bu sebeplerden ötürü kolon alt uçlarından alınan eğrilik ölçümleri kullanılarak hesaplanan rijitliklerin, sistemin gerçek rijitliğini yansıtmakta yetersiz kalacağı kanaatine varılmıştır. Bu çalışmada ise deney elemanlarının genel davranışını yansıtan yük-yatay deplasman eğrileri kullanılarak ötelenme rijitlikleri hesaplanmaya ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Moment yükün, eğrilik ise deplasmanın bir fonksiyonu olduğu bilindiğinden ve sadece deney elemanları arasında göreceli karşılaştırma yapılacağından bu durumun herhangi bir sakınca oluşturmayacağı düşünülmüştür.

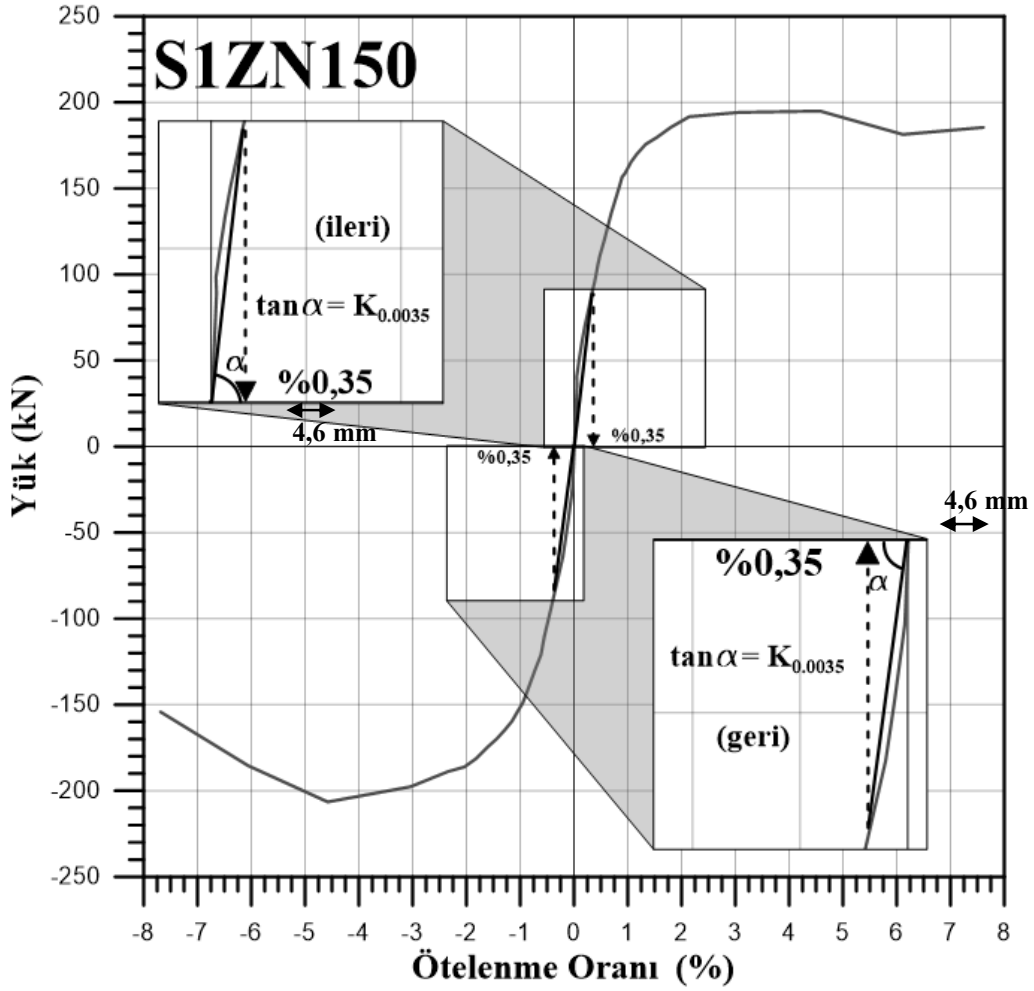
Ötelenme rijitliği analizinde de bazı açmazlar bulunmaktadır. Bu açmazlar şöyle sıralanabilir: Yük-yatay deplasman grafiğinde genelde eğriler ilk çevrimlerde doğrusala yakın olmuş, akmaya yaklaşıldıkça S-eğrisi şeklini almış, akmadan sonra ise S-eğrisinin alt ve üst uçları uzayarak yataya yaklaşmıştır. Her noktası ve bölgesi için ayrı bir rijitlik tanımlanabilen bu eğrilerin neresinden rijitlik hesaplanacağı ve tüm elemanlar için nasıl bir standart yöntem oluşturulabileceği oldukça tartışmalıdır. Bir diğer konu ise rijitliğe karşı deplasmanın mı yoksa çevrim sayısının mı gösterilerek çizilen grafiklerin daha anlamlı sonuçlar vereceğidir. Deneylere bakılacak olursa her çevrimle beraber adım adım elemanın rijitliği de değişmiştir. Rijitliğe karşı deplasman grafikleri çizildiğinde her eleman aynı deplasman değerine çoğu zaman farklı çevrim sayısı sonunda ulaştığı, dolayısı ile aynı derecede zorlanmadığı görülecektir. Bu şekilde deplasman değerleri gösterilerek yapılan karşılaştırmanın yanıltıcı olabileceği düşünülmüştür. Rijitliğe karşı çevrim sayısını gösteren grafikler çizildiğinde ise, deneyler akma anına kadar yük kontrollü yapıldığı ve her elemanın dayanımı farklı olduğu için her deney sonuna farklı çevrim sayısı ile ulaşıldığı görülecektir. Ayrıca deneyin başlangıç aşamalarındaki çevrimlerde elemanlara aktarılan düşük yükler, elemanın rijitlik durumuna göre yatayda ölçüm alınabilecek kadar ötelenme meydana getirmemiştir. Bu durumda çizilen grafikler çoğu zaman oldukça sınırlı bir bölge için karşılaştırma yapma olanağı tanıyacaktır. Örnek verilecek olursa R1 elemanı deneyi toplam 13 çevrimde tamamlanmıştır ve bütün çevrimlerde deplasman okunabilmiştir. S1ZN150 deneyi ise 42 çevrimde tamamlanmış olup ilk 3 çevrimdeki maksimum yük değerlerinde yatay ötelenme okunamamıştır. Bu durumda iki eleman, ancak orta bölgedeki 10 çevrimden elde edilen veriler için ortak değerlendirilebilecektir, bir başka deyişle S1ZN150 için çizilen 42 noktalı eğrinin 32 noktadan oluşan bölümü değerlendirme dışı kalmış olacaktır.

Yukarıda anlatılan gerekçelerden ötürü bu çalışmadaki rijitlik değerlendirmesinin davranışla ilgili genel bilgi veren yük-yatay deplasman zarf eğrileri üzerinden yapılmasına karar verilmiştir. Bu eğrilerden üç farklı ötelenme rijitliği değeri bulunmuş ve her eleman için aynı şekilde uygulanmıştır.

Bunlardan birincisi başlangıç teğetinin eğiminden bulunan başlangıç rijitliği (K_{in}), ikincisi ise orijinden başlayıp zarf eğrisinde %0,35 ötelenme oranında ulaşılan yük değerine çekilen doğrunun eğiminden sekant modülü şeklinde hesaplanan rijitlik ($K_{0.0035}$), üçüncüsü ise yine orijinden başlayıp zarf eğrisinde en yüksek yük değerine ulaşılan noktaya doğru çekilen doğrunun eğiminden sekant modülü gibi bulunan rijitlik (K_{Pu}) olmuştur. Bilindiği gibi %0,35 ötelenme oranı deprem şartnamesinde güçlendirilmiş dolgu duvarlar için güvenlik sınırını (GV) tanımlamakta olduğu için bu noktadaki rijitlik değerlerinin hesaplanması uygun görülmüştür (bkz. Çizelge 6.5) [52]. Bu rijitliklerden K_{in} ve K_{Pu}'nun nasıl bulunduğu S1ZN150 elemanı yük-yatay deplasman zarf eğrisi Şekil 6.21'de, $K_{0.0035}$'in nasıl bulunduğu ise yine aynı elemanın yük-ötelenme oranı zarf eğrisi Şekil 6.22'de şematik olarak gösterilmiştir. % 0,35 ötelenme oranınında elemanın 4,6 mm yatay deplasman yapmış olması gerekmektedir. Dolayısı ile $K_{0.0035}$ hesaplanırken %0,35 ötelenme oranındaki yük değerleri, 4,6 mm yatay deplasman değerine bölünerek bulunmuştur.



Şekil 6.21. S1ZN150'de rijitlik (K_{in}, K_{Pu}) analizi



Şekil 6.22. S1ZN150'de rijitlik ($K_{0.0035}$) analizi

Bulunan rijitlikler her iki yön için ayrı ayrı hesaplanmış ve bulunan değerler Çizelge 6.6' da özetlenmiştir. Ortalama rijitlikler ise ileri ve geri yön için elde edilen rijitlik değerlerinin aritmetik ortalamalarının alınmasıyla elde edilmiştir.

Çizelge 6.6'da sunulan ortalama rijitlik değerleri (K_{in}, $K_{0.0035}$, K_{Pu}) her eleman için ayrı ayrı sunulmuştur. Elemanlar arasında daha anlaşılır karşılaştırmalar ve yorumlar yapabilmek amacıyla deneylerin tamamında elde edilen ortalama rijitlik değerleri, tuğla duvarlı referans elemanının (R2) rijitlik değerlerine bölünerek göreceli oranlar hesaplanmıştır. Hesaplanan göreceli rijitlik oranları, orijinal değerleri ile birlikte Çizelge 6.7'de topluca sunulmuştur.

Çizelge 6.6. Deney elemanlarının rijitlik değerleri

Deney Elemanı Adı	Başlangıç rijitliği (K_{in}) (kN/mm)		%0,35 ötelenmede rijitlik ($K_{0.0035}$) (kN/mm)		Pu'da rijitlik (K_{Pu}) (kN/mm)		Ortalama (K_{in}) (kN/mm)	Ortalama ($K_{0.0035}$) (kN/mm)	Ortalama (K_{Pu}) (kN/mm)
	İleri yön (+)	Geri yön (-)	İleri yön (+)	Geri yön (-)	İleri yön (+)	Geri yön (-)			
R1	5,0	4,1	3,6	3,6	1,0	1,2	4,5	3,6	1,1
R2	50,0	34,0	17,2	15,0	10,0	6,0	42,0	16,1	8,0
S1ZN200	50,0	34,0	17,8	17,6	7,0	4,0	42,0	17,7	5,5
S1ZN150	50,0	60,0	19,5	18,1	3,5	3,2	55,0	18,8	3,4
S1ZY200	100,0	100,0	28,8	26,8	5,5	3,0	100,0	27,8	4,3
S1ZY150	100,0	100,0	24,7	28,5	3,9	3,8	100,0	26,6	3,9
S1.5ZN200	100,0	67,0	25,0	24,2	4,7	8,4	83,5	24,6	6,6
S1.5ZN150	100,0	67,0	24,3	27,5	4,7	7,5	83,5	25,9	6,1
S1.5ZY200	67,0	100,0	23,6	25,9	4,6	4,1	83,5	24,8	4,4
S1.5ZY150	100,0	57,0	25,6	28,0	3,2	3,7	78,5	26,8	3,5
S2ZN200	36,0	25,0	12,0	13,0	3,7	3,0	30,5	12,5	3,4
S2ZN150	80,0	50,0	14,6	14,8	2,4	2,0	65,0	14,7	2,2
S2ZY200	50,0	40,0	15,2	13,7	2,8	2,2	45,0	14,5	2,5
S2ZY150	67,0	40,0	15,9	14,6	2,6	2,6	53,5	15,3	2,6

Çizelge 6.7. Deney elemanlarının R2'ye göre rijitlik değerleri

Deney Elemanı Adı	Ortalama (K_{in}) (kN/mm)	Ortalama ($K_{0.0035}$) (kN/mm)	Ortalama (K_{Pu}) (kN/mm)	R2'ye göre ortalama (K_{in})	R2'ye göre ortalama ($K_{0.0035}$)	R2'ye göre ortalama (K_{Pu})
R1	4,5	3,6	1,1	0,1	0,2	0,1
R2	42,0	16,1	8,0	1,0	1,0	1,0
S1ZN200	42,0	17,7	5,5	1,0	1,1	0,7
S1ZN150	55,0	18,8	3,4	1,3	1,2	0,4
S1ZY200	100,0	27,8	4,3	2,4	1,7	0,5
S1ZY150	100,0	26,6	3,9	2,4	1,7	0,5
S1.5ZN200	83,5	24,6	6,6	2,0	1,6	0,8
S1.5ZN150	83,5	25,9	6,1	2,0	1,6	0,8
S1.5ZY200	83,5	24,8	4,4	2,0	1,5	0,5
S1.5ZY150	78,5	26,8	3,5	1,9	1,7	0,4
S2ZN200	30,5	12,5	3,4	0,7	0,8	0,4
S2ZN150	65,0	14,7	2,2	1,5	0,9	0,3
S2ZY200	45,0	14,5	2,5	1,1	0,9	0,3
S2ZY150	53,5	15,3	2,6	1,3	1,0	0,3

Betonarme çerçevenin içine tuğla dolgu duvar yapılmasıyla elde edilen referans elemanının (R2) başlangıç rijitliği, sadece betonarme çerçeveden oluşan referans deney elemanına (R1) göre 10 kat fazla olmuştur. Bir başka ifadeyle betonarme çerçeve içinin tuğla duvarla kapatılması rijitliği 10 kat arttırmıştır. Hali hazırdaki tuğla duvar varlığının zaten bu şekilde rijitliği önemli ölçüde arttırabileceği bilindiğinden, delikli çelik levhalarla takviyenin asıl amacının, sistemin rijitliğini arttırmak olmadığı daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Dolayısı ile duvarın delikli levhalar ile takviyesinden sonra beklentinin en azından mevcut rijitliğin muhafaza edilebilmesi yönünde olmakla beraber, artış yönünde de gelişme sağlanması yöntemin davranışa oldukça olumlu bir katkısı olarak kabul edilebilecektir.

Kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne R2'ye benzer olarak ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200'in rijitliği, referans elemanına (R2) yaklaşık eşit olmuştur (Çizelge 6.7). Duvarlara göre daha zayıf kalan ve benzer kayma rijitliğine sahip kolonlardaki kesme kırılmasının, göçme davranışına hâkim olması bu durumun gerçekleşmesine neden olmuştur.

Bu deneyden sonra Bölüm 5.4.1'de anlatılan yöntemlerle kolonların kesme güvenliğinin arttırılmasıyla beraber, betonarme çerçevenin de göçme davranışı kesmeden, eğilmeye döndürülebilmiş ve rijitliklerde de artış sağlanabilmiştir.

R2 elemanına göre en yüksek başlangıç rijitliği artışlarına, 1,5 mm kalınlığındaki delikli çelik levhalarla takviye edilen deney elemanlarında (yaklaşık 2 kat) ve 1 mm kalınlığındaki delikli levhaların kolonlara bağlandığı deney elemanlarında (yaklaşık 2,4 kat) ulaşılmıştır. Bu elemanların R2'ye göre rijitlik artışı en düşük 1,9, en yüksek 2,4 kat olmuştur (Çizelge 6.7). Bu altı deney elemanının ortalama beton basınç dayanımı f_c =17 MPa, R2'nin ise f_c =10 MPa çıkmıştır (bkz Çizelge 4.4). Güçlendirme yöntemlerinin etkisi dışında, beton dayanımlarındaki bu farkın, rijitlikleri arttırmada da bir miktar rolü olmuş olabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Levha kalınlığının biraz daha arttırılarak 2 mm'ye çıkarılması beklentilerin aksine rijitlik artışını da beraberinde getirmemiştir. Deneylerin gelişimi takip edilecek olursa, delikli levha takviyesiyle birlikte tuğla duvarın güçlenerek betonarme çerçevede ani kesme kırılmasına sebebiyet vermiş olduğu görülmüştür (bkz. S1ZN200 deneyi). Daha sonra kolonlarda kesmeye karşı güçlendirilmiş ve 1 ile 1,5 mm delikli levha kalınlığına sahip deney elemanlarında tuğla duvar ve betonarme çerçeve beraber etkin bir şekilde çalışmıştır. Bu elemanlarda kolon uçlarında sadece eğilme hasarları oluşmuştur. Dolgu duvarın takviyesinde 2 mm kalınlığındaki delikli levhalar kullanılmaya başlandığında, duvar biraz daha rijit olmuş; ancak çerçeve nispeten yine daha zayıf kalmıştır. Bu durumda kolon uçlarında eğilme hasarlarıyla beraber kesme hasarları da oluşmuştur. Yalnız bu kesme hasarı S1ZN200'deki gibi çok tehlikeli ve ani olandan değil, kolon-temel birleşim ara kesitinde kısa konsollardakine benzer ötelenme hasarı şekilde gerçekleşmiştir. Bu şekilde oluşan kesme hasarı neticesinde uç bölgelerde ötelenmeye karşı direnç azalarak, rijitlik düşmüş, bu da genel davranışı yansıtan yük-yatay deplasman zarf eğrilerine yansımıştır.

Bununla beraber 2 mm levha kalınlığına sahip deney elemanlarında beton basınç dayanımı R2'den az çıkmıştır. (bkz Çizelge 4.4). Bu durumun betonarmede kesit kayma rijitliğini olumsuz yönde etkileyebildiği de bilinmektedir.

Bölüm 5.11'den de hatırlanacağı gibi delikli levhaların kolonlara bağlantısı olmadığı S2ZN200 deneyinde deneme amaçlı olarak kolonları üst uçtan birbirine bağlayan demir çubuklar (bkz. Resim 5.11) kaldırılmıştı. Bu elemanın başlangıç rijitliği, R2'den % 30 oranında daha düşük olmuştur. S2ZN200 elemanında ise bu çubuklardan kolon alt ve üst uçlarında kullanılmasıyla beraber (bkz. Resim 5.37) başlangıçtaki rijitlik S2ZN200 elemanına göre 2 kat, R2 elemanına göre 1,5 kat arttırılabilmiştir (Çizelge 6.7).

Delikli levhaların kolonlarla bağlantısının bulunduğu S2ZY200, S2ZY150 elemanlarında ise kolon uçlarını bağlayan demir çubuklar (bkz. Resim 5.11) kullanılmamıştır. Bu elemanların başlangıç rijitliği R2 elemanına göre ortalama %20 daha fazla olmuştur (Çizelge 6.7).

Çizelge 6.7'de deney elemanları incelendiğinde; delikli levhaların kolonlara bağlanıp bağlanmamasının ve bulon aralıklarının (150 veya 200 mm) değiştirilmesinin, başlangıç rijitliği açısından davranışta önemli bir değişikliğe neden olmadığı düşünülmektedir. Gözlenen küçük farklılıkların rassal nedenlerden kaynaklanabileceği kanaatine varılmıştır.

Ötelenme oranının %0,35'e ulaştığı noktadaki rijitlikler ($K_{0.0035}$) incelenecek olursa, R2 ile R1 arasında başlangıçta 10 kat olan rijitlik oranı, 5 kata kadar düşmüştür (bkz. Çizelge 6.7). Kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200'in rijitliği R2'ye yine yaklaşık eşit olmuştur (bkz. Çizelge 6.7). R2 elemanına göre en yüksek $K_{0.0035}$ oranlarına, başlangıç rijitliklerine benzer olarak 1,5 mm kalınlığındaki delikli çelik levhalarla takviye edilen deney elemanlarında, 1 mm kalınlığındaki delikli levhaların kolonlara bağlandığı deney elemanlarında ulaşılmış ve bu oran ortalama 1,6 kat civarında olmuştur. Bahsedilen altı adet deney elemanında, R2'ye göre rijitlik artışı en düşük 1,5; en yüksek 1,7 kat olmuştur (bkz. Çizelge 6.7). Güçlendirilmiş diğer bütün elemanların, R2 elemanına göre $K_{0.0035}$ değerleri yaklaşık eşit çıkmıştır. Oluşan ± %10 oranlarındaki sapmaların betonarmenin kendine özgü davranışından ve tamamen rassal nedenlerden kaynaklandığı söylenebilir. Özet olarak güçlendirilmiş deney elemanlarının $K_{0.0035}$ değerleri açısından, R2 ye göre genel değerlendirmesi yapılacak olursa, yapılan takviyelerin ve yöntemlerin % 0,35 ötelenme oranlarında dahi duvarda açılmış deliklere (104-118 adet) rağmen rijitliği düşürmediği ve ortalama 1,5 kata kadar da arttırabileceği anlaşılmıştır.

Ulaşılan en yüksek yükteki rijitliklere (K_{Pu}) göre değerlendirme yapmak, bazen yanıltıcı sonuçlar elde edilmesine sebep olabilir. Bu çalışma için örnek verecek olursak; hatırlanacağı gibi R2 elemanı, kolon üst uçlarındaki kesme kırılmasıyla taşıma gücüne ulaştığı ve buna bağlı olarak gevrek bir davranıştan beklendiği gibi elastik bölgede en yüksek yükü gördükten hemen sonra dayanım kaybettiğinden düşük bir yatay deformasyon değeri (10-15 mm) için K_{Pu} hesaplanmıştır. Ancak güçlendirilmiş elemanlar oldukça sünek davranış sergilediği ve akmadan sonra yükte deney sonlarına kadar pekleşmenin etkisiyle az da olsa artış olduğundan, R2 ye göre oldukça yüksek yatay deformasyonlar için (80-100 mm) K_{Pu} hesaplanmıştır. Dolayısı ile R2 için yapılan K_{Pu} hesaplarında eğimlerin daha yüksek çıkmasıyla güçlendirilmiş elemanların rijitliği sanki R2'nin altında kalmış gibi gözükmüştür. Ancak genel bir değerlendirme yapılacak olursa bütün güçlendirmiş deney elemanlarının en yüksek yükte benzer K_{Pu} değerlerini aldığı görülmüştür.

6.2.5. Enerji dönüştürme

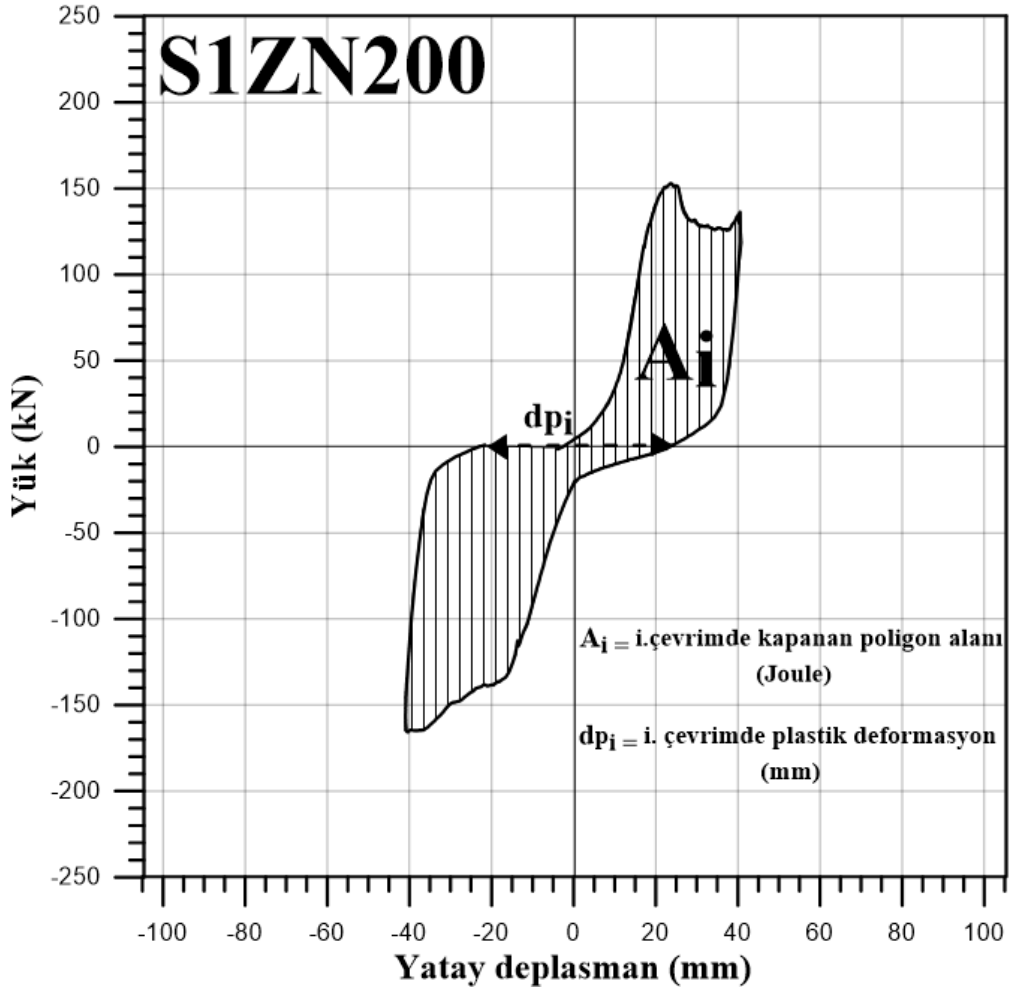
Enerjinin korunumu yasası; enerjinin ne yoktan var edilebileceği ne de vardan yok edilebileceğini söylemektedir. Lise sıralarından beri aşina olunan fiziğin bu temel kanunu, basitçe enerjinin sadece bir formdan başka forma dönüştürülebileceğini ancak asla toplam miktarında değişim olmayacağını belirtmektedir. Buna rağmen ülkemizde betonarme ile ilgili yayınlanmış birçok Türkçe kaynakta "enerji tüketimi" veya "enerji yutma" ifadeleri kullanılmıştır. Betonarme ile ilgilenen ülkemiz mühendislerinin bu anlatım şeklinden dolayı çoğu zaman kavram kargaşasına düştükleri görülmüştür. Enerji tüketimi yerine, "enerji dönüştürme" ifadesinin daha anlamlı olabileceği düşünüldüğünden mevcut çalışmada bu şekilde ifade edilmiştir.

Betonarme yapılar ve taşıyıcı yapı elemanları sünek olarak tasarlandıklarında elasto-plastik davranış gösterirler. Böyle bir sisteme gelen deprem enerjisi yeterince büyükse yapı plastik davranış bölgesine geçerek, deprem tarafından yapıya aktarılan enerjinin büyük bir kısmını deformasyon enerjisine dönüştürür. Bir başka deyişle yapı ne kadar sünekse deformasyonla dönüştürebildiği enerji de o kadar fazla olur. Bu nedenle taşıyıcı sistem elemanlarının enerji dönüştürme kapasiteleri deprem yükleri altında yapının ayakta kalması açısından oldukça önemlidir [53].

Bilindiği gibi kuvvetin yaptığı iş cisme enerji olarak geçer. İş ise kuvvet ile kuvvet doğrultusında ilk konuma göre kat edilen mesafenin çarpımına eşit olmaktadır. Bu çarpım Nm cinsinde ise 1 Nm, 1 Joule'a eşittir. Ayrıca iş ve enerji skaler büyüklüklerdir yani yönden bağımsızdırlar.

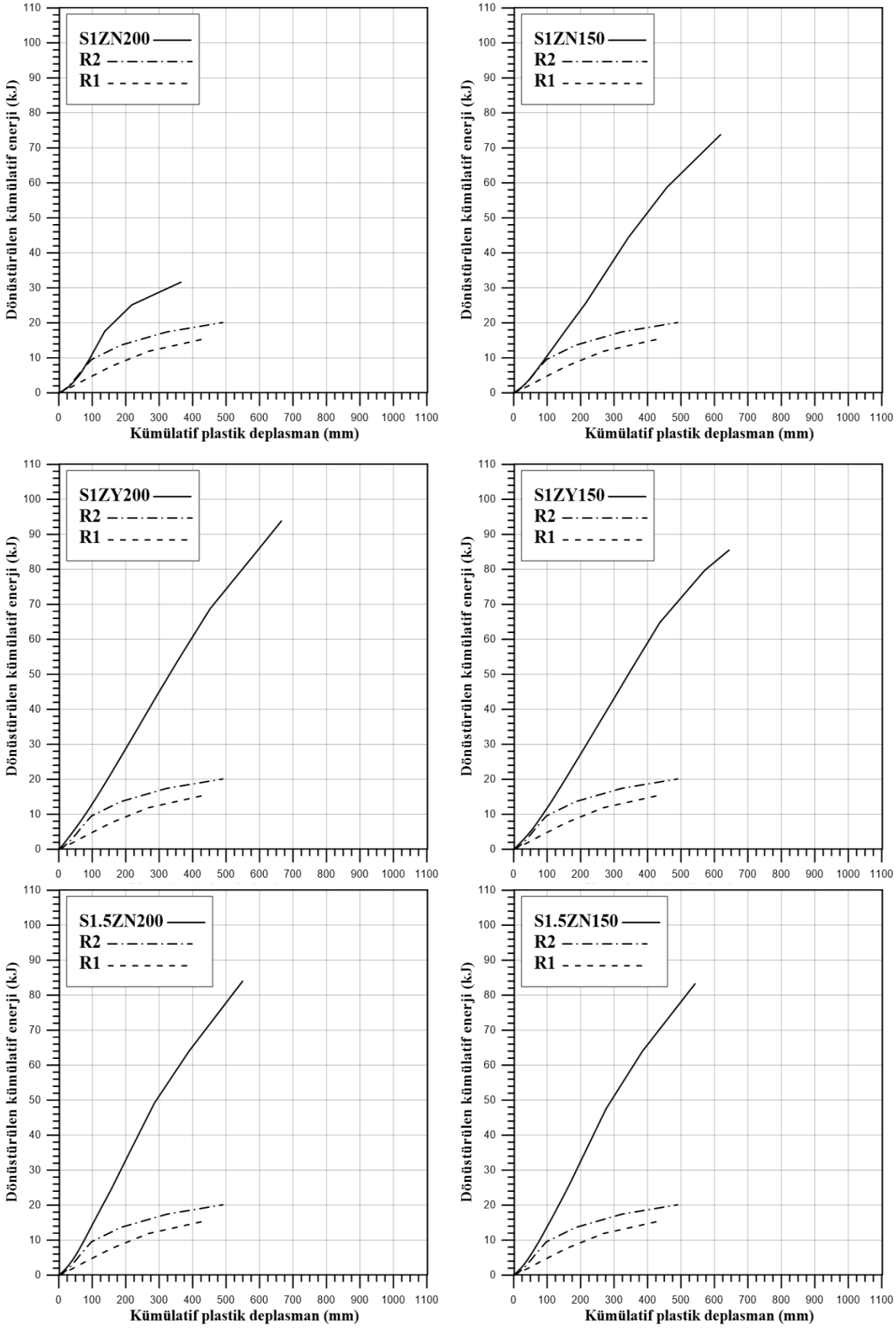
Yapılan tanımlar doğrultusunda deney elemanlarının enerji dönüştürme kapasiteleri, deneye ait yük-yatay deplasman eğrilerinin her çevrimde kapatmış olduğu alanların kümülatif olarak toplanmasıyla elde edilmeye çalışılmıştır. Dönüştürülen bu enerji miktarlarının değişimi ise o ana kadar yapılmış olan kümülatif kalıcı deplasmanlara bağlı olarak çizilmiştir. Enerji dönüştürme kapasiteleri hesap yöntemi, S1ZN200 elemanı deneyindeki rassal bir çevrim için Şekil 6.23'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 6.23 dönüştürülen toplam enerji-deplasman grafiğindeki sadece bir noktanın hesabını göstermektedir. Her çevrim için benzer hesap yapılarak bulunan noktaların kümülatif birleştirilmesiyle, dönüştürülen toplam enerji (joule)-plastik deplasman (mm) eğrileri elde

edilmiştir. Bu eğriler her güçlendirilmiş eleman için, R1 ve R2 referans elamanları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.24 ve 6.25'de gösterilmiştir.

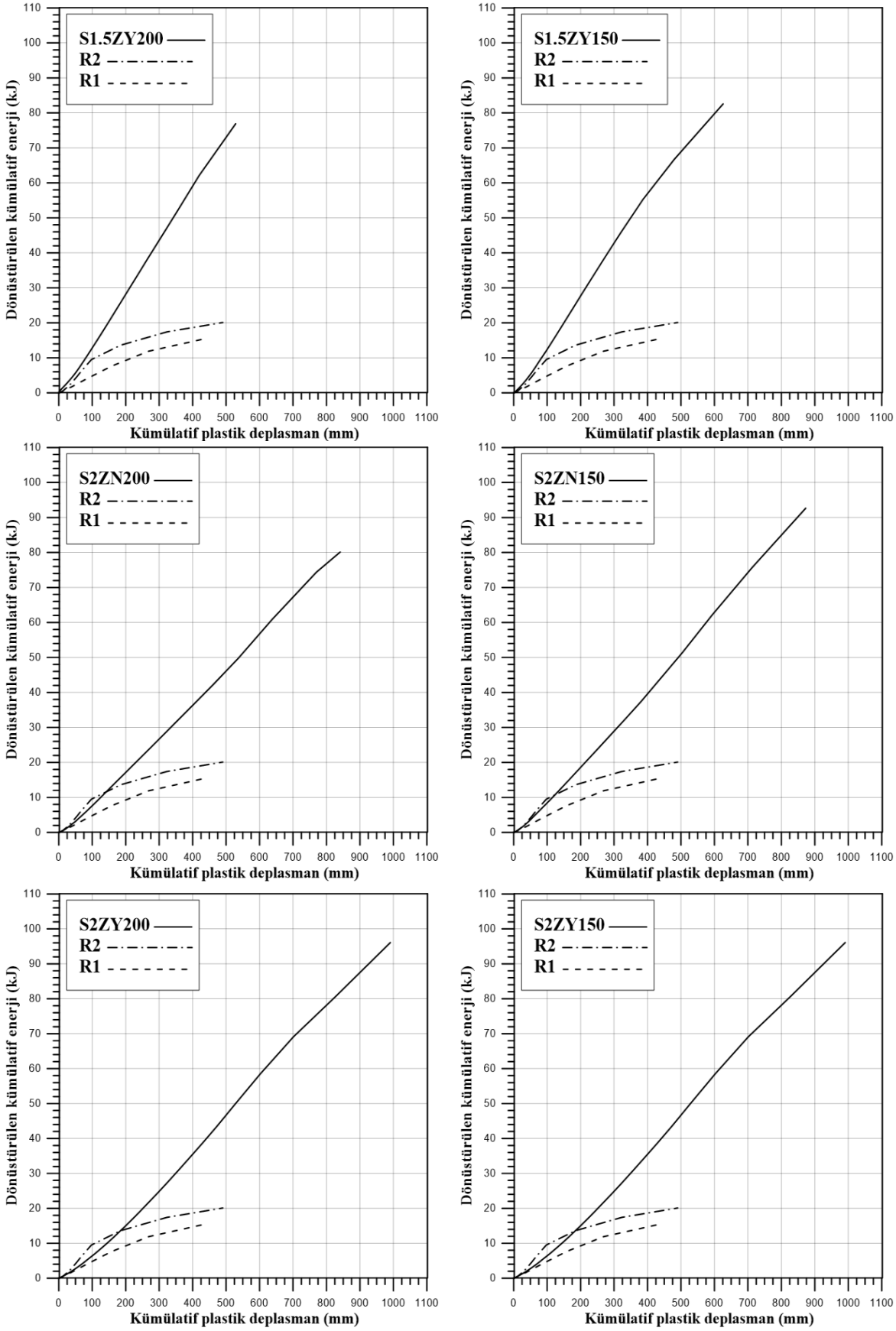


Şekil 6.23. Enerji dönüştürme kapasite analizi hesap yöntemi

Dönüştürülen toplam enerji miktarları her eleman için ayrı ayrı hesaplanmış, referans (R1 ve R2) elemanlarına göre göreceli oranları bulunarak Çizelge 6.8'de gösterilmiştir. Güçlendirilmiş elemanların deneyleri; iki yönde birden dayanımda önemli kayıp olduğu için değil, Bölüm 6.2.3'de anlatılan zorunlu sebeplerden ötürü sonlandırılmak zorunda kalınmıştır. Dolayısı ile güçlendirilmiş elemanlarda hesaplanan toplam enerjinin, gerçekte dönüştürülebilecek toplam enerjiden daha az olabileceğinden yine Çizelge 6.8'de ">" işaretleri kullanılmıştır.



Şekil 6.24. Güçlendirilmiş elemanların referans elemanları ile karşılaştırmalı dönüştürülen enerji-plastik deplasman eğrileri (a)



Şekil 6.25. Güçlendirilmiş elemanların referans elemanları ile karşılaştırmalı dönüştürülen enerji-plastik deplasman eğrileri (b)

Çizelge 6.8. Dönüştürülen toplam enerji miktarları ve kümülatif plastik deformasyonlar

Deney Elemanı Adı	Dönüştürülen Toplam Enerji (Joule)	Plastik Yatay Deformasyonlar Toplamı (mm)	Göreceli Enerji Dönüştürme (R2'ye göre)	Göreceli Enerji Dönüştürme (R1'e göre)
R1	15600	443	0,77	1
R2	20100	490	1,00	1,29
S1ZN200	>31650	>365	>1,57	>2,03
S1ZN150	>73800	>618	>3,67	>4,73
S1ZY200	>93800	>665	>4,66	>6,01
S1ZY150	>85500	>644	>4,25	>5,48
S1.5ZN200	>84000	>550	>4,18	>5,38
S1.5ZN150	>83250	>542	>4,14	>5,34
S1.5ZY200	>76950	>529	>3,83	>4,93
S1.5ZY150	>82600	>626	>4,11	>5,30
S2ZN200	>80200	>840	>4,00	>5,14
S2ZN150	>92650	>873	>4,61	>5,94
S2ZY200	>96100	>991	>4,78	>6,16
S2ZY150	>101750	>1060	>5,06	>6,52

Sadece betonarme çerçeveden oluşan referans deney elemanı (R1) ve betonarme çerçevenin içine tuğla dolgu duvar yapılmasıyla elde edilen referans elemanının (R2) enerji dönüştürme kapasiteleri yaklaşık birbirine eşit çıkmıştır. R2'nin kolonlarında kesme kırılması oluştuğu için sünek bir davranış sergilememiştir. Dolayısı ile dayanımdaki önemli artışa (2,5 kat) rağmen enerji dönüştürme kapasitesindeki artış sınırlı düzeyde kalmıştır (bkz. Çizelge 6.8).

Hatırlanacağı gibi kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne R2'ye benzer olarak ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200'in enerji dönüştürme yeteneği, referans elemanlara (R1 ve R2) göre nispeten kısıtlı düzeyde (1,5-2 kat) kalmıştır (Şekil 6.24, Çizelge 6.8). Bu deneyde delikli levhaların enerji dönüşüm kapasitesini arttırabileceği görülmüş, ancak kolonlarda gerçekleşen kesme kırılması, tam performansın yansıtılmasına engel olmuştur. Bu deneyden sonra Bölüm 5.4.1'de anlatılan yöntemlerle kolonların kesme güvenliği bütün güçlendirilmiş elemanlarda arttırılmıştır.

Genel olarak Çizelge 6.8 incelenecek olursa; kolonların kesmeye karşı mantolanarak güçlendirilmesiyle birlikte delikli levhalarla yapılan takviyenin, R2'ye göre, enerji dönüştürme kapasitesinde sağladığı katkı en az 4,7 kattan büyük olmuştur. Bununla beraber güçlendirilmiş elemanların tamamına yakın bölümünde R2'ye göre bu büyük artışlara (4,7-6,7 kat) dayanımda önemli bir kayıp oluşmadan ulaşılmıştır.

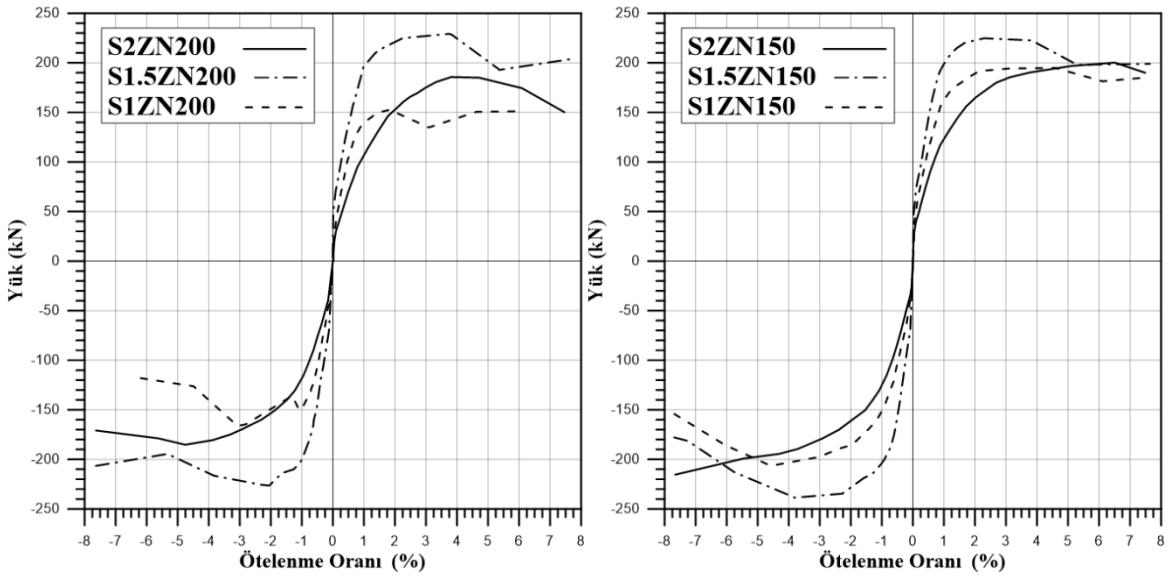
Deney değişkenleri açısından kıyaslama yapılarak Çizelge 6.8 ve davranışlar incelendiğinde tespit edilen küçük farklılıkların tamamen rassal olduğu kanaatine varılmıştır. İlk bakışta 2 mm kalınlığındaki delikli levhalarla yapılan takviyelerin enerji dönüştürme açısından diğerlerine göre biraz daha üstün olduğu düşünülebilir, ancak gözüken bu farkın, kolon uçlarında meydana gelen kısa konsol tipi kesme hasarları neticesinde kolonlarda dışa doğru ötelenme olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Çizelge 6.8'de yer alan plastik yatay ötelenme miktarları analiz edilecek olursa 1 ve 1,5 mm kalınlığında delikli levhalarla güçlendirilen elemanların deneyleri ortalama 600 mm kümülatif kalıcı deplasmanla sonlandırılırken, 2 mm levhalı elemanların deneyleri ortalama 940 mm kümülatif kalıcı deplasmanla sonlandırılmıştır. Deney sonlarına yaklaşık aynı ötelenme miktarıyla ulaşılmasına rağmen, 2 mm kalınlığındaki delikli levhayla takviye edilen elemanlar görüldüğü gibi daha fazla (+340 mm) plastik deformasyon yapmıştır. Bu fark doğal olarak çevrimlerde kapatılan alanın diğer elemanlara göre daha fazla olmasına neden olmuş; sonuçta dönüştürülen kümülatif enerji miktarlarını arttırılmış gibi göstermiştir.

Yapılan çalışma, delikli levhalarla yapılan takviyenin enerji dönüştürebilme konusunda iyileşme sağlayabilmesi için kolonlarda yeterli kesme güvenliğinin olması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Sonuçta delikli levhalar, kolonlarında kesmeye karşı takviyesiyle tuğla dolgu duvarlı elemanları oldukça yüksek enerji dönüştürebilen seviyelere taşıyabilmiştir.

6.3. Güçlendirilmiş Deney Elemanları Arasında Sistematik Karşılaştırma

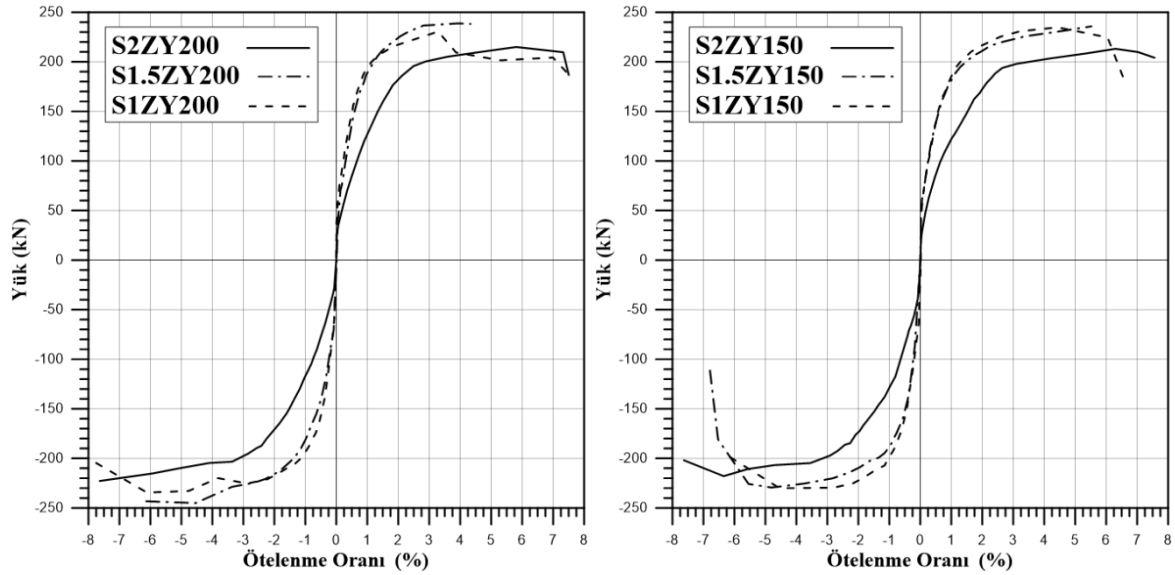
6.3.1. Delikli çelik levha kalınlıklarına göre karşılaştırma

Bilindiği gibi çalışmada üç farklı kalınlıkta (1, 1,5, 2 mm) delikli levha kullanılmıştır. Deney elemanlarına ait özellikler Bölüm 4.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır (bkz. Çizelge 4.1). Levha kalınlıklarının davranışa olan etkisinin incelenmesi amacıyla levha kalınlığı dışındaki tüm değişkenlerin sabit olduğu elemanlar için yük-ötelenme oranı zarf eğrileri gruplandırılarak karşılaştırmalı olarak çizilmiş ve Şekil 6.26, 6.27'da gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Duvarın kolonlara bağlantısının olmadığı elemanların karşılaştırılması

Yorumlara geçilmeden önce S1ZN200 elemanının kolonlarında mantolamanın olmadığı ve S1.5ZY200 elemanının deneyinde düzlem dışı öteleme oluşmasından dolayı yeterince zorlanamadığı tekrar hatırlatılmak istenmiştir. Bu elemanların performansları gözetilerek daha objektif bir karşılaştırma için bazı hesaplara dâhil edilmemiştir. Ayrıca karşılaştırmanın daha kolay ve anlaşılabilir olmasını sağlamak amacıyla her elemanın kendi grubunda ortalama dayanım, ötelenme oranı, başlangıç rijitliği ve enerji dönüştürme değerleri özetlenerek Çizelge 6.9'da sunulmuştur. Çizelge 6.9'da kullanılan ">" işaretlerinin anlamı Bölüm 6.2.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.



Şekil 6.27. Duvarın kolonlara bağlantısı olan elemanların karşılaştırılması

Çizelge 6.9. Güçlendirilmiş elemanların performans özetleri

Deney Elemanı Adı	Ortalama dayanım (P_{uort}) (kN)	Ortalama en yüksek ötelenme oranı ($d_{0,85}$'de) (%)	Ortalama başlangıç rijitliği (K_{in}) (kN/mm)	Ortalama Enerji Dönüştürme (Joule)
S1ZN200	159	>5,0	42,0	>31650
S1ZN150	199	>7,0	55,0	>73800
S1ZY200	232	>7,3	100,0	>93800
S1ZY150	233	>6,1	100,0	>85500
S1.5ZN200	228	>7,5	83,5	>84000
S1.5ZN150	232	>6,8	83,5	>83250
S1.5ZY200	241	>5,2	83,5	>76950
S1.5ZY150	233	>5,8	78,5	>82600
S2ZN200	185	>7,2	30,5	>80200
S2ZN150	208	>7,5	65,0	>92650
S2ZY200	219	>7,5	45,0	>96100
S2ZY150	216	>7,5	53,5	>101750

1 ve 2 mm kalınlığında delikli levhalar ile takviye edilen deney elemanlarının nihai dayanımları yaklaşık eşit olmuştur. 1,5 mm delikli levha kalınlığına sahip elemanlar dayanım açısından en yüksek değerlere ulaşabilmiştir. Bu elemanların dayanımları diğerlerine göre yaklaşık % 13 daha fazla olmuştur (Çizelge 6.9). 2 mm levha kalınlığına sahip elemanlar nihai dayanımlara daha büyük deformasyonlardan sonra ulaşabilmiştir.

Betonarme çerçevenin kolon boy demirleri kopmadığı sürece %7,5'den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmiştir. Çizelge 6.9 incelendiğinde 2 mm kalınlığındaki delikli levhalarla yapılan takviyelerin süneklik açısından diğerlerine göre biraz daha üstün olduğu düşünülebilir, ancak gözüken fark, bu deneylerde kolon boy donatılarının ölçüm cihazlarının kapasitesi doluncaya kadar kopmamasından kaynaklanmıştır. Hiçbir deney elemanı hedeflenen ötelenme oranlarının altında kalmamış, dolgu duvar veya delikli levhalarda oluşan hasarlardan ötürü dayanımda önemli kayıp yaşanmamıştır. Bir başka ifadeyle çalışma kapsamında kullanılan delikli levha kalınlıklarının değiştirilmesi ötelenme oranlarının değişmesine neden olmamıştır. Levha kalınlıkları açısından kıyaslama yapılarak davranışlar incelendiğinde tespit edilen küçük farklılıkların tamamen rassal olduğu kanaatine varılmıştır.

Her levha grubundaki deneylerden hesaplanan başlangıç rijitliklerinin aritmetik ortalaması alındığında en yüksek rijitlik değerlerine 1,5 mm levha kalınlığına sahip elemanlarda ulaşılmıştır. Bu gruptaki elemanlar 1 mm kalınlığında levhalarla takviye edilen elemanlara göre ortalama %10, 2 mm kalınlığında levhalarla takviye edilen elemanlara göre ise ortalama % 70 daha rijit davranmıştır. 2 mm'lik gruba kıyasla oluşan %70 oranındaki çarpıcı farkın şu sebepten dolayı ortaya çıktığı söylenebilir. 2 mm kalınlığındaki levhalarla takviye edilen elemanların deneylerinde kolon-temel birleşim ara kesitinde kısa konsollardakine benzer kesme hasarları olmuştur. Bu şekilde oluşan kesme hasarı neticesinde uç bölgelerde ötelenmeye karşı direnç azalarak, rijitlik düşmüş, bu da genel davranışı yansıtan yük-yatay ötelenme zarf eğrilerine yansımıştır (Şekil 6.26-27). Ancak genel davranışın aksine bu gruptaki elemanlarda deney sonundaki dolgu duvar hasar durumlarının belirgin biçimde en hafif düzeyde kaldığı ve delikli levhalardaki buruşmaların, şekil değiştirmelerinin sıfır düzeyinde olduğu gözlenmiştir (bkz. Resim 5.36, 5.39, 5.43, 5.46).

Kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200 elemanı değerlendirmeye alınmadığında, 1 ve 1,5 mm levha kalınlığına sahip elamanların ortalama enerji dönüştürme kapasiteleri yaklaşık birbirine denk olmuştur. 2 mm kalınlığında delikli levhalar ile takviye edilen grup, enerji dönüştürme miktarı açısından en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu grubun enerji dönüştürmeleri diğer gruplara göre yaklaşık %13 daha fazla olmuştur (Çizelge 6.9). Ancak bu durumun

oluşmasına 2 mm'lik delikli levhaların direk katkısı değil, kolon alt uçlarının kesilip dışa ötelenmesiyle plastik deformasyonları dolaylı olarak arttırması etken olmuştur.

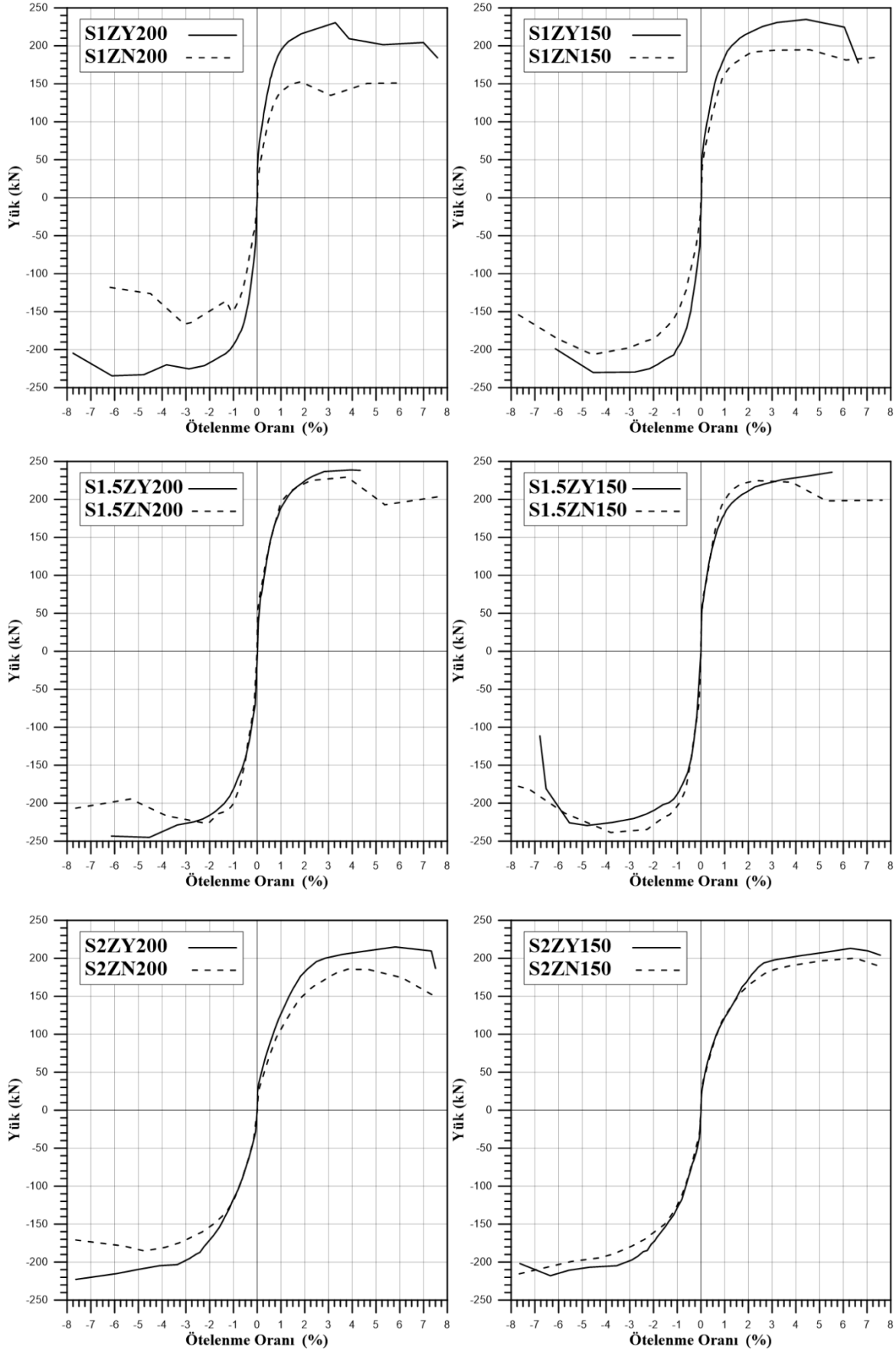
6.3.2. Delikli çelik levhaların kolonlara bağlantısına göre karşılaştırma

Bilindiği gibi çalışmada delikli çelik levhalarla takviye edilmiş tuğla dolgu duvarlı deney elemanlarının bir yarısında kolonlara bağlantı yapılmış, diğer yarısında ise bağlantı yapılmamıştır. Deney elemanlarına ait özellikler Bölüm 4.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır (bkz. Çizelge 4.1). Kolonlara yapılan bağlantının davranışa olan etkisinin incelenmesi amacıyla bu özellik dışındaki tüm değişkenlerin sabit olduğu diğer karşılaştırma elemanıyla birlikte yük-ötelenme oranı zarf eğrileri gruplandırılarak çizilmiş ve Şekil 6.28' de gösterilmiştir.

Kolonlara yapılan bağlantının etkinliği hakkında yorumlara geçilmeden önce S1ZN200 elemanının kolonlarında mantolamanın olmadığı ve S1.5ZY200 elemanının deneyinde düzlem dışı öteleme oluşmasından dolayı yeterince zorlanamadığı tekrar hatırlatılmak istenmiştir. Bu elemanların performansları gözetilerek daha objektif bir karşılaştırma için bazı hesaplara dâhil edilmemiştir. Ayrıca karşılaştırmanın daha kolay ve anlaşılabilir olmasını sağlamak amacıyla iki elemandan oluşan her karşılaştırma grubu bir araya getirilerek performans değerleri özetlemiş ve Çizelge 6.10'da sunulmuştur. Çizelge 6.10'da kullanılan ">" işaretlerinin anlamı ise Bölüm 6.2.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Çizelge 6.10. Güçlendirilmiş elemanların karşılaştırmalı performans özetleri

Deney Elemanı Adı	Ortalama dayanım (P_{uort}) (kN)	Ortalama en yüksek ötelenme oranı ($d_{0,85}$' de) (%)	Ortalama başlangıç rijitliği (K_{in}) (kN/mm)	Ortalama Enerji Dönüştürme (Joule)
S1ZN200	159	>5,0	42,0	>31650
S1ZY200	232	>7,3	100,0	>93800
S1ZN150	199	>7,0	55,0	>73800
S1ZY150	233	>6,1	100,0	>85500
S1.5ZN200	228	>7,5	83,5	>84000
S1.5ZY200	241	>5,2	83,5	>76950
S1.5ZN150	232	>6,8	83,5	>83250
S1.5ZY150	233	>5,8	78,5	>82600
S2ZN200	185	>7,2	30,5	>80200
S2ZY200	219	>7,5	45,0	>96100
S2ZN150	208	>7,5	65,0	>92650
S2ZY150	216	>7,5	53,5	>101750



Şekil 6.28. Güçlendirilmiş elemanların kolonlara bağlantı durumuna göre karşılaştırılması

Kolonlara bağlantı yönteminin dayanıma etkisinin genel sonucuna bakılacak olursa, bağlantının var olduğu elemanların taşıma gücü olmayanlara göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Aradaki fark ortalama %10 olmakla beraber, en az fark 1,5 levha kalınlığına sahip deney elemanları arasındaki kıyaslamada gözlenmiştir (Çizelge 6.10). Aynı zamanda kolonlara bağlantısı yapılan deney elemanları ulaşılan nihai dayanımları korumakta daha kararlı davranmıştır (Şekil 6.28).

Betonarme çerçevenin kolon boy demirleri kopmadığı sürece %7,5'den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmiştir. Dayanımda önemli bir kayıp olmadan ulaşılan ötelenme oranları açısından yöntemler arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Gözlenen küçük farklılıkların ise rassal nedenlerden kaynaklanabileceği kanaatine varılmıştır (Şekil 6.28).

Kolonlara yapılan bağlantının başlangıç rijitliklerine olumlu katkısı sadece 1 mm delikli levha kalınlığına sahip elemanlarda gözlenmiştir. Bu grupta, kolonlara bağlantının var olduğu elemanların başlangıç rijitliği olmayanlara göre 2 kat fazla olmuştur (Çizelge 6.10). 1,5 ve 2 mm kalınlığında delikli levhalar ile güçlendirilen gruplardaki kıyaslamada ise başlangıç rijitliklikleri yaklaşık denk çıkmış ve aralarında belirgin bir üstünlük saptanamamıştır. Bu gruptaki karşılaştırma elemanları (1,5-2 mm'lik grup) için çizilen yük-ötelenme oranı zarfları incelenecek olursa da, akma başlangıcına kadar olan bölgede eğrilerin neredeyse birbiri ile tamamen örtüştüğü görülebilir (Şekil 6.28).

Kolonları kesmeye karşı güçlendirilmemiş olan ve taşıma gücüne ani kesme kırılmasıyla ulaşan S1ZN200 elemanı ve karşılaştırma eşi (S1ZN150) hesaplara katılmadan enerji dönüştürme kapasiteleri açısından değerlendirme yapıldığında, kolona bağlantısı yapılan elemanlar, yapılmayanlara göre ortalama %7 daha fazla enerji dönüştürebilmiştir.

Bütün bunlardan başka kolonlara bağlantısı yapılan deney elemanlarında, betonarme çerçeve ile duvar arasındaki ayrışma açıklığı en fazla 5-6 mm ile sınırlı kalmıştır. Hatırlanacağı gibi kolonlara bağlantısı olmayan elemanlarda bu değer deney sonunda 40-50 mm'leri bulmuştur. Gerçekte yapıya yük her zaman tek bir yönden gelmeyeceği için kolonlara bağlantının yapılması durumunda, güçlendirilmiş tuğla duvarın daha sabit durabileceği ve daha istikrarlı bir şekilde yük alabileceği açıktır.

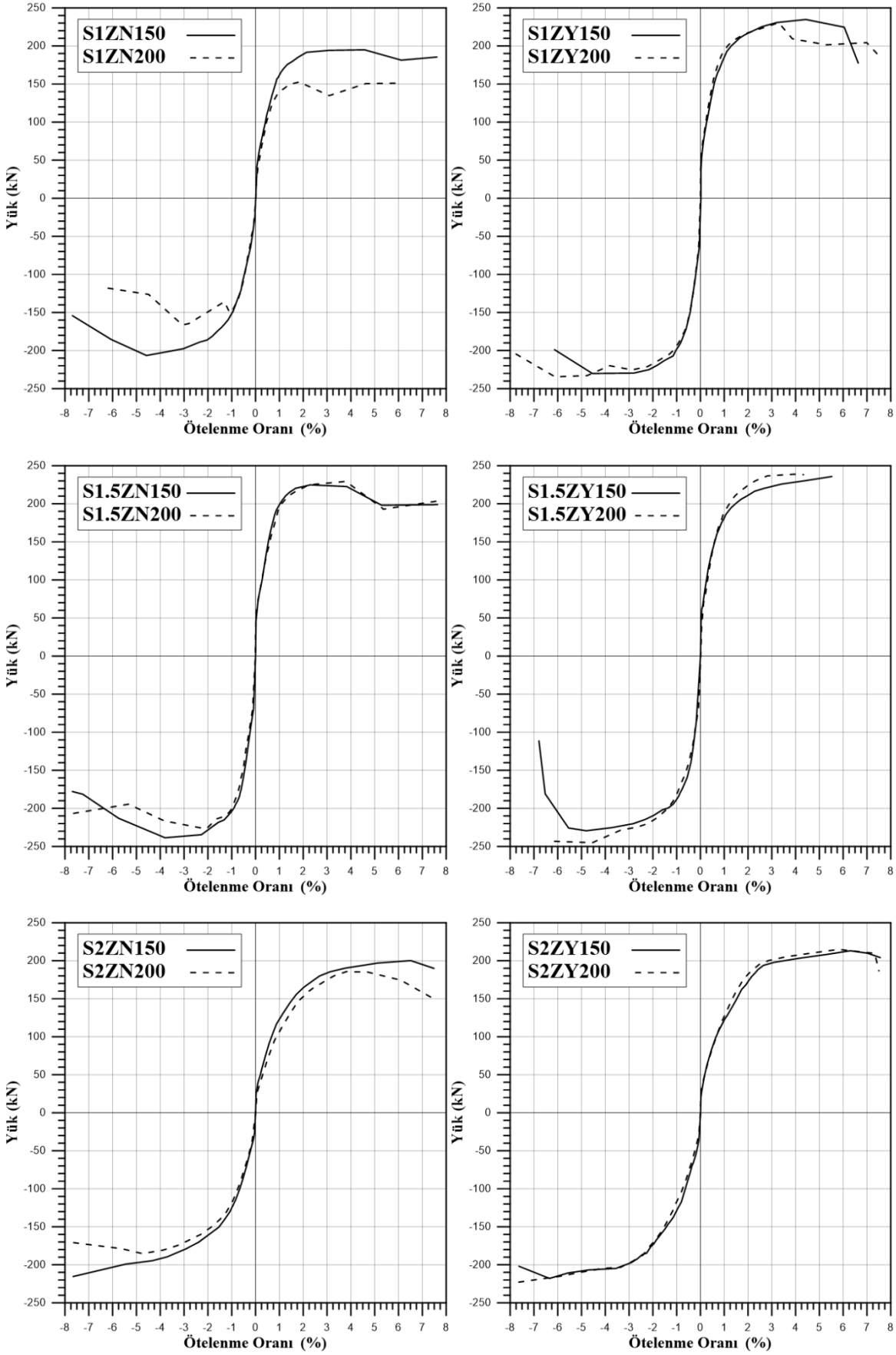
6.3.3. Delikli çelik levhaları bulonlama aralığına göre karşılaştırma

Bilindiği gibi çalışmada delikli çelik levhalarla takviye edilmiş tuğla dolgu duvarlı deney elemanlarının bir yarısında bulon aralığı 200 mm olarak, diğer yarısında ise 150 mm olarak ayarlanmıştır. Bu aralıklar duvar orta bölgesinde geçerli olup standart olarak köşelerde ek önlemlerle birlikte, bulon aralığı 100 mm'ye düşürülmüştür (bkz Resim 4.4). Deney elemanlarına ait özellikler Bölüm 4.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır (bkz. Çizelge 4.1). Bulon aralığının davranışa olan etkisinin incelenmesi amacıyla bu özellik dışındaki tüm değişkenlerin sabit olduğu diğer karşılaştırma elemanıyla birlikte yük-ötelenme oranı zarf eğrileri gruplandırılarak çizilmiş ve Şekil 6.29'da gösterilmiştir.

Bulon aralığının davranışa olan etkinliği hakkında yorumlara geçilmeden önce S1ZN200 elemanının kolonlarında mantolamanın olmadığı ve S1.5ZY200 elemanının deneyinde düzlem dışı öteleme oluşmasından dolayı yeterince zorlanamadığı tekrar hatırlatılmak istenmiştir. Bu elemanların performansları gözetilerek daha objektif bir karşılaştırma için bazı hesaplara dâhil edilmemiştir. Ayrıca karşılaştırmanın daha kolay ve anlaşılabilir olmasını sağlamak amacıyla iki elemandan oluşan her karşılaştırma grubu bir araya getirilerek ortalama dayanım, ötelenme oranı, başlangıç rijitliği ve enerji dönüştürme değerleri özetlemiş ve Çizelge 6.11'de sunulmuştur. Çizelge 6.11'de kullanılan ">" işaretlerinin anlamı ise Bölüm 6.2.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Çizelge 6.11. Güçlendirilmiş elemanların gruplandırılmış performans özetleri

Deney Elemanı Adı	Ortalama dayanım (P_{uort}) (kN)	Ortalama en yüksek ötelenme oranı ($d_{0,85}$'de) (%)	Ortalama başlangıç rijitliği (K_{in}) (kN/mm)	Ortalama Enerji Dönüştürme (Joule)
S1ZN200	159	>5,0	42,0	>31650
S1ZN150	199	>7,0	55,0	>73800
S1ZY200	232	>7,3	100,0	>93800
S1ZY150	233	>6,1	100,0	>85500
S1.5ZN200	228	>7,5	83,5	>84000
S1.5ZN150	232	>6,8	83,5	>83250
S1.5ZY200	241	>5,2	83,5	>76950
S1.5ZY150	233	>5,8	78,5	>82600
S2ZN200	185	>7,2	30,5	>80200
S2ZN150	208	>7,5	65,0	>92650
S2ZY200	219	>7,5	45,0	>96100
S2ZY150	216	>7,5	53,5	>101750



Şekil 6.29. Güçlendirilmiş elemanların bulon aralığına göre karşılaştırılması

Çizelge 6.10 ve Şekil 6.29 beraber değerlendirildiğinde bulon aralığının değiştirilmesinin eleman davranışını belirgin biçimde etkilemediği görülmüştür. Şekil 6.29 incelenecek olursa eğrilerin oldukça uyuşum içinde olduğu ve birbirleri ile örtüştüğü anlaşılmaktadır. 200 mm bulon aralığına sahip her elemanın dayanım, ötelenme oranı, rijitlik ve enerji dönüştürme değerleri, 150 mm bulon aralıklı karşılaştırma elemanıyla yaklaşık eşit çıkmıştır (Çizelge 6.11). Oluşan küçük davranış farklılıkları her eleman için kararlı bir şekilde devam etmediğinden paradoksal durum meydana getirmektedir. Bu da küçük farklılıkların betonarme deneysel çalışmalara özgü tamamen rassal nedenlerden kaynaklandığını göstermiştir.

Bu araştırmanın ön çalışmaları (tuğla duvarlar üzerinde yapılan modül deneyler), bulon aralığının eleman davranışını etkileyen önemli bir faktör olduğunu belirtmektedir [5,6]. Ancak bu çalışmada köşe bölgelerde alınan standart önlemler (bkz. Resim 4.4) oldukça işe yaramış ve sonuçta orta bölge bulon aralığının 150 den 200 mm'ye düşürülmesi davranışta herhangi bir olumsuz değişikliğe neden olmamıştır.

6.4. Geçmişte CFRP Kullanılarak Yapılan Benzer Çalışmalarla Karşılaştırma

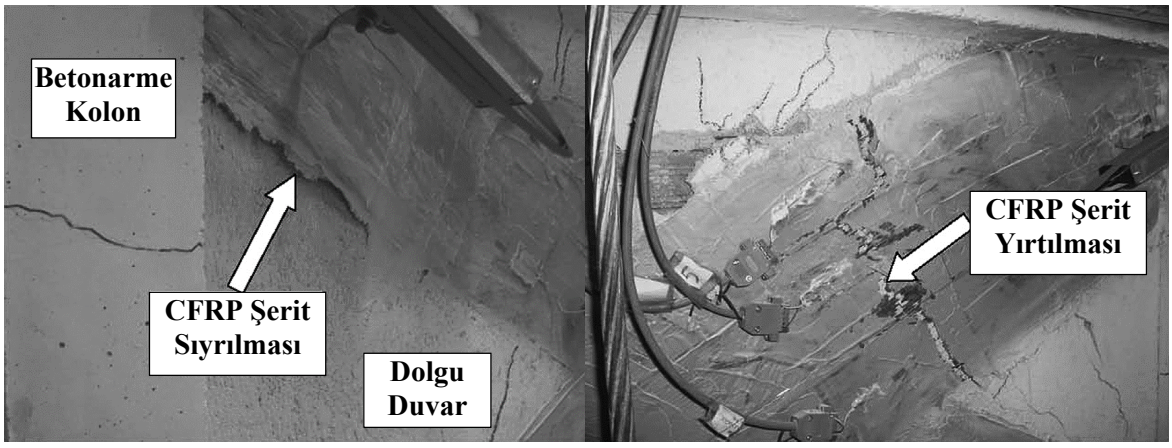
Karbon lifli kumaşların yeni teknoloji, hafif, ince, yüksek çekme dayanımlı ve kısmen uygulaması kolay olması nedeniyle, içerisinde tuğla duvar bulunan betonarme çerçevelerin bu malzeme ile güçlendirilmesi ile ilgili son yıllarda birçok benzer araştırma yapılmıştır (bkz. Bölüm 3). Hatta bu çalışmalarda kullanılan yöntemler ve ortaya çıkan bazı yaklaşımlar ülkemiz mevcut Deprem Yönetmeliği (2007)'de önerilerek standart haline de getirilmiştir [52].

Ancak bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, dayanım ve rijitliği önemli ölçüde arttıran teknikler bulunmuş olsa da süneklik konusunda sınırlı kalındığından daha önce bahsedilmişti. Ayrıca benzer çalışmaların dayanımda en iyi performansı gösteren deney elemanına ait yük-ötelenme oranı grafiği incelenmiş, önemli bir kayıp (%15) olmadan yapılan deformasyondaki kat ötelenme oranları bulunmuş ve bkz. Çizelge 3.1'de topluca verilmiştir. Çizelge 6.12'de ise farklı olarak, aynı çalışmalarda dayanımda önemli bir kayıp (%15) olmadan en yüksek ötelenme oranına ulaşan eleman, kendi referans elemanına göre dayanımdaki artışı ile birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 6.12. CFRP ile yapılan geçmiş çalışmalarda ötelenme oranları ve dayanım artışı

$0,5 > l_{duvar}/h_{duvar} > 2$	**Deney elemanı ölçeği**	**Betonarme çerçeve türü**	**Kolonların eksenel yük oranı**	**En yüksek ötelenme oranı**	**En yüksek ötelenme oranında dayanım artışı**
Altın, Anil, Kara, Kaya (2008) [7]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%10	%1,1	2,40
Erdem, Akyüz, Ersoy, Özcebe (2006) [8]	1/3	İki katlı üç açıklıklı	%7	%0,35	------
Ozkaynak ve diğerleri (2011) [11]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%0	%2,5	1,65
Yüksel ve diğerleri (2010) [12]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%10	%1,6	1,30
Akin (2011) [13]	1/2 - 1/3	İki katlı tek açıklıklı	%10	%1,00-%2,30	2,23-1,95
Coza (2009) [14]	1/3	Tek katlı tek açıklıklı	%0	%1,8	1,80

Çizelge 6.12 incelenecek olursa, yapılan geçmiş çalışmalarda ulaşılan en yüksek ötelenme oranının %2,5 olduğu, bu değere ulaşan deney elemanının referans elemanına göre dayanımdaki artışı ise 1,65 kat olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 6.12'de yer alan yine benzer çalışmalar içinde referans elemanına göre sağlanan en yüksek dayanım artışı 2,4 kat olmuştur. Ancak bu elemanda da ötelenme oranı değeri ortalama %1,1'lere gerilemiştir. Sonuçta şu ana dek yapılan ve yayınlanan araştırmalar, kat ötelenmelerinin en iyi ihtimal dâhilinde %2,5'ları geçtiğinde güçlendirmede kullanılan karbon kumaşların genelde gevrek bir şekilde koptuğunu, yırtıldığını veya sıyrıldığını göstermiştir (Resim 6.1-6.3)



Resim 6.1. Karbon kumaşların sıyrılması ve yırtılması [7]

Resim 6.2. Karbon kumaş şeritlerin yırtılması [13]

Resim 6.3. Karbon kumaş şeritlerin kopması ve yırtılması [14]

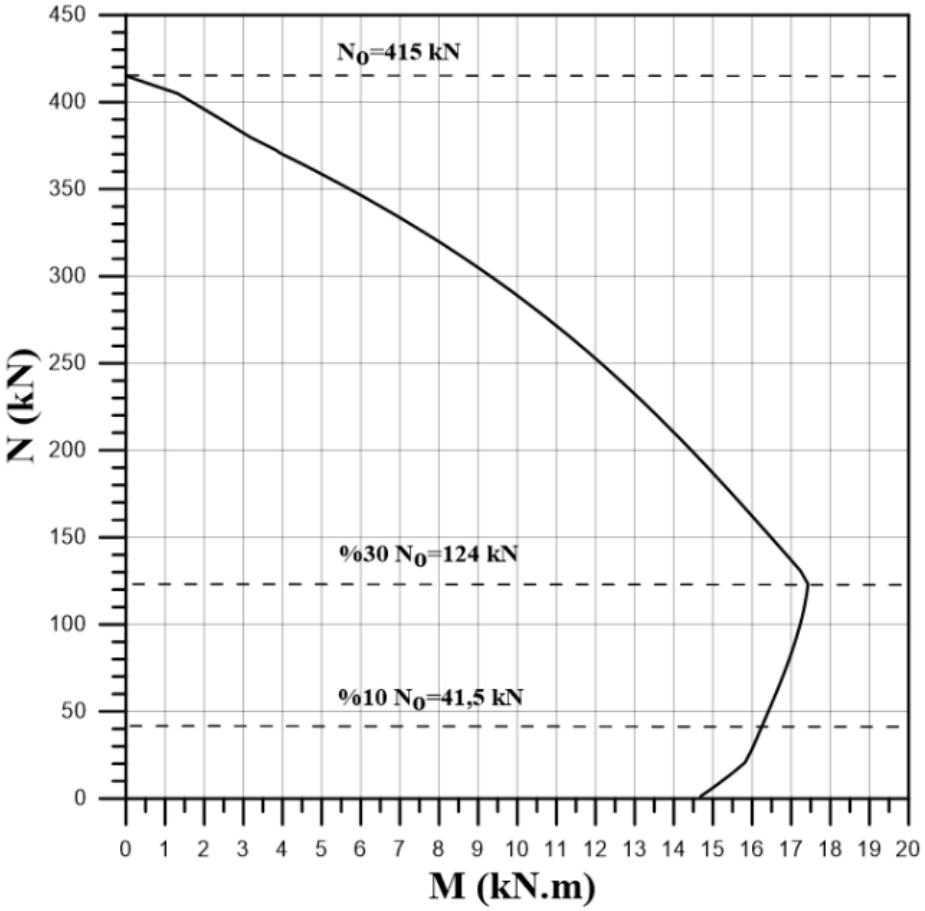
Bu araştırmada ise delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş bütün elemanlarda, betonarme çerçevesinin kolon boy demirleri kopmadığı sürece %7,5'den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmiştir. Üstelik güçlendirilmiş tuğla duvarlarda deney sonuna kadar eleman dayanımını önemli oranda etkileyecek hasar oluşmamıştır. Bir başka deyişle deney elemanlarının ötelenme oranını güçlendirilmiş duvar değil, dışında bulunan kolonların dönme kapasitesi belirlemiştir (bkz. Bölüm 5). Tuğla duvar bütünlüğü ise hiçbir deney sonunda bozulmamıştır. Dayanıma sağlanan katkı ise karbon kumaşla yapılan çalışmalara benzer çıkmış ve yaklaşık 1,5 ile 2 kat arasında değişmiştir (Çizelge 6.1). Sonuç olarak, karbon kumaşla yapılan çalışmalara göre oldukça yüksek ötelenme oranlarına çıkılırken, dayanım konusunda da taviz verilmemiştir.

Bilindiği gibi bu çalışmada kolonlara eksenel yük verilmemiştir. Bu durumun taşıma gücü ve süneklik kriterleri açısından avantaj sağladığı ve benzer çalışmalarda kolonları eksenel yüklenmiş deney elemanlarına haksızlık edilerek kıyaslamanın hatalı sonuçlar verebileceği düşünülebilir. Elbette eksenel yük gerçekte olan ve performans düzeyini ciddi derecede azaltabilen önemli bir faktördür. Ancak karşılaştırma yapılan çalışmalar incelendiğinde kolonları eksenel yüklü bu deneyleri farklı bir statüde tutarak, değerlendirme dışı bırakmanın gerekli olmadığı kanaatine varılmıştır. Bunun sebepleri şöyle açıklanabilir.

Çizelge 6.12'ye bakılacak olursa benzer çalışmaların kolonlarına verilen eksenel yük miktarının kolon kapasitesinin en fazla %10 u olduğu görülecektir. % 10 'luk bir değerin ise kolonların moment kapasitesini düşürebilecek kadar yeterli olmadığı, hatta tam tersi arttırma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Durum bu çalışmanın kolon kesitlerine ait karşılıklı etkileşim diyagramı üzerinde daha net anlatılmaya çalışılacaktır. Şekil 6.30 incelenecek olursa eksenel yük düzeyi % 0 iken kesit moment kapasitesi 14,6 kNm hesaplanmaktadır (R1 elemanı deneysel sonucuyla da oldukça iyi uyuşmaktadır). % 30' N_o'lara çıkıldığında ise moment kapasitesi de %20 artarak 17,5 kNm değerine ulaşmaktadır. Nihayet bu noktadan sonra eksenel yük arttıkça moment taşıma kapasitesinin azalmakta olduğu ve % 100 N_o'lara gelindiğinde (N_o =415 kN) artık moment taşıma kabiliyetinin tamamen yitirilmekte olduğu görülecektir. % 10 N_o'lık bir değerin ise moment taşıma kapasitesini azaltmayacağı aksine % 12 kadar arttırabileceği bilinmektedir (14,6 kNm'den 16,3 kNm).

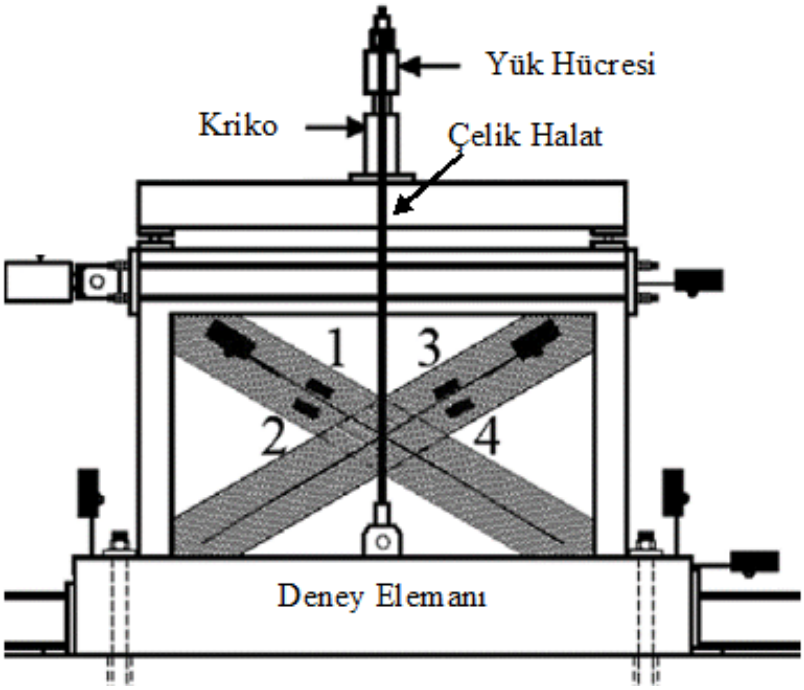
Bilindiği gibi betonarme kesitler dengeli moment ve eksenel yük değerlerine (N_b ve M_b) yaklaşık % 40 N_o civarında (maksimum moment kapasitesinin biraz üstünde) ulaşırlar. Şekil 6.30'daki örnekte hesaplanan zarfın ve oranların, betonarme kurallarına uygun yapılan kesitler için benzer ve yakın çıktığı düşünüldüğünde; % 10 N_o düzeyinde kolonlara verilen eksenel yükün, kolon moment taşıma ve dönme kapasitesini zorlayıcı ve sınırlayıcı olmadığı anlaşılmaktadır. Hatta mevcut moment kapasitesini % 12 civarında iyileştirmektedir (Şekil 6.30).

Bütün bunlardan başka ülkemiz Deprem Yönetmeliği (2007); düşey yüklerin, bahsi geçen kolon tarafından, eksenel yük kapasitesinin % 50'sine kadar taşıtılabileceğini yazmaktadır [52]. Dolayısı ile buradan % 10 N_o düzeyindeki bir eksenel yükün, yapının içindeki kolonun gerçek durumunu da yansıtmaktan uzak olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.30. R1 kolonu karşılıklı etkileşim diyagramı

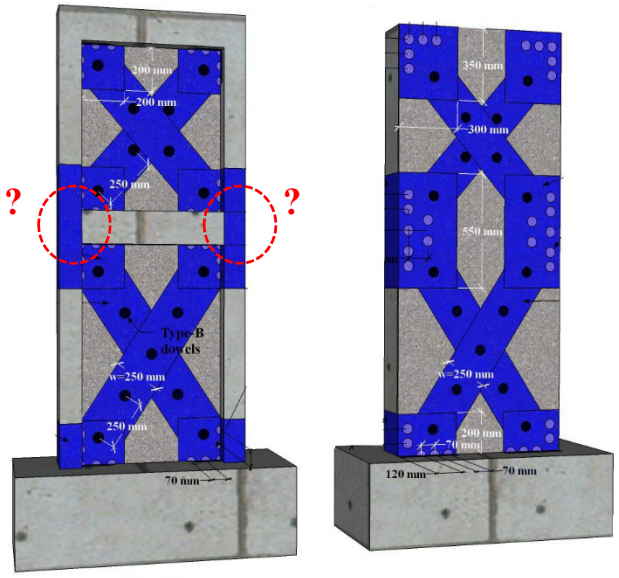
Geçmiş bazı çalışmalarda ise eksenel yük, ard-germe halatları vasıtası ile verilmeye çalışılmıştır (Şekil 6.31, Resim 6.4). Ancak bu yöntemde önemli yanıltıcı etkenlerin bulunduğu ve gerçektekine benzer eksenel yükleri benzeştirmede yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Deneyin ilerleyen aşamalarında, yatay deformasyonla beraber halatın üst ucu da yatay hareket edeceği için, halattaki çekme kuvvetinin yatay ve düşey bileşenleri oluşacaktır (Resim 6.4). İşte bu bileşenlerden yatay olanı (N_x), sisteme verilen yatay yükün aksi yönünde kolonları çekmeye çalışacaktır. Böylece gerçek davranışın değişerek, çevrimlerde yatay yükün boşaltılmasıyla oluşan plastik deformasyonların ve eksenel yükün kolonları zorlayıcı etkisinin oldukça azalacağı düşünülmektedir.



Şekil 6.31. Ard-germe halatı ile yapılan eksenel yükleme düzeneği örneği [7]

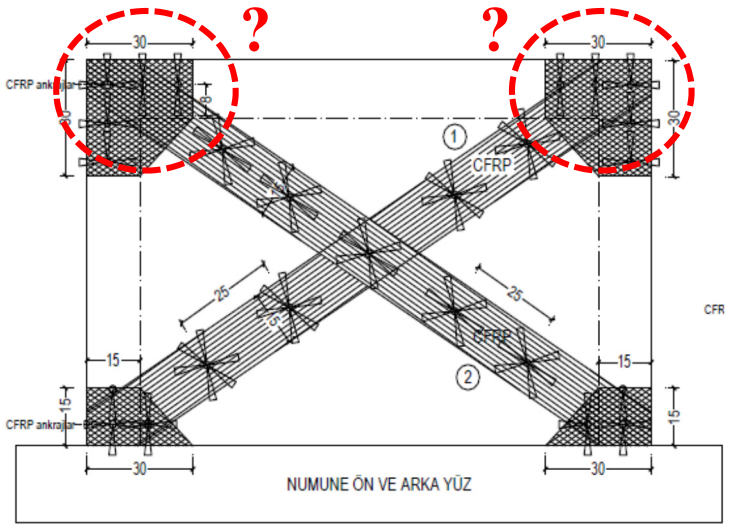
Resim 6.4. Ard-germe halatındaki kuvvetin bileşkeleri [13]

Ayrıca; önerilen bir güçlendirme yönteminin gerçek yapıda da birçok durumda uygulanabilir olması, sağlanması gereken en önemli şarttır. Ancak araştırmacılar bazen bu şartı ya gözden kaçırmakta ya da maalesef dikkate almamaktadır. Karşılaştırma yapılan çalışmalar içerisinde rastlanan ve bahsedildiği gibi gerçek yapıda aynı şekilde uygulamayı yazara göre neredeyse olanaksız hale getiren yöntemlerden aşağıda bahsedilecektir.

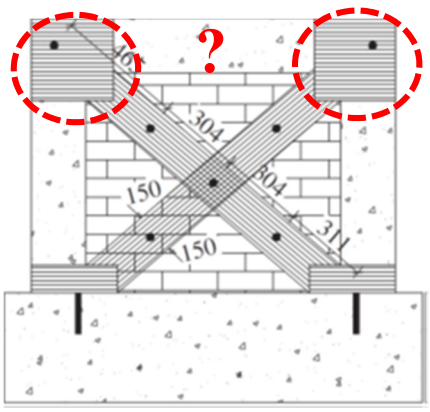


Şekil 6.32. Deneysel bir çalışmada CFRP uygulama örneği [13]

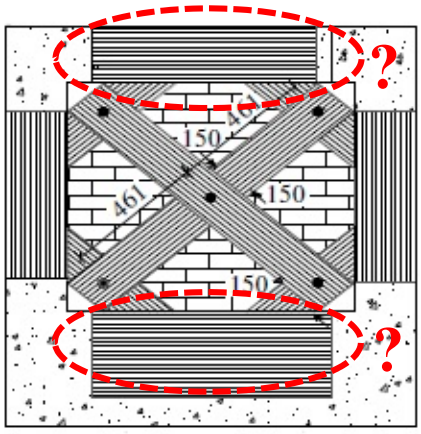
Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34 incelenecek olursa "?" işareti yerleştirilen birleşim bölgelerinde, gerçek yapıda düzlem boyunca devam eden ya da düzlem dışından birleşen kirişlerin kuvvetle muhtemel bulunacağı anlaşılacaktır. Dolayısı ile gerçek yapıdaki birleşim bölgelerinde karbon kumaşla bu şekilde sargılamayı devam ettirmek, pratik olarak pek de mümkün gözükmemektedir. Eğer yöntemin bu çalışmalardaki gibi değil de, sadece dış yüzeylerde uygulanacağı farz edilirse, yapının dış çevresinde yeterli miktarda boşluksuz duvar bulma sıkıntısı büyük ihtimalle yaşanacaktır.



Şekil 6.33. Deneysel başka bir çalışmada CFRP uygulama örneği [14]



Şekil 6.34. Deneysel çalışmada CFRP uygulama örneği [11]



Şekil 6.35. Deneysel bir çalışmada CFRP yapıştırma örneği [12]

Şekil 6.35'de başka bir çalışmadaki deney elemanı incelenecek olursa "?" işareti yerleştirilen kirişlerde gerçek yapıda döşemelerde bulunmaktadır. Böyle bir uygulama için gerçekte burada bulunacak döşemelerin açıklık boyunca demirleriyle beraber kesilmesi gerekmektedir. Ayrıca uygulamanın sadece yapının dış yüzeylerinde yapılacağı düşünülecek olursa da, yapının dış çevresinde yeterli miktarda boşluksuz duvar bulma sıkıntısı büyük ihtimalle yaşanacaktır.

7. ANALİTİK YAKLAŞIM

Bilindiği gibi betonarme çerçeve içindeki tuğla dolgu duvarlar tasarımda taşıyıcı olarak kabul edilmemekte ve hesaplara katılmamaktadır. Ancak düşey yükler altında olmasa da yatay deprem yükleri altında dolgu duvarlar, betonarme çerçeve ile oldukça yoğun etkileşim içine girmekte ve sistemin davranışını yalın çerçeveye göre oldukça farklı hale getirebilmektedir. Davranışta oluşan bu farklılık çoğu zaman rijitlik ve dayanımda gözlenen artış olarak özetlenmekteyse de, yapılan araştırmalar, durumu bu kadar basite indirgemenin yanlış ve tehlikeli sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir.

Bilindiği gibi betonarme çerçeveler eğilmeden kapasitelerine ulaşacak şekilde tasarlanmaktadır. Zira büyük deprem enerjisi ancak eğilme etkisiyle oluşacak plastik mafsallar sayesinde dönüştürülebilir ve yapı ayakta kalabilir. Mimari nedenlerden ötürü imalatı yapılan tuğla dolgu duvarların, çerçevenin deprem davranışını bir anda eğilmeden tehlikeli kesme kırılmasına nasıl dönüştürebileceğini mevcut çalışma da dahil olmak üzere, bir çok araştırma ortaya koymuştur [47,48]. Resim 7.1'de gösterilen kırılmanın bir benzeri de bu araştırmadaki R2 referans elemanında gerçekleşmiştir (bkz. Resim 5.4). Bu tür bir kırılmaya, genelde kolon betonlarının düşük basınç dayanımlı ve yetersiz etriyeli olmasının neden olduğu gözükmekte ise de, asıl nedenin dolgu duvar köşe bölgelerinin deprem yükleri altında ezilip dağılması olduğu anlaşılmıştır. Köşe bölgelerde boşlukların oluşmasıyla beraber kolon uçlarında, kesme gerilmeleri aşırı yoğunlaşmakta ve tasarım yüklerini aşarak kesme kırılmasına neden olabilmektedir. Kolon etriyesinin yetersiz ve beton basınç dayanımının düşük olması ise bu türden bir kırılma gerçekleşme olasılığını arttırmaktadır.

Resim 7.1. Dolgu duvar nedeniyle kolonlarda oluşan kesme kırılmaları [48]

Resim 7.1'deki kırılma türü dolgu duvarlı çerçeve sistemde gerçekleşebilecek onlarca göçme modundan yalnızca birisidir. Bu göçme modlarını aşağıdaki iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

a) Dolgu duvarın göçmesi
b) Betonarme çerçevenin göçmesi

Sistemin davranışını dolgu duvarın belirlediği durumlarda göçme, duvardaki yatay derzlerde oluşan kayma hasarıyla, çapraz çatlakların oluşmasıyla, köşelerin ezilmesiyle veya düzlem dışı hareket nedeniyle olabilir. Buradaki göçme modlarının hepsi gevrek davranış göstermekte ise de içlerinde en şanslı olanı yatay derzlerde oluşan kayma hasarıdır. Bu türden hasara çerçevenin oldukça güçlü ve sünek, derz harcının ise tuğla bloklarına göre zayıf olduğu durumlarda rastlanabilmektedir. Tersinir tekrarlanır deprem yükleri altında oluşan bu hasar sonucunda ikiye ayrılan duvar Coulomb sürtünmesiyle enerji dönüştürmeye devam etmektedir [54]. Çelik çerçeve içinde test edilmiş ve bahsedilen hasarı almış duvar örneği Resim 7.2'de gösterilmiştir.

Resim 7.2. Yatay derzlerde oluşan kayma hasarı [5]

Sistemin davranışını betonarme çerçevenin belirlediği durumlarda ise göçme, eğilme etkisiyle oluşan plastik mafsallarda dönme kapasitesinin aşılmasıyla, bindirme bölgelerindeki demirin sıyrılmasıyla, kolondaki tüm demirlerin çekme etkisiyle kopmasıyla, kolonlarda kesme kırılmasının gerçekleşmesiyle ve birleşim bölgesinin ağır hasar almasıyla oluşabilir. Bu davranışlardan sünek olanları eğilme etkisiyle plastik mafsalların oluşması ve çekme etkisiyle kolon demirlerinin akması olarak görülebilir. En gevrek ve tehlikeli olanları ise birleşim bölgeleri ve kolonlarda oluşan kesme kırılmalarıdır (bkz. Resim 7.1-5.4) [54].

Tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde, deprem etkisiyle, bahsedilen göçme modlarından sadece birinin oluşması son derece nadir rastlanan bir durumdur. Duvar ve çerçeve sürekli etkileşim içinde olduğundan bahsedilen hasarların birkaç tanesi aynı anda oluşabilir veya bazıları sınırlı kalırken bazıları daha baskın olabilir [54].

Davranıştaki bu karmaşıklık sistemin analitik olarak modellenmesini veya çözülmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu konuda, 1956 yılından itibaren günümüze kadar birçok araştırma yapılmıştır. Önerilen eşitlikler ve yöntemler çoğu zaman sofistike olmasına rağmen kullanımını sınırlayan koşullar, kabuller ve yaklaşımlar içermektedir. Durum böyle olunca uygulayıcı mühendisler hassas hesap yaparak modellediğini düşündüğü dolgu duvarların (güçlendirilmiş, güçlendirilmemiş) bilgisayar çıktılarına, davranış bilen bir mühendisten daha fazla itimat etmektedir. Hâlbuki gerçek olan, bilgisayar çıktısı sonucu değil, hesap yaparken aldığı betonun elastisite modülü değerinin, yapı içerisinde zamanla üçte birine kadar düşmesinin normal olduğudur. Elastisite modülü burada sadece bir örnek olarak verilmiş olup, önerilen yöntemlerde yapılan kabuller elbette bununla sınırlı değildir. Zaten dünyada uluslararası alanda kullanılan birçok yönetmelik, tuğla dolgu duvarların modellenmesi konusunda henüz yöntem önermemekte ve sessiz kalmaktadır. Benzer durum akademik alanda da bazen kendini göstermektedir. Bilim insanları, analitik çalışmalardan elde ettiği sonuçları, kişisel kaygılarla deneysel sonuçlarına "uydurabilmek" için çeşitli gerçek dışı kabuller yapmakta ve bu kabullerinden yayınlarında bahsetmemektedirler.

Tuğla dolgu duvarlar, mimari nedenlerden ötürü yapıldığından ve tasarımda taşıyıcı olarak kabul edilmediğinden denetimden oldukça uzak inşa edilmektedir. Bu durum tuğla dolgu duvarı oluşturan malzeme (tuğla, sıva, harç) özelliklerinin oldukça değişken ve standart sapmasının yüksek olmasına neden olmaktadır. Zaten homojen ve izotropik özellik göstermeyen kompozitin, bir de yük altında doğrusal olmayan davranış göstermesi, malzeme özelliklerinden özellikle elastisite modülünün tespitini oldukça zorlaştırmaktır. Bununla beraber her dolgu duvarın yapımı, duvarcı ustasının inisiyatifine bırakıldığı için aynı duvarın farklı bölümlerinde bile, malzeme özelliklerinin kuvvetle muhtemel değişik çıkmasına sebebiyet verilmektedir. Zaten davranışı oldukça karmaşık olan sisteme birde malzeme özelliklerindeki belirsizliklerin eklenmesi, analitik yaklaşımların ve modellemelerin gerçeği yansıtmaktaki yeteneğinin oldukça sınırlı kalmasına neden olabilmektedir.

Bahsedilen bilgiler göz önünde bulundurularak bu çalışmadaki deneysel sonuçlar, analitik yaklaşımlar kullanılarak analiz edilmeye çalışılacak ve uygulamacı için pratik öneriler sunulmaya çalışılacaktır. Sunulacak önerilerde her ne kadar güvenli yönde yaklaşımlar oluşturulmaya çalışılacaksa da, bunların sınırlı sayıdaki deneyden elde edilen sonuçlar doğrultusunda ön görüldüğü unutulmamalıdır.

7.1. Eşdeğer Basınç Çubuğu Modeli

Eşdeğer basınç çubuğu ile dolgu duvarların modellenmesi ilk olarak Stafford-Smith (1966) tarafından gerçekleştirilmiştir [54]. Daha sonra araştırmacılar arasında bu görüş oldukça popüler olmuş, günümüze kadar gelen süreçte yöntemin geliştirilmesi için onlarca çalışma yapılmıştır. Bu yaklaşım FEMA tarafından 1997 yılında benimsenmiş, yöntemin özellikle deprem gibi tersinir yükler altındaki çerçevelerin tasarım ve değerlendirmesinde başarı ile kullanılabileceği düşünülmüştür [54].

Bilindiği gibi yatay yükün çerçeveye uygulanmasıyla beraber, yük doğrultusundaki köşegenin mesafesi azalırken, diğer yöndeki köşegenin mesafesi artmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, bu durumda dolgu duvarın basınç oluşan köşegenindeki iki ucun birleşim bölgelerine yaslandığını, ancak diğer köşegeni doğrultusunda temasın tamamı ile kaybedildiğini göstermiştir. Şekil 7.1'de gösterilmeye çalışılan bu durum, eşdeğer basınç çubuğu analojisinin oluşturulmasına neden olmuştur. Deprem yükleri altında bu çubuktan her iki köşegen doğrultunda da yerleştirilmekte, sadece basınç gerilmeleri taşıyacak şekilde iki ucu mafsallı şekilde tasarlanmaktadır. Eşdeğer basınç çubuğunun geometrik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla FEMA (2000) tarafından Eş. 7.1 ve Eş 7.2 önerilmiştir [46]. Geometrik özellikler belirlendikten sonra dolgu duvarın rijitliğini temsil edecek değeri bulmak amacıyla Eş. 7.3 kullanılabilir [55]. FEMA (1998) dolgu duvarın dayanımı belirlenirken göçme moduna göre analiz yapmanın daha doğru bir yaklaşım olabileceğini söylemiş, duvar köşelerinin ezilmesiyle taşıma gücüne ulaşılan durumlar için Eş. 7.4'ü önermiştir [54].

$$a_{dolgu} = 0{,}175(\lambda h_{kol})^{-0{,}4}\, d_d \tag{7.1}$$

$$\lambda = \left[\frac{E_{dolgu}\, t_{dolgu} \sin 2\theta}{4\, E_{çer}\, I_{kol}\, h_{dol}}\right]^{\frac{1}{4}} \tag{7.2}$$

$$k_{dolgu} = \frac{t_{dolgu}\, a_{dolgu}\, E_{dolgu}}{d_d} \tag{7.3}$$

$$V_{dolgu} = a_{dolgu}\, t_{dolgu}\, f_{y\ dolgu}\, cos\theta \tag{7.4}$$

a_{dolgu} : Eşdeğer basınç çubuğu genişliği

E_{dolgu} : Dolgunun elastisite modülü

$E_{çer}$: Çerçeve betonunun elastisite modülü

h_{kol} : Kolonun kiriş aksları arasındaki yüksekliği

h_{dol} : Dolgu duvarın yüksekliği

I_{kol} : Kolonun atalet momenti

d_d : Dolgu duvarın köşegen uzunluğu

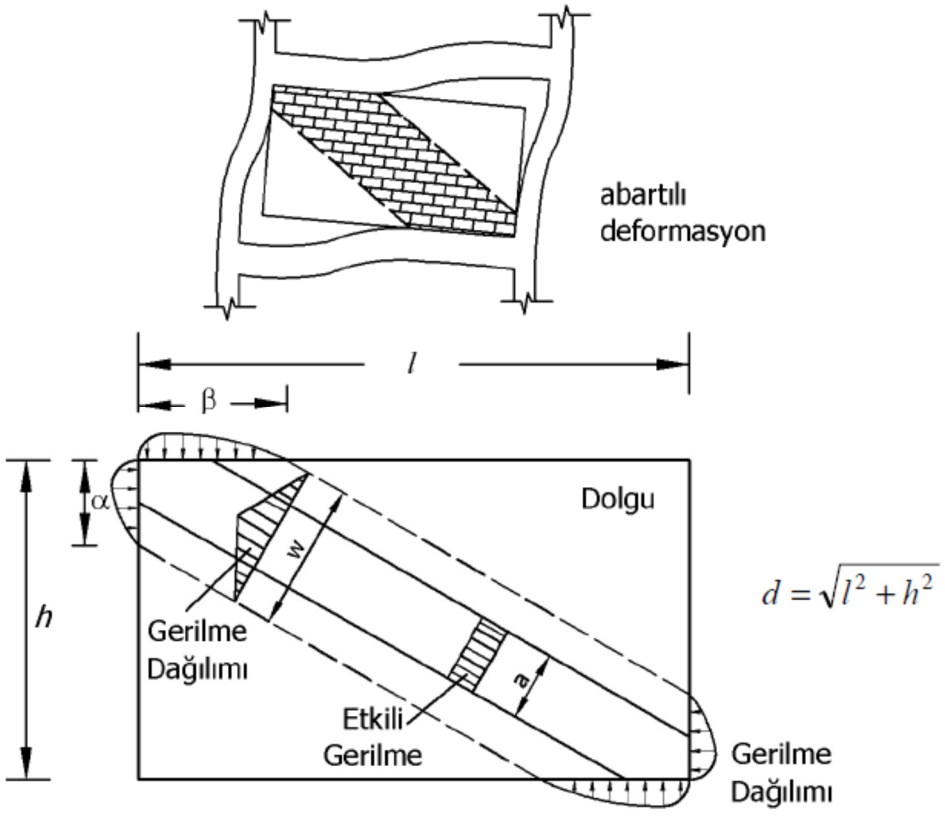
t_{dolgu} : Dolgu duvarın kalınlığı

θ : Dolgu duvar köşegeninin yatayla yaptığı açı (radyan)

k_{dolgu} : Dolgu duvarın rijitliği

V_{dolgu} : Dolgu duvar yük kapasitesinin yatay bileşeni

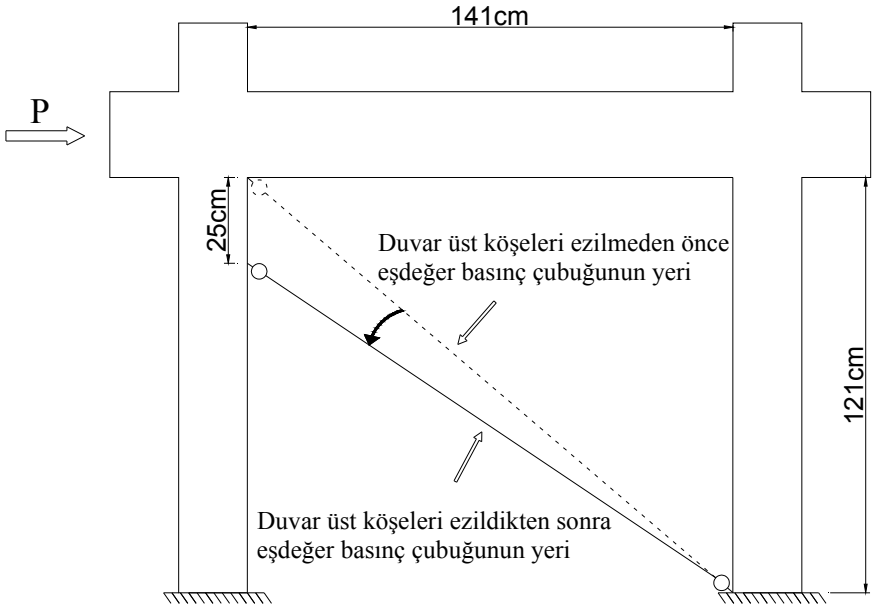
$f_{y\ dolgu}$: Dolgu duvarın yatay doğrultudaki dayanımı (yaklaşık % 50 f_d)



Şekil 7.1. Yatay yük altında duvarda oluşan basınç bölgesi ve eşdeğer basınç çubuğu [55]

7.2. R2 Deney Elemanı Üzerinde Analitik Çalışma

R2 deney elemanı, içerisinde tuğla dolgu duvar bulunan referans elemanıdır. R2'nin analitik çalışmasında dolgu duvar, eşdeğer basınç çubuğu yöntemiyle modellenmiştir. Elemanın deneysel geçmişi Bölüm 5.2'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu bölüm incelenecek olursa kolon üst uçlarında kesme çatlaklarının oluşmasıyla beraber duvar köşelerinin ezilerek dağıldığı, hemen ardından kolon üst uçlarında kesme kırılması gerçekleşerek dayanımda ani kayıp olduğu görülecektir. Dolgu duvar, üst köşelerinde ezilme gerçekleşinceye kadar klasik basınç çubuğu modellemesinde olduğu gibi davranmış, ezilme gerçekleştikten sonra ise davranış değişmiştir. Yeni durumda da dolgu duvar kolona yük aktarmaya devam etmiş ancak bu transfer kolon üst ucu birleşim noktasından yaklaşık 25 cm aşağıya kaymıştır. Yani eşdeğer basınç çubuğu, Şekil 7.2 deki gibi üst ucundan tutulup 25 cm aşağı kaydırılmış gibi davranmıştır. İşte bu durum kolon üst uçlarında kesme gerilmelerinin aşırı yoğunlaşmasına; sonuçta ise, beton dayanımı düşük ve sargılaması yetersiz olan kolonun kesmeden göçmesine neden olmuştur.



Şekil 7.2. Duvar köşeleri ezildikten sonra basınç çubuğunun yer değiştirmesi

Sonuç olarak yükte ani düşme ve dayanımda önemli kayıp, dolgu duvar köşelerinin ezilmesiyle meydana gelmiştir. Dolayısı ile sistemin yük kapasitesi, dolgu duvarın ezilmesi için gerekli yatay yükün miktarı ile betonarme çerçevenin ezilme anına kadar sağlamış olduğu ilave dayanımın toplamına yaklaşık eşit olacaktır.

Öncelikle eşdeğer basınç çubuğunun genişliğini (a_{dolgu}) bulmak için Eş. 7.1 ve Eş 7.2 kullanılmıştır. Bu eşitliklerde yer alan terimlerden; dolgu duvarın kalınlığı (t_{dolgu}) 120 mm, yüksekliği (h_{dolgu}) 1210 mm, köşegen uzunluğu (d_d) 1858 mm, köşegenin yatayla yaptığı açı (θ) 0,71 radyandır. Kolon boyu (h_{kol}) alt ve üst kiriş aksları arasındaki mesafe olarak belirtilmiştir, ancak deney elemanlarının tek katlı ve son derece rijit bir temele sahip olması nedeni ile bu mesafe temel üst yüzünden kiriş aksına kadar alınmıştır ve değeri 1335 mm'dir.

Betonarme çerçevenin "yaklaşık" elastisite modülü ($E_{çer}$) TS 500'de beton için önerilmiş olan Eş. 7.5 ile hesaplanmıştır. Burada f_{ck} karakteristik beton basınç dayanımını göstermektedir. Eşitlikte f_{ck} yerine, ortalama dayanımın (f_c) kullanılması, mevcut çalışma için ihmal edilebilir düzeyde hata oluşturabileceği bilinmektedir. Dolayısıyla R2 elemanı için geçerli ortalama beton basınç dayanımı f_c= 10 MPa, eşitlikte yerine yerleştirildiğinde, $E_{çer}$ değeri yaklaşık 24300 MPa bulunmaktadır.

$$E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \ \ (MPa) \tag{7.5}$$

Dolgu duvarın dayanımı (f_d) ve elastisite modülü (E_{dolgu}) Deprem Yönetmeliğinde (2007) önerilen yaklaşık yöntemlerle belirlenmeye çalışılacaktır. Yönetmeliğe göre duvarda kullanılan bloğun, deneysel olarak elde edilen serbest basınç dayanımının % 50'si, f_d olarak kullanılabilir [52].

Hatırlanacağı gibi bu çalışmada kullanılan yatay delikli tuğlaların her üç ekseni doğrultusunda da basınç deneyleri yapılmış ve bkz. Çizelge 4.6 sonuçları sunulmuştur. Ayrıca depremde en olumsuz davranışı gösterdiği bilindiği için, duvar imalatı sırasında üst köşelere delikleri yukarı bakacak şekilde, kırılmış yarım tuğla denk getirilmiştir. Bu durumda duvarın kolonla temas ettiği kenardaki son tuğlanın delik yönü bir sırada yatayken (tam), bir alt ve üst sırada düşey yönlü (yarım) olarak denk gelmiştir. Dolayısı ile tuğla dayanımını, her iki yön doğrultusunda yapılan deneylerden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olarak almak daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Bu durumda ortalama tuğla dayanımı (20+8,8)/2= 14,4 MPa çıkmaktadır. Bulunan değerin % 50 si olan 7,2 MPa, f_d olarak alınabilir [52]. FEMA (1998:197)'ye göre, duvar dayanımının (f_d) % 50'si de, dolgu duvarın yatay doğrultuda beklenen dayanımını ($f_{y\ dolgu}$) yaklaşık olarak vermektedir [54]. Buradan Eş. 7.4'de kullanılacak $f_{y\ dolgu}$ değeri 3,6 MPa olarak bulunmaktadır.

Dolgu duvarın "yaklaşık" elastisite modülü (E_{dolgu}), Deprem Yönetmeliği (2007) de önerilen yöntemle yaklaşık olarak f_d'nin 200 katı olarak alınabilir [52]. Buradaki yaklaşım kullanılarak E_{dolgu} değeri 1400 MPa alınmıştır.

Yapılan kabuller ve hesaplamalar sonucu elde edilen geometrik ve malzeme özellikleri, Eş 7.1 ve 7.2'ye yerleştirildiğinde, eşdeğer basınç çubuğunun genişliği (a_{dolgu}) 225 mm çıkmaktadır. Bulunan a_{dolgu} değeri, Eş. 7.4'de kullanılarak çözüm yapılırsa, dolgu duvarın yatay doğrultuda taşıyabileceği yaklaşık kuvvet (V_{dolgu}) 73 kN çıkmaktadır.

Sıradaki analiz betonarme çerçevenin dayanıma sağladığı katkının miktarı ($V_{çer}$) açısından yapılacaktır. Bilindiği gibi R2 elemanı deneyinde, tuğla duvarın ezilmesi gerçekleşirken, kolon üst uçlarında kesme çatlakları oluşmuştu. Dolayısı ile kolon üst uçlarının kesmedeki çatlama dayanımı, betonarme çerçevenin dayanıma sağladığı katkı olarak, dolgu duvarın yatay doğrultuda taşıyabileceği yaklaşık kuvvete (V_{dolgu}) eklenecektir. Eksenel yükün olmadığı durumlarda, kolonların kesmede çatlama dayanımı, TS 500'de önerilmiş olan Eş. 7.6 ve 7.7 ile hesaplanmıştır. Hesap yapılırken betonun karakteristik ve tasarım dayanımları değil, ortalama dayanımı olan (f_c =10 MPa) kullanılmıştır.

$$V_{cr} = 0{,}65 f_{ctd} b_w d \tag{7.6}$$

$$f_{ctk} = 0{,}35\sqrt{f_{ck}} \tag{7.7}$$

V_{cr} : Betonarme kesitin çatlama dayanımı
f_{ctd} : Betonun tasarım çekme dayanımı
b_w : Kesit genişliği
d : Kesit faydalı yüksekliği
f_{ctk} : Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı
f_{ck} : Betonun karakteristik basınç dayanımı

Eş.7.6'ya göre hesap yapıldığında, kolonun çatlama dayanımı (V_{cr}) yaklaşık 20 kN bulunur. Betonarme çerçevedeki iki kolon için bu değer toplam 40 kN olmaktadır. Bir başka deyişle, R2 elemanında, betonarme çerçevenin dayanımda sağladığı katkı ($V_{çer}$) yaklaşık 40 kN olarak hesaplanmıştır.

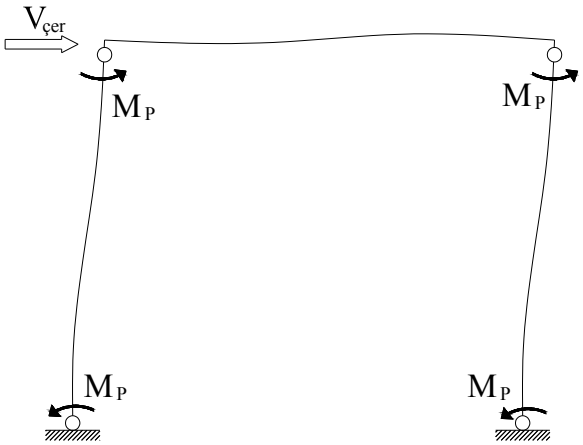
Sonuç olarak, betonarme çerçevenin taşıdığı yatay kuvvet ($V_{çer}$) olan 40 kN ile dolgu duvarın taşıdığı yatay kuvvet (V_{dolgu}) olan 73 kN toplanınca, R2 elemanının dayanımı 113 kN çıkmaktadır. Bu değer; R2 deneyi sonucunda gözlenen 120 kN dayanım değerine oldukça yakındır. Buradan da; yapılan hesapların ve kabullerin laboratuvar koşulları altında tutarlı sonuçlar verebileceği anlaşılmaktadır.

7.3. Güçlendirilmiş Deney Elemanları Üzerinde Analitik Çalışma

Bölüm 5 incelenecek olursa, kolonlarında kesmeye karşı önlem alınmış ve delikli levhalarla dolgu duvarı güçlendirilmiş tüm elemanlarda ortak bazı davranışların sergilendiği görülecektir. Bu davranışlardan, analitik çalışma için gerekli olan çıkarımları şöyle özetleyebiliriz.

Bütün elemanların deneylerinde, kolonların alt ve üst uçlarında plastik mafsallar oluşmuştur. Deneyler ya ölçüm ya da kolon alt uçlarındaki plastik mafsallarda dönme kapasitesi dolduğu için bitirilmiştir. Bilindiği gibi içi boş betonarme çerçeveden oluşan referans elemanı (R1) da oldukça benzer davranış göstermiş, kolon alt ve üst uçlarında plastik mafsallar oluştuktan sonra taşıma gücüne ulaşmıştır. Göçme modlarındaki bu benzerlik sayesinde; R1 elemanının dayanım değerinin, güçlendirilmiş elemanlarda betonarme çerçevenin dayanım konusunda sağladığı ilave katkıya yaklaşık eşit olduğu düşünülebilir. Dolayısı ile öncelikle R1 elemanı üzerinde analitik çalışma yapılacak ve çıkan sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılacaktır.

R1 elemanı, Şekil 7.3'de gösterildiği gibi kolon uçlarında oluşan dört adet plastik mafsal sayesinde taşıma gücüne ulaşmıştır. Kolonların eğilmeye göre kesit taşıma gücü değeri, kolonlar için daha önce çizilmiş olan karşılıklı etkileşim diyagramından alınabilir (bkz Şekil 6.29). Kolon eksenel yük düzeyi % 0 iken kesit moment kapasitesi 14,6 kNm hesaplanmaktadır. Bu değer aynı zamanda kolonda oluşan plasik mafsalların moment kapasitesine (M_p) eşittir. Toplam plastik moment miktarının ($4M_p$), kuvvet koluna yani kolon üst ucundan temel üst yüzüne olan mesafeye (1,21 m) bölümü, sistemin yatay yük altında dayanımını ($V_{çer}$) verecektir. Bahsi geçen hesap yapıldığında $V_{çer}$ değeri 48 kN bulunmaktadır. Analitik olarak hesaplanmış 48 kN dayanım, deneysel olarak elde edilmiş dayanım değerlerini (ileri yönde +50 kN, geri yönde -47 kN) oldukça tutarlı örtüşecek şekilde doğrulamaktadır.



Şekil 7.3. R1 elemanının göçme modu

Güçlendirilmiş deney elemanlarında dolgu duvar köşelerinde yine ezilme olmuş, ancak delikli levhaların oluşturduğu sargılama etkisiyle duvar, bütünlüğünü % 7,5'den büyük ötelenme oranlarında dahi tamamen korumuştur. Duvar orta bölgelerinde çatlaklar oluşmuş ancak kılcal düzeylerde kalmıştır. Sergilenen bu davranış nedeniyle, aynı R2 elemanında olduğu gibi, köşelerin ezilmesi durumunda kullanılan Eş. 7.4'ün, güçlendirilmiş duvar hesaplarında da kullanılabileceği düşünülmüştür.

Güçlendirilmiş elemanların, dolgu duvarlı referans elemana (R2) göre dayanım artışı 1,5 ile 2 kat arasında olmuştur (bkz. Çizelge 6.1). Güvenli bir yaklaşımla güçlendirilmiş elemanlarda en az 185 kN dayanıma ulaşıldığı söylenebilir (bkz. Çizelge 6.1). Bunun yaklaşık 48 kN'unun betonarme çerçeve tarafından taşındığı hesaplanmıştı. Bu durumda geriye kalan 137 kN yükün güçlendirilmiş dolgu duvar tarafından karşılandığı düşünülebilir. R2 elemanının yalın duvarı tarafından 73kN taşındığının hesaplanmış olması, delikli levhaların takviyesiyle beraber, ilave olarak sistemin en az 64 kN daha fazla dayanım kazandığını göstermiştir. Özetle güçlendirilmiş dolgu duvar bazında bakıldığında dayanımdaki artış, yalın duvara göre en az 1,8 kat olmuştur.

Dolgu duvar dayanımında gözlenen bu artışın ana sebebi sargılama basıncının artması olarak gözükmektedir. Bilindiği gibi delikli levhalar tuğla duvarın her iki yüzüne birden yerleştirilmiş, ya 104 ya da 118 adet bulonla karşılıklı olarak bağlanmış ve son alarak 3,5 Nm torkla bulonların somunları sıkılmıştır. Verilen bu tork değeri, 6 mm çapındaki bulonlarda akma kapasitesinin yaklaşık % 75'i kadar eksenel yük (3,6 kN) oluşturmaktadır.

Sargılama basıncı direk malzeme dayanımını arttırabilen bir faktördür. Ancak güçlendirilmiş duvarlarda gözlenen dayanım artışındaki tek sebebin bu faktör olduğu düşünülmemektedir. Deneylerde, delikli levhaların da tuğla duvarı dıştan membran gibi sardığı, böylece tersinir tekrarlanır yükler altında parçaların koparak dökülmesinin engellendiği gözlenmiştir. Duvar bütünlüğünün bu şekilde korunması, ötelenmelerin arttıkça delikli tuğlanın ezilerek levhalar arasında sıkışmasına neden olmuştur. Bu sıkışma da gerilme yığılmalarının yoğun olduğu köşe bölgelerinde boşlukların azalarak ötelenmeye karşı direncin artmasına, dolayısı ile dayanımın artmasına yardımcı olmuştur.

Ayrıca son derece gevrek davranış sergilediği bilinen tuğla duvarlar, güçlendirmeyle birlikte oldukça sünek davranış sergileyebilmiş ve şekil değiştirmeye karşı toleransı oldukça artmıştır. Ötelenmeler arttıkça bu yeni davranış, betonarme çerçevenin şekil değiştirmesine, güçlendirilmiş duvarında sıkışarak ayak uydurmasını sağlamış, dolayısı ile mekanik yaslanma olan bölgenin, yani basınç çubuğu genişliğinin (a_{dolgu}) artmasına sebep olmuştur. Eş. 7.4'incelenecek olursa a_{dolgu} boyutunda meydana gelen artışın doğru orantılı olarak V_{dolgu}'yu arttırdığı görülecektir.

Dayanım artışına sebep olduğu düşünülen bir diğer faktörde şöyle özetlenebilir. Yatay yük altında, duvarda oluşan çapraz basınç bölgesinde, bir başka deyişle basınç çubuğu doğrultusunda asal basınç gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 7.1). Asal basınç gerilmelerine dik yönde ise asal çekme gerilmelerinin oluştuğu mukavemet derslerinden bilinmektedir. Çekme gerilmeleri aynı betonda olduğu gibi, tuğla malzemesinde de daha kritiktir. Bu gerilmeler etkisiyle duvar çatladıktan sonra taşınabilecek kesme kuvvetleri, çatlak düzleminde oluşan sürtünme kuvvetleriyle sınırlı kalmaktadır. Deneyler, delikli levhaların, duvarda oluşan çekme kuvvetlerinin bir bölümünü üzerine alarak çatlakların oluşmasını engellediğini veya geciktirdiğini göstermiştir. Çatlaklar oluşsa bile, delikli çelik levha çekme kuvvetlerini karşılamaya devam etmiş, böylece %7,5 ötelenme oranlarında dahi duvar kararlı bir şekilde yük almıştır. Bu durumun doğal sonucu olarak duvar dayanımı artmıştır.

Delikli levhaları kolonlara bağlantısı yapılan elemanlarda güçlendirme malzemesi aynı zamanda çekme çubuğu gibi de çalışmıştır. Kolonlara bağlantısı yapılmayan elemanlara göre dayanımda %10'luk bir ilave artış sağlanmıştır.

Yalın duvara göre, en az 1,8 kat dayanım artışına neden olduğu düşünülen faktörler yukarıda anlatılmaya çalışılmıştır. Ancak bu faktörlerden hangisinin ne oranda etkili olduğunu söylemek ve bu konuda genel bir yargıya varmak, eldeki verilerle şu an oldukça aldatıcı olabilir. Ancak problemin oldukça karmaşık olması; basit, güvenli bir yaklaşım önerilemeyeceği anlamına gelmemektedir. Bu konuda dayanağı yeterince kuvvetli olmayan, zorlama eşitlikler türetip, uygulayıcıyı bu eşitliklere mahkûm etmektense, basit yaklaşımlar önerilmiştir.

Güçlendirmenin mevcut çalışmadaki gibi yapılması durumunda, güçlendirilmiş duvar dayanımı eş değer basınç çubuğu yöntemiyle bulunabilir. Buna göre Eş. 7.1, 7.2, 7.4'den faydalanılabilir. Sadece dolgu duvarın alabildiği yatay kuvveti veren Eş. 7.4'e 1,8 çarpan katsayısı eklenebilir. Buna göre güçlendirilmiş duvarın taşıyabildiği yatay kuvvet (V_{gdolgu}) Eş. 7.8'deki gibi hesaplanabilir.

$$V_{gdolgu} = 1{,}8\, a_{dolgu}\, t_{dolgu}\, f_{y\,dolgu}\, cos\theta \qquad (7.8)$$

Güçlendirilmiş bazı elemanların deneylerinde 2,4 kata kadar rijitlikte artış sağlanabilmiş, genel olarak ise bütün elemanlarda mevcut rijitliğin en azından muhafaza edilebildiği anlaşılmıştır. Güçlendirilen dolgu duvarın rijitlitliği mevcut duvarın rijitliğine eşit alınarak güvenli yönde çözüm yapılabilir. Bu durumda tuğla dolgu duvarın rijitliğini hesaplamakta kullanılan Eş. 7.3, çalışmadaki yöntemlerle güçlendirilmiş tuğla duvarlar içinde önerilebilir.

Bilindiği gibi güçlendirilmiş duvarlar, % 7,5'den büyük ötelenme oranlarında dahi bütünlüğünü tamamen korumuş, betonarme çerçeveye desteğini sürdürerek sistemin taşıdığı yükte önemli bir kayıp olmasını engellemiştir. Güçlendirilmiş duvarların bu şekilde sünek davranması, duvardaki göreli kat ötelenme oranı için bir sınır koyma gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Deprem yönetmeliğinde (2007), güçlendirilmiş dolgu duvarlar için güvenlik sınırı, % 0,35 göreli kat ötelenmesi oranıdır [52]. Delikli levhalarla güçlendirilmiş duvarları bilgisayar programlarında eşdeğer basınç çubuğu gibi modellerken, çubuğun elasto-plastik davranış gösterecek şekilde tanımlanması gerçek davranışın yansıtılabilmesi açısından daha uygun olacaktır. Basınç çubuğu eksenel yük değeri kapasiteye ulaşıncaya kadar elastik davranış göstermeli, bu noktadan sonra ise sabit yük altında deformasyonlara izin vermelidir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında; delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların çerçeve davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yürütülmüştür.

Deney elemanları ½ ölçekli olup, kolon kiriş ve temelden oluşan betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Eleman üretiminde ülkemizdeki güçlendirme ihtiyacı doğan yapılarda sık rastlanan kusurların (düşük beton dayanımı, seyrek ve eksik etriye, özensiz duvar işçiliği) bulunmasına özen gösterilmiştir. Oluşturulan yalın elemanlar delikli çelik levhalarla takviye edilmiş ve depremi benzeştiren yükler altında test edilmiştir. Test edilen deney elemanlarının performansları taşıma gücü, süneklik, ötelenme oranı, rijitlik, enerji dönüştürme ve genel davranış bakımından değerlendirilmiş, birbirleriyle ve CFRP kullanılarak yapılan geçmiş çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar, analitik yaklaşımlarla analiz edilmiş, güçlendirilmiş elemanlar için analitik bir yöntem de önerilmiştir. Bu bölümde ise ortaya çıkan sonuçların özeti sunulmuş ve araştırmanın amacı doğrultusunda geliştirilen yöntemler içinde en üstün davranışı sergileyenler belirlenmeye çalışılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada kazanılan tecrübelerin ışığında, yapılacak benzer çalışmalara veya yöntemi gerçek yapılara uygulamak isteyen mühendislere yön vermek amacıyla öneriler de sunulmuştur.

Sonuçların ve önerilerin sınırlı sayıdaki deneylerden elde edilen verilere dayandığı unutulmamalıdır. Çıkan sonuçların ise bu çalışmadaki deneylerin özelliklerine ve koşullarına bağlı olduğu için kesin ve mutlak yargılara vararak genelleme yapmak için henüz erken olduğu bilinmelidir.

Ünlü mucit ve fizikçi Nikola Tesla'nın "Bilim insanı hemen sonuç elde etmeyi amaçlamaz… Onun çalışması gelecek için tohumu eken birisi gibi olmalıdır. Onun görevi sonraki gelenler için temel hazırlamak ve yol göstermektir." sözleri bu konuyu oldukça iyi özetlemektedir.

8.1. Sonuçlar

- Geliştirilen yeni güçlendirme yöntemi kullanılarak tuğla dolgu duvarlı betonarme binaların kolaylıkla depreme karşı güçlendirilebileceği, olası göçmelerin önlenerek can ve mal kayıplarının en aza indirilebileceği düşünülmektedir.

- Delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş bütün elemanlarda, betonarme çerçevenin kolon boy demirleri kopmadığı sürece dayanımda önemli bir kayıp (%15) olmadan % 7,5' den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmiştir. Üstelik güçlendirilmiş tuğla duvarlarda deney sonuna kadar eleman dayanımını önemli oranda etkileyecek hasar oluşmamıştır. Bir başka deyişle deney elemanlarının ötelenme oranını güçlendirilmiş duvar değil, dışında bulunan kolonların dönme kapasitesi belirlemiştir.

- Bilindiği gibi depremde meydana gelen can kayıplarının bir bölümü dolgu duvarın parçalanıp yerinden koparak, yapı içerisinde ve çevresinde bulunan insanların üzerine düşmesiyle meydana gelmektedir. Bu çalışmada, % 7,5 kat ötelenmesi oranlarına ulaşıldığı deneyin son aşamalarında dahi tuğla duvar, delikli çelik levhaların oluşturduğu sargılama etkisiyle bütünlüğünü tamamen korumuş ve stabil şekilde yerini muhafaza etmiştir. Bu durum ise geliştirilen yöntemin sadece güçlendirme yöntemi değil, aynı zamanda yapı içinde ve çevresinde bulunanların can güvenliğini önemli ölçüde arttırabilecek bir tedbir olduğunu göstermiştir.

- Dayanıma sağlanan katkı ise karbon kumaşla yapılan ve oldukça popüler olan geçmiş çalışmalara benzer çıkmıştır. Sayısal olarak da ifade etmek gerekirse yaklaşık 1,5 ile 2 kat arasında taşıma gücünde artış olduğu söylenebilir. Bu değerler, karbon kumaşla yapılan çalışmalara göre oldukça yüksek ötelenme oranlarına çıkılırken, dayanım konusunda da taviz verilmediğini göstermektedir.

- Bu araştırma, geliştirilen yöntemler kullanılarak delikli çelik levhalarla güçlendirilen tuğla dolgu duvarın, yapı davranışına olumlu katkı sağlayabilmesi için dışında bulunan betonarme çerçevenin kolonlarında yeterli kesme güvenliğinin bulunması gerektiğini göstermiştir. Eğer yeterli kesme güvenliği yoksa bu çalışmada kullanılan yöntemle veya geçerliliğini kanıtlamış başka bir yöntemle kolonların kesme kapasitesi de mutlaka arttırılmalıdır.

- Delikli levhalarla yapılan takviyenin enerji dönüştürme kapasitesinde sağladığı katkı en az 4,7 kattan büyük olmuştur. Bununla beraber bu artışlara (4,7 ve 6,7 kat arasında) dayanımda önemli bir kayıp oluşmadan ulaşılmıştır.

- Hali hazırdaki tuğla duvarın çerçeve rijitliğini önemli ölçüde arttırabileceği bilindiğinden, delikli çelik levhalarla takviyenin asıl amacının sistemin rijitliğini arttırmak olmadığından daha önce bahsedilmişti. Buna rağmen güçlendirilmiş bazı elemanlarda 2,4 kata kadar rijitlikte artış sağlanabilmiş, genel olarak ise bütün elemanlarda mevcut rijitliğin muhafaza edilebildiği anlaşılmıştır.

- 1 ve 2 mm kalınlığında delikli levhalar ile takviye edilen deney elemanlarının nihai dayanımları yaklaşık eşit olmuştur. 1,5 mm delikli levha kalınlığına sahip elemanlar dayanım açısından en yüksek değerlere ulaşabilmiştir. Bu elemanların dayanımları diğerlerine göre yaklaşık % 13 daha fazla olmuştur. 2 mm levha kalınlığına sahip elemanlar nihai dayanımlara daha büyük deformasyonlardan sonra ulaşabilmiştir.

- En yüksek rijitlik değerlerine 1,5 mm levha kalınlığına sahip elemanlarda ulaşılmıştır. Bu gruptaki elemanlar; 1 mm kalınlığında levhalarla takviye edilen elemanlara göre ortalama %10, 2 mm kalınlığında levhalarla takviye edilen elemanlara göre ise ortalama % 70 daha rijit davranmıştır.

- 2 mm'lik grupta yer alan elemanların dayanım ve özellikle rijitlik konusunda 1,5 mm' lik gruba göre beklentilerin altında kalması çerçeve davranışının biraz değişmesinden kaynaklanmıştır. Bilindiği gibi 2 mm kalınlığındaki levhalarla takviye edilen elemanların deneylerinde kolon-temel birleşim ara kesitinde kısa konsollardakine benzer kesme hasarları oluşmuştur. Bu şekilde oluşan kesme hasarı neticesinde uç bölgelerde ötelenmeye karşı direnç azalarak sistemin rijitliği düşmüştür. Bu durum, elemanlardaki beton dayanımının hedeflenen değerin altında ve 1,5 mm'lik grubun ise oldukça altında çıkmasına, ayrıca artan levha kalınlığı ile dolgu duvarın rijitliğinin artmasına bağlanabilir.

- Güçlendirilmiş duvar kolonlara bağlantı yönteminin dayanıma etkisinin genel sonucuna bakılacak olursa, bağlantının var olduğu elemanların taşıma gücü olmayanlara göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Aradaki fark ortalama %10 olmakla beraber, en az fark 1,5 levha kalınlığına sahip deney elemanları arasındaki kıyaslamada gözlenmiştir.

- Kolonlara bağlantısı yapılan deney elemanları ulaşılan nihai dayanımları korumakta daha kararlı davranmıştır.

- Kolonlara bağlantısı yapılan deney elemanlarında, betonarme çerçeve ile duvar arasındaki ayrışma oldukça sınırlı olmuştur. Gerçekte yapıya yük her zaman tek bir yönden gelmeyeceği için kolonlara bağlantının yapılması durumunda, güçlendirilmiş tuğla duvarın daha stabil durabileceği ve daha istikrarlı bir şekilde yük alabileceği anlaşılmaktadır.

- Köşe bölgelerde alınan standart önlemler oldukça işe yaramış ve sonuçta orta bölgede bulon aralığının 150 den 200 mm'ye düşürülmesi davranışta herhangi bir olumsuz değişikliğe neden olmamıştır. 200 mm bulon aralığına sahip her elemanın dayanım, ötelenme oranı, rijitlik ve enerji dönüştürme değerleri 150 mm bulon aralıklı karşılaştırma elemanıyla yaklaşık eşit çıkmıştır.

- Kolonları birbirine bağlayıp yük aktarması için açıklık boyunca kullanılan çelik çubuklar davranışı iyileştirerek kolonların dışa ötelenmesini sınırlamıştır. Ancak güçlendirilmiş duvarın kolonlara bağlandığı elemanlarda, bu çekme çubuklarının kaldırılması önemsenecek boyutta bir sorun oluşturmamıştır.

- Duvar-kolon bağlantı lamalarından en dışta yer alan dört sıranın, duvar köşelerinde yer alan "L" şeklindeki lamalara üst yüzünden kaynaklanması, duvarın bu bölgesinde yer alan bulonların beraber çalışmasını sağlamıştır. Böylece köşe bulonlarda oluşan gerilme yığılmaları azaltılarak, ileri deformasyonlarda kesilip kopmaları önlenmiş veya geciktirilmiştir.

- Deneyler; en iyi davranışın kesmeye karşı güçlendirilmiş kolonlara, 1,5 mm kalınlığındaki delikli çelik levhalarla takviye edilen dolgu duvarın bağlanmasıyla elde edilebildiğini göstermiştir. Köşe bölgelerde, mevcut çalışmada önerilen standart önlemler alındığı sürece bulon aralığının 200 mm olmasında ise herhangi bir sakınca bulunmadığı anlaşılmıştır.

8.2. Öneriler

- Delikli levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarın kolonlarla bağlantısının yapılması, davranışı biraz daha iyileştirmesi ve duvarın depremde stabil kalması açısından önerilmektedir. Eğer bu bağlantı yapılamıyorsa kolonları üst uçtan birbirine bağlayan çekme çubukları mutlaka kullanılmalıdır. Bu çelik çubuklar kolonların dışa ötelenmesini sınırlamaktan başka deprem sırasında duvarın yekpare şekilde düzlem dışına devrilmesini de engelleyebilecektir.

- Bu yöntemin tasarımcılar tarafından modellenmesi gerektiğinde şu kabuller kullanılabilir. Bina içerisinde mevcut tuğla duvarlardan bu yöntemle güçlendirilecek olanlar artık hesaplara katılabilir ve yalın dayanımlarının 1,8 katına kadar üzerine düşen deprem kuvvetini taşıyabileceği varsayılabilir. Güçlendirilen dolgu duvarın rijitliği mevcut duvarın rijitliğine eşit alınarak çözüm yapılabilir. Güçlendirilmiş duvarların süneklikle ilgili bir sıkıntı yaşamayacağı öngörüldüğünden, duvardaki göreli kat ötelenme oranı için ise bir sınır koymaya gerek olmadığı düşünülmektedir.

- Bu çalışmada kolonlara eksenel yük verilmediği göz ardı edilmemelidir. Eksenel yükün gerçekte olan ve performans düzeyini etkileyen önemli bir faktör olduğu bilindiğinden mutlaka gelecekte kolonları eksenel yüklü elemanlarda geliştirilen yöntem araştırılmalıdır. Yalnız kolonlara verilecek eksenel yük düzeyi %10N_o'larda tutulmamalı, gerçekte olduğu gibi %50N_o'lara çıkılmalıdır.

- Bilindiği gibi eksenel yük miktarı arttıkça kolonların da kesme kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda kolonlara gerçektekine benzer olarak %50N_o'lara varan eksenel yük verilmesiyle beraber, kesme kapasitelerinde % 30'a varan artışlar beklenmektedir. Böylece bu çalışma serisinde kolonlarda gözlenen kesme hasarları, eksenel yükün de verildiği elemanlarda hiç oluşmayabilir veya sınırlı kalabilir. Özellikle 2 mm levha kalınlığına sahip elemanlarda gözlenen kısa konsol tipi kesme hasarı neticesi yaşanan rijitlikteki düşüşe ileride yapılacak deneylerde rastlanmayabilir.

- Davranışın daha iyi kestirilebilmesi ve malzeme kullanımındaki boyut etkilerini aşmak amacıyla ileride mutlaka 1/1 ölçekli deneyler yapılmalıdır.

- Kolonların kesmeye karşı, bu çalışmada kullanılan yöntemle, çelik profillerle mantolanarak güçlendirilmesi deneylerde geçerliliğini kanıtlamıştır ve uygulamada da önerilebilir. Bu yöntemde kolon dıştan sarıldığı için sargılama etkisi üst düzeye çıkarılabilmekte ve kolon kesiti önemsenecek ölçüde değişmemektedir. Dolayısı ile delikli levhalar gibi, çelik manto da imalattan sonra kolaylıkla alçı sıva ile gizlenebilir. Çelik malzemelerde kaynak imalatı da yapılabildiği için bağlantılar daha kolay ve güvenli yapılabilir.

- Kolonların mantolanmasında emeğin ve malzemenin sadece kesme kuvvetine karşı güçlendirmek amacıyla harcandığı düşünülmemelidir. Mevcut çelik manto çok küçük ilavelerle eksenel yük de taşıyacak hale getirilebilir. Ayrıca çelik mantonun alt ve üst uçlarının döşemeye veya kirişlere tutturulmasıyla da kolonların alt ve üst uç, ara kesitlerinin kesme hasarı alıp dışa doğru ötelenmesi önlenebilir.

- Tuğla duvarların l_{duvar}/h_{duvar} oranı, çerçeve davranışını ve performansını etkileyebilen başka bir faktördür. Bu çalışmada üretilen tuğla duvarlarda, l_{duvar}/h_{duvar} oranı laboratuvar koşulları da göz önünde bulundurularak sabit tutulmuş ve 1,16 alınmıştır. Bu oran gerçekte de sık rastlanan oranlara yakın olmakla birlikte genelleme yapmak yanlış olacaktır. Dolayısı ile gelecekte l_{duvar}/h_{duvar} oranı değişik betonarme çerçeveler için de yöntemin etkinliği araştırılmalıdır.

- Yapılan malzeme testleri sonunda yatay delikli tuğlaların delikleri doğrultusunda diğer yönlere göre yaklaşık 1,4 kat daha fazla dayanım gösterdiği görülmüştür (bkz.Bölüm 4.5.3, Çizelge 4.6). Genelde piyasadaki duvar imalatı sırasında yarım tuğlaya ihtiyaç duyulan noktalarda (köşe ve kenarlar), tuğla ortadan kırılmakta ve delikleri yukarı bakacak şekilde yerleştirilmektedir. Böylece deprem yükleri altında zaten gerilmelerin yoğunlaştığı duvar köşeleri farkında olmadan ciddi ölçüde zayıflatılmaktadır. Bu durum ise kolonların kısa kolon davranışı göstererek kesmeden göçmesini, tıpkı bu çalışmadaki gibi (bkz. R2 elemanı) kolaylaştırabilmektedir. Piyasada bu iş için özel olarak üretilmiş yarım başlangıç tuğlaları da satılmaktadır. Duvar imalatı sırasında gereken yerlerde bu tuğlaların kullanılması ve kullanımının teşvik edilmesi önerilmektedir.

- Bina kolonlarında ortalama beton basınç dayanımının 8 MPa altına düştüğü durumlarda, çalışma kapsamında geliştirilen yöntemin uygulanması tavsiye edilmemektedir.

- Delikli levhalarla güçlendirilecek duvarın pencere veya kapı boşlukları içermemesine ve tamamı ile betonarme çerçeve içinde olmasına dikkat edilmelidir. İmalatı şakülünde yapılmamış dolgu duvarlarda yöntemin uygulanması tavsiye edilmemektedir.

- Gerçek yapıdaki duvar boyutları kadar geniş delikli levhanın üretilememesi durumunda, birleşimleri bindirmeli yapmakta herhengi bir sakınca bulunmamaktadır. Detaylar için [5] numaralı kaynak incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Sevil, T., Baran, M. ve Canbay E. (2010). Tuğla Dolgu Duvarların B/A Çerçeveli Yapıların Davranışına Etkilerinin İncelenmesi; Deneysel ve Kuramsal Çalışmalar. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2(2), 35-42.

2. Marjani, F. ve Ersoy, U. (2002). Behavior of Brick Infilled Reinforced Concrete Frames Under Reversed Cyclic Loading. *ECAS2002 International Symposium on Structural and Earthquake Engineering*, ODTU, Ankara, 143-150.

3. Hashemi, A., ve Mosalam, K.M. 2006. Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall. *Earthquake Eng Struct Dynam*, 35(14), 1827–1852.

4. Aykaç, S., Aykaç, B., Kalkan, İ. ve Özbek, E. (2012). Strengthening of RC T-Beams with Perforated Steel Plates. *Magazine of Concrete Research,* 65(1), 37-51.

5. Babayani, R. (2012). *Delikli Çelik Levhalarla Güçlendirilmiş Tuğla Duvarların Tersinir Tekrarlanır Yükler Altındaki Davranış ve Dayanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

6. Seydanlıoğlu, M. (2013). *Delikli Çelik Levhalarla Güçlendirilmiş Tuğla Duvarların Davranış ve Dayanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

7. Altın, S., Anil, Ö., Kara, M.E., Kaya, M. (2008). An Experimental Study on Strengthening of Masonry Infilled RC Frames Using Diagonal CFRP Strips. *Composites: Part B*, 39, 680-693.

8. Erdem, İ., Akyüz, U., Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2006). An Experimental Study on Two Different Strengthening Techniques for RC Frames, *Engineering Structures,* 28, 1843-1851

9. El-Dakhakhni, W.W., Hamid, A.A., Hakam, Z.H.R. ve Elgaaly, M. (2006). Hazard Mitigation and Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using Composites. *Composite Structures,* 73, 458-477.

10. Anil, Ö., Tatayoğlu, M. ve Demirhan, M. (2012). Out-Of-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Brick Walls Strengthened with CFRP Strips. *Construction and Building Materials,* 35, 614-624.

11. Ozkaynak, H., Yuksel, E., Buyukozturk, O., Yalcin, C. ve Dindar, A.A. (2011). Quasi-Static And Pseudo-Dynamic Testing Of Infilled RC Frames Retrofitted With CFRP Material. *Composites: Part B,* 42, 238–263.

12. Yuksel, E., Ozkaynak, H., Buyukozturk, O., Yalcin, C., Dindar, A.A., Surmeli, M., ve Tastan, D. (2010). Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames. *Construction and Building Materials*, 24, 596-609.

13. Akın, E. (2011). *Strengthening of brick infilled RC frames with CFRP reinforcement-general principles*. PhD thesis, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

14. Coza, H., (2009). *Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Karbon Lifli Kompozitlerle Güçlendirilmesi.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

15. Tateishi, Y., Jinno, Y., Kimoto, Y., and Hattori, A. (2009) Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame with New CFRP Units Infilled Wall. *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, 1105-1116.

16. Binici, B., Özcebe, G. ve Özçelik, R. (2007). Analysis and Design of FRP Composites for Seismic Retrofit of Infill Walls in Reinforced Concrete Frames. *Composites: Part B*, 38, 575-583.

17. Papanicolaou, C., Triantafillou, T. ve Lekka M. (2011). Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials*, 25, 504–514.

18. Valluzzi, M.R., Tinazzi, D. ve Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*,16, 409–416.

19. Shrive, N.G. (2006). The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry. *Construction and Building Materials*, 20, 269–277.

20. Lunn, D. ve Rizkalla, S. (2011). Strengthening of Infill Masonry Walls with FRP Materials. *J. Compos. Constr.,* 15, 206–214.

21. Almusallam, T. ve Al-Salloum, Y. (2007). Behavior of FRP Strengthened Infill Walls under In-Plane Seismic Loading. *J. Compos. Constr.*, 11(3), 308–318

22. Aref, A. ve Jung, W. (2003). Energy-Dissipating Polymer Matrix Composite-Infill Wall System for Seismic Retrofitting. *J. Struct. Eng.*, 129(4), 440–448.

23. Koutromanos, I., Kyriakides, M., Stavridis, A., Billington, S., ve Shing, P. (2013). Shake-Table Tests of a 3-Story Masonry-Infilled RC Frame Retrofitted with Composite Materials. *J. Struct. Eng.*,139,1340–1351.

24. Kyriakides, M. ve Billington, S. (2014). Cyclic Response of Nonductile Reinforced Concrete Frames with Unreinforced Masonry Infills Retrofitted with Engineered Cementitious Composites. *J. Struct. Eng.,* 140(2), 04013046.

25. Baran, M., Aktaş, M. ve Aykaç, S. (2014). Sıvanmış Tuğla Dolgu Duvarların Şerit Beton/Betonarme Panellerle Güçlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* 29(1), 23-33

26. Baran, M. (2005). *Precast Concrete Panel Reinforced Infill Walls For Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Framed Structures.* PhD thesis, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

27. Baran, M. ve Tankut, T. (2011). Experimental Study on Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Frames by Precast Concrete Panels. *ACI Structural Journal,*108(2), 227-237.

28. Kesner, K. ve Billington, S. (2005). Investigation of Infill Panels Made from Engineered Cementitious Composites for Seismic Strengthenin and Retrofit. *J. Struct. Eng.*, 131(11), 1712–1720.

29. Frosch, R., Li., W., Jirsa, J. ve Kreger, M. (1996). Retrofit Of Nonductile Moment-Resisting Frames Using Precast Infill Wall Panels. *Earthquake Spectra,* 12(4), 741–760.

30. Özbek, E. ve Can, H. (2012). Dolgu Tuğla Duvarların Çelik Profillerle Güçlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* 27(4), 921-929.

31. Altin, S., Anil, Ö., Kopraman, Y. ve Belgin, Ç. (2010). Strengthening Masonary Infill Walls With Reinforced Plaster. *Proceedings of the Institution of Civil Engineering Structures and Buildings,* 163(5), 331-342.

32. Taghdi, M., Bruneau, M., and Saatcioglu, M. (2000). Seismic Retrofitting of Low-Rise Masonry and Concrete Walls Using Steel Strips. *J. Struct. Eng.,* 126(9), 1017–1025.

33. Choi, I. and Park, H. (2011). Cyclic Loading Test for Reinforced Concrete Frame with Thin Steel Infill Plate. *J. Struct. Eng.,* 137(6), 654–664.

34. Özçelik, R. (2011). *Seismic Upgradıng Of Reinforced Concrete Frames With Structural Steel Elements*. PhD thesis, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

35. Farooq, S.H., Ilyas, M. ve Ghaffar, A. (2006). Technique for Strengthening of Masonry Wall Panels Using Steel Strips. *Asian Journal Of Civil Engineering (Buildıng And Housing)*,7(6), 621-638.

36. Pincheira, J. and Jirsa, J. (1995). Seismic Response of RC Frames Retrofitted with Steel Braces or Walls. *J. Struct. Eng.,* 121(8), 1225–1235.

37. Sevil, T., Baran, M., Bilir, T. ve Canbay, E. (2011). Use Of Steel Fiber Reinforced Mortar For Seismic Strengthening. *Construction and Building Materials*, 25, 892–899.

38. Sevil T. (2010). Seismic strengthening of masonry infilled R/C frames with steel fiber reinforcement. The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

39. Koutas, L., Bousias, S., and Triantafillou, T. (2014). Seismic Strengthening of Masonry-Infilled RC Frames with TRM: Experimental Study. *J. Compos. Constr.,* 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000507 , 04014048.

40. Bisby, L. A., Green, M. F., ve Kodur, V. K. R. (2005). Response to Fire of Concrete Structures that Incorporate FRP. *Progress in Structural Engineering and Materials,* 7(3), 136-149.

41. ACI 440.2R-08. (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. *ACI Committe Report 440*, ABD.

42. Altin, S., Ersoy, U. ve Tankut T. (1992). Hysteretic Response Of Reinforced Concrete Infilled Frames. *ASCE J Struct Eng*,118(8),2133–2150.

43. Anil, Ö. ve Altın S., An Experimental Study on Reinforced Concrete Partially Infilled Frames, Engineering Structures, 29, 449-460, (2007).

44. Sonuvar, M., Ozcebe, G. ve Ersoy, U. (2004). Rehabilitation of reinforced concrete frames with reinforced concrete infills. *ACI Struct. J.,* 101(4), 494–500.

45. Strepelias, E., Palios, X., Bousias, S. ve Fardis, M. (2014). Experimental Investigation of Concrete Frames Infilled with rc for Seismic Rehabilitation. *J. Struct. Eng.,* 140(1), 04013033.

46. FEMA 356. (2000). Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency*, ABD.

47. Asteris, P.G., Kakaletsis, D.J., Chrysostomou, C.Z. ve Smyrou E.E. (2011). Failure Modes of In-filled Frames. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 11 (1), 11-20.

48. Haldar, P., Singh, Y. ve Paul, D.K. (2013). Identification of seismic failure modes of URM infilled RC frame buildings. *Engineering Failure Analysis*, 33, 97-118.

49. TS EN 771-1 (2005). Kâgir Birimler - Özellikler Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler (Tuğlalar). *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

50. TS 500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım Ve Yapım Kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

51. Atımtay, E. (2009). Depremde Çökmeyen Bina Nedir? Nasıl Projelendirilir? Ankara: Ajans-Türk, 277.

52. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara.

53. Aykaç, S. (2000). *Onarılmış/Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Deprem Davranışı*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

54. FEMA 306. (1998). Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. *Federal Emergency Management Agency*, ABD.

55. Baran, M., Canbay, E. ve Tankut, T. (2010). Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım. *İMO Teknik Dergi,* 21, 4959-4978.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZBEK, Eray
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16.09.1983, Gaziantep
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0 (312) 582 32 21
e-mail : erayozbek@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat müh.	2008
Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat müh.	2005
Lise	Mehmet Emin Resulzade Anadolu Lisesi	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Amatör balıkçılık, Dart, Fitness

GAZİ GELECEKTİR...