KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNDE TERS V ÇAPRAZLI BAĞLANTILARDA KULLANILABİLECEK METALİK SÖNÜMLEYİCİ GELİŞTİRİLMESİ VE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Süleyman İstemihan COŞĞUN

MAYIS 2019
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNDE TERS V ÇAPRAZLI BAĞLANTILARDA KULLANILABİLECEK METALİK SÖNÜMLEYİCİ GELİŞTİRİLMESİ VE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

İnş. Yük. Müh. Süleyman İstemihan COŞĞUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR(İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 / 04 /2019
Tezin Savunma Tarihi : 03 / 05 /2019

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Trabzon 2019

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Süleyman İstemihan COŞĞUN Tarafından Hazırlanan

ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNDE TERS V ÇAPRAZLI BAĞLANTILARDA KULLANILABİLECEK METALİK SÖNÜMLEYİCİ GELİŞTİRİLMESİ VE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16 /04/2019 gün ve 1800 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

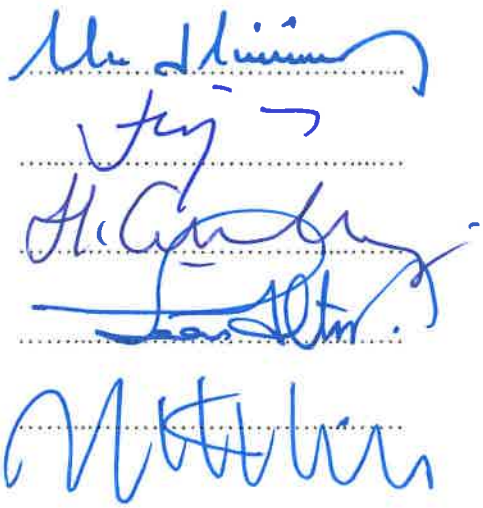
Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Üye : Prof. Dr. Selim PUL

Üye : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Prof. Dr. Sinan ALTIN

Üye : Prof. Dr. Şükrü YETGİN



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir. Lisansüstü eğitimim süresince, birlikte çalışma fırsatı bulduğum, bilimsel düşünce disiplini kazandıran, tezimin her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Sayın Metin HÜSEM'e minnet ve şükranlarımı sunmayı bir görev sayarım.

Değerli vakitlerini ayırıp tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Sayın Selim PUL ve Prof. Dr. Sayın Hamdullah ÇUVALCI ile jüri üyeliği görevini üstlenen değerli hocalarım Prof. Dr. Sayın Sinan ALTIN'a ve Prof. Dr. Sayın Şükrü YETGİN'e ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında ilgi ve yardımlarını gördüğüm, manevi olarak hep yanımda hissettiğim arkadaşlarım İnş. Müh. Samet Aktürk'e, Mohammad Manzoor NASERY'ye, Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ'e, Arş. Gör. Bayram Ali TEMEL'e, Arş. Gör. Gökhan ADIYAMAN'a, Arş. Gör. Serhat DEMİR'e, Arş. Gör. Hasan SESLİ'ye ve tüm saygıdeğer hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince beni sabırla destekleyen, aynı sıkıntı ve sevinçleri benimle birlikte yaşayan sevgili eşime, yetiştirilmemde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan değerli anne ve babama, hayatımın her aşamasında bana yol gösteren tüm aileme teşekkür ederim.

Süleyman İstemihan COŞĞUN

Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "Çelik Yapı Sistemlerinde Ters V Çaprazlı Bağlantılarda Kullanılabilecek Metalik Sönümleyici Geliştirilmesi ve Etkinliğinin Araştırılması" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Metin HÜSEM'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/05/2019

Süleyman İstemihan COŞĞUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET IX
SUMMARY X
ŞEKİLLER DİZİNİ XI
TABLOLAR DİZİNİ XXIII
SEMBOLLER DİZİNİ XXIV
GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Merkezi Çaprazlı Çelik Çerçevelerin (MÇÇÇ) Çevrimsel Yük Etkisindeki Davranışı 2
1.3. Yapılarda Enerji Tüketimi Kavramı ve Enerji Tüketim Sistemlerinin Kullanım Amaçları 5
1.4. Yapısal Kontrol Sistemleri 7
1.4.1. Pasif Kontrol Sistemleri 8
1.4.1.1. Sismik Yalıtım Sistemleri 9
1.4.1.2. Metalik Sönümleyiciler ve Sınıflandırılması 13
1.4.1.2.1. Burkulması Önlenmiş Çelik Çaprazlar 14
1.4.1.2.2. ADAS (Added Damping and Stiffness) Sönümleyici Elemanı 16
1.4.1.2.3. TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness) Sönümleyici Elemanı 18
1.4.1.2.4. E ve C Şekilli Metalik Sönümleyiciler 20
1.4.1.2.5. Bal Peteği (Honeycomb) Şekilli Metalik Sönümleyici 20
1.4.1.2.6. Eğilme Çerçeveli Metalik Sönümleyiciler 21
1.4.1.3. Sürtünme Tipi Sönümleyiciler 23
1.4.1.4. Viskoz Akışkanlı Sönümleyiciler 26
1.4.1.5. Visko-elastik Sönümleyiciler 27
1.4.1.6. Şekil Hafızalı Alaşımların (ŞHA) Kullanıldığı Sönümleyiciler 28
1.4.1.7. Ayarlı Kütle ve Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler 29
1.4.2. Aktif ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri 30
1.5. Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar 31

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı ... 39
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ... 41
2.1. Giriş ... 41
2.2. Deneylerde Kullanılan Elemanların Tasarımı, Üretimi ve Mekanik Özellikleri 41
2.2.1. Deney Elemanlarında Kullanılan Çelik Çubukların Ön Boyutlandırılması ve Üretimi ... 42
2.2.2. Deney Elemanlarında Kullanılan Dairesel Yuvalı Çelik Bloklar ve Plakalar ... 53
2.2.3. Poliüretan Elastomer Malzemenin Mekanik Özellikleri ... 57
2.2.4. Deney Elemanlarının Özellikleri ... 62
2.2.4.1. KSDE ve KDE Çelik Çubukların Kullanıldığı Sönümleyiciler ... 62
2.2.4.2. Çelik Plakaların (ÇP) Kullanıldığı Sönümleyiciler ... 66
2.2.4.3. İki Bileşenli Enerji Sönümleyici (İBES) ... 69
2.2.4.4. Üç Bileşenli Enerji Sönümleyici (ÜBES) ... 72
2.3. Deney Düzeneği ... 75
2.4. Ölçüm Sistemi, Kullanılan Aletler ve Cihazlar ... 80
2.5. Deney Elemanlarına Uygulanan Yatay Yükleme Protokolü ... 82
2.6. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi ... 85
2.6.1. Dayanım Zarfı Eğrilerinin Elde Edilmesi ... 85
2.6.2. Rijitlik Değişimlerinin Hesaplanması ... 85
2.6.3. Kümülatif Enerji Tüketme Kapasitelerinin Hesaplanması ... 86
2.6.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranlarının Hesaplanması ... 86
2.7. Sayısal Çalışmalar ... 88
2.7.1. Çeliğin Mekanik Özelliklerinin Tanımlanması ... 89
2.7.1.1. Çeliğin Eksenel Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi ... 89
2.7.1.2. Çeliğin Pekleşme Özellikleri ... 91
2.7.2. Sınır Koşulları ve Yapılan Kabuller ... 95
2.7.3. Yakınsama Çalışmaları ... 97
2.7.3.1. KSDE ve KDE Çelik Çubuklar İçin Yakınsama Çalışması ... 97
2.7.3.2. Çelik Plakalar İçin Yakınsama Çalışması ... 99
3. BULGULAR VE İRDELEMELER ... 102
3.1. Giriş ... 102
3.2. Deney Elemanlarının Çevrimsel Yükleme Etkisindeki Davranışları ... 102
3.2.1. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-1) ... 102

3.2.2. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-2) 110
3.2.3. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-3) 116
3.2.4. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-1) 124
3.2.5. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-2) 131
3.2.6. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-3) 136
3.2.7. Kalınlığı 1.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-1) 143
3.2.8. Kalınlığı 2.00 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-2) 149
3.2.9. Kalınlığı 2.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-3) 155
3.2.10. İki Bileşenli Enerji Sönümleyici (İBES) Deney Elemanı 161
3.2.11. Üç Bileşenli Enerji Sönümleyici (ÜBES) Deney Elemanı 170
3.3. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulguların Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi 180
3.3.1. Yük Taşıma Kapasiteleri 180
3.3.2. Rijitlik Değişimleri 190
3.3.3. Enerji Tüketme Kapasiteleri 197
3.3.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranları 203
3.4. Deneysel Bulguların Sayısal Çalışmalılardan Elde Edilen Veriler ile Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi 210
3.4.1. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-1) 210
3.4.2. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-2) 215
3.4.3. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-3) 220
3.4.4. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-1) 226
3.4.5. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-2) 231
3.4.6. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-3) 235
3.4.7. Kalınlığı 1.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-1) 241

3.4.8. Kalınlığı 2.00 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-2) 245
3.4.9. Kalınlığı 2.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-3) 249
3.4.10. İki Bileşenli ve Üç Bileşenli Enerji Sönümleyici (İBES ve ÜBES) Deney Elemanları 253
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 258
5. KAYNAKLAR 264
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNDE TERS V ÇAPRAZLI BAĞLANTILARDA KULLANILABİLECEK METALİK SÖNÜMLEYİCİ GELİŞTİRİLMESİ VE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Süleyman İstemihan COŞĞUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2019, 271 Sayfa

Bu tez kapsamında, depremin yapılar üzerindeki yıkıcı etkilerini azaltmak amacıyla pasif kontrol sistemler sınıfına dâhil olan yüksek sünekliğe ve enerji tüketim kapasitesine sahip modüler yapıda metalik sönümleyiciler önerilmiş, söz konusu sönümleyici tasarımlarının etkinliklerinin araştırılması amacıyla deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sönümleyici elemanlar, literatürdeki kaynaklı ve yekpare üretilen sönümleyici tasarımlardan farklı olarak, tüm parçaları takıp çıkarılabilir, gerek görülmesi durumunda, sönümleyici elemanlardaki ana elemanların tasarımlarında herhangi bir değişiklik yapmadan yapının süneklik-rijitlik talebine uygun olarak azaltılıp-artırılmasına imkân sağlayan, farklı dayanım ve süneklik talebine sahip yapı sistemlerine kolay bir şekilde adapte edilebilen modüler yapıya sahiptir. Önerilen sönümleyici tasarımı ile hem sönümleyiciyi oluşturan parçaların üretilebilirliği hem de yapıya ait çerçeve sisteme montajı daha kolay bir hale gelmektedir. Bu tez kapsamında, gerekli ön boyutlandırmalar yapıldıktan sonra, kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubuklardan oluşan sönümleyiciler, konik şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubuklardan oluşan sönümleyiciler, sadece çelik plakalardan (ÇP) oluşan sönümleyiciler üretilmiştir. Ayrıca, KSDE ve ÇP'lerin birlikte kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) ve düşey yerdeğiştirmeler nedeniyle KSDE ve ÇP'lerin birlikte kullanıldığı enerji sönümleyicide çelik çubukların erkenden burkulmasını önlemek amacıyla yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu kullanılarak üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) de üretilmiştir. Üretilen sönümleyici elemanları üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sayısal çalışmalarda ABAQUS ticari yazılımı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, tasarımların yüksek süneklik ve enerji tüketimi kapasitelerine sahip olmalarının yanında söz konusu tasarımların yüksek sönüm oranlarına sahip olduğu görülmüştür. Özellikle ÜBES deney elemanının yaklaşık olarak % 48 sönüm oranı ile en yüksek sönüm oranına sahip sönümleyici elemandır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde, geliştirilen sönümleyicilerin yapı sistemlerinde sönümleyici elaman olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: pasif kontrol sistemi, sönüm, enerji tüketimi, metalik sönümleyici, çelik yapı modüler, kum saati, konik, ABAQUS

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF METALLIC DISSIPATER TO BE USED IN THE CHEVRON BRACE CONNECTIONS IN STEEL BUILDING SYSTEMS AND INVESTIGATION OF ITS EFFECTIVENESS

Süleyman İstemihan COŞĞUN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2019, 271 Pages

In this thesis, in order to reduce the destructive effects of earthquakes on buildings, metallic dissipaters with modular structures, high ductility and energy dissipation capacities, which are considered as passive control systems, were proposed and experimental and numerical studies were carried out in order to investigate the effectiveness of these dissipater designs. Unlike the welded and monolithic designs of the damping elements in the literature, all parts of the damping elements of the dissipater proposed in this thesis can be assembled-disassembled, and if necessary, the strength and ductility of the structure can be increased or decreased in accordance with the ductility-stiffness demand without making any changes in the design of the main elements of the dissipaters. The energy dissipater proposed in this thesis has a modular structure that can easily be adapted to the building systems. With this specific dissipater design, the parts that form the dissipater can be reproduced and the frame of the structure becomes easier to assemble. In this study, after the necessary pre-sizing process, dissipaters consisting of hourglass shaped circular cross-section (HSCC) steel bars, conical shaped circular cross section (CSCC) steel bars and consisting only of steel plates (SP) were produced. In addition, a two-component energy dissipater (TCED) was produced by using HSCC and SPs together. In addition, a three-component energy dissipater (TRCED) was produced using an on-site casting polyurethane elastomer filler to prevent the buckling of the steel rods in the TCED. Experimental and numerical studies were carried out on the dissipater test elements. ABAQUS commercial software was used in the numerical studies. The results showed that the designs had high ductility and energy dissipation capacities as well as high damping ratios. In particular, TRCED had the highest damping ratio among the test elements with 48%. As a result of the studies carried out within the scope of this thesis, it was determined that the developed dissipaters can be used as dissipater elements in buildings.

Key Words: passive control system, damping; energy dissipation, metallic dissipater, steel structure modular, hourglass, conic, ABAQUS

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler 3
Şekil 1.2. Çekme ve burkulma etkisiyle kirişte plastik mafsal oluşumu 3
Şekil 1.3. MÇÇÇ'lerde deprem yükleri etkisinde oluşan tipik hasarlar 4
Şekil 1.4. Ters V şeklinde çapraz düzenine sahip bir çerçevenin çevrimsel yatay yükleme altındaki davranışı 5
Şekil 1.5. Enerji tüketim sistemlerinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar..... 7
Şekil 1.6. Pasif kontrol sistemlerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi..... 8
Şekil 1.7. Pasif kontrol sistemlerinin yapı sistemlerine uygulamaları 9
Şekil 1.8. Sismik yalıtım sistemlerinin yapı üzerinde etkileri 9
Şekil 1.9. Sismik yalıtım sistemlerinin şematik görünümleri 11
Şekil 1.10. Sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım sistemleri 12
Şekil 1.11. Metalik sönümleyicilerin şematik görünümleri 13
Şekil 1.12. Burkulması önlenmiş çelik çaprazı oluşturan parçalar 15
Şekil 1.13. Çevrimsel yükleme etkisindeki geleneksel ve burkulması önlenmiş çelik çapraz elemanların davranışları 15
Şekil 1.14. Burkulması önlenmiş farklı çelik çapraz elemanların şematik enkesit görünümleri..... 16
Şekil 1.15. ADAS sönümleyici elemanı 16
Şekil 1.16. ADAS elemanın şekildeğiştirmiş halinin şematik görünümü 17
Şekil 1.17. TADAS sönümleyici elemanı 19
Şekil 1.18. TADAS elemanının şekildeğiştirmiş halinin şematik görünümü 19
Şekil 1.19. E ve C şekilli metalik sönümleyiciler 20
Şekil 1.20. Bal peteği (Honeycomb) şekilli metalik sönümleyici..... 21
Şekil 1.21. Bal Peteği (Honeycomb) sönümleyici elemanının farklı yapı sistemlerindeki uygulamalarının şematik görünümü 21
Şekil 1.22. Eğilme çerçeveli metalik sönümleyici 22
Şekil 1.23. Eğilme çerçeveli metalik sönümleyiciler..... 22
Şekil 1.24. Pall sürtünme tipi sönümleyici..... 23
Şekil 1.25. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici 24
Şekil 1.26. Sürtünme tipi sönümleyici tasarımı 25
Şekil 1.27. Sürtünme tipi sönümleyici 25

Şekil 1.28. Sürtünme tipi sönümleyiciler 26
Şekil 1.29. Tipik bir viskoz akışkanlı sönümleyicinin boy kesit görünüşü 27
Şekil 1.30. Viskoz akışkanlı sönümleyici uygulamaları 27
Şekil 1.31. Tipik bir visko-elastik sönümleyicinin görünümü 28
Şekil 1.32. Zhang ve Zhu (2007) tarafından önerilen sönümleyici tasarımına ait görünüm 29
Şekil 1.33. Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeklinin şematik gösterimi 30
Şekil 1.34. Çelik yarıklı metalik sönümleyici 31
Şekil 1.35. Deney elemanlarında oluşan hasar durumları 31
Şekil 1.36. Farklı geometrilerdeki metalik sönümleyiciler 32
Şekil 1.37. Üretilen deney elemanlarının şematik görünümü 33
Şekil 1.38. Deney elemanlarında oluşan hasar durumları 33
Şekil 1.39. a) Alüminyum sönümleyici, b) Sönümleyici eklenmiş çelik gergili çerçeve 34
Şekil 1.40. a) Sarsma tablalı deney düzeneği, b) Alüminyum metalik sönümleyici 34
Şekil 1.41. Kum saati şekilli metalik sönümleyici 35
Şekil 1.42. Deney düzeneği 35
Şekil 1.43. Burkulması önlenmiş çelik levhalı sönümleyici tasarımı 36
Şekil 1.44. Bal peteği görünümlü metalik sönümleyicinin şekildeğiştirme durumu 36
Şekil 1.45. HSD elemanlarda oluşan hasar durumları 37
Şekil 1.46. Tarak dişli metalik sönümleyicilerde oluşan hasar durumları 38
Şekil 2.1. ÜBES'in ters V çaprazlı çerçeve içerisindeki yerleşimi (a) ve birleşimin görünümü (b) 41
Şekil 2.2. Yatay yüke maruz dairesel kesitli bir çubuğun kesit tesir diyagramları 43
Şekil 2.3. KSDE çelik çubuğun yüzey formunun sayısallaştırılırmış hali 44
Şekil 2.4. Kesme kuvveti diyagramıyla güncellenen çubuk geometrisinin şematik gösterimi 45
Şekil 2.5. Çubuk yükseklik ortası çap değeri 12 mm olan KSDE çelik çubuğun gerilme dağılımları 46
Şekil 2.6. Çubuk yükseklik ortası çap değeri 14 mm olan KSDE çelik çubuğun gerilme dağılımları 47
Şekil 2.7. Çubuk yükseklik ortası çap değeri 16 mm olan KSDE çelik çubuğun gerilme dağılımları 48
Şekil 2.8. KSDE çelik çubukların geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir) 49
Şekil 2.9. KDE çelik çubukların geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir) 49
Şekil 2.10. KSDE ve KDE çelik çubukların CNC makinasında üretim aşamaları 50
Şekil 2.11 KSDE ve KDE çelik çubukların montaja hazır hali 51

Şekil 2.12. Çekme deneyi numunelerinin geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir) 51
Şekil 2.13. Çekme deneyleri için üretilen numuneler 52
Şekil 2.14. Çekme deneyi sonrası çekme numunelerinin görünüşleri 52
Şekil 2.15. Çekme numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri 53
Şekil 2.16 Dairesel yuvalı alt ve üst çelik blokların üretim aşamaları 54
Şekil 2.17. Çelik plakalara açılan bağlantı deliklerinin konumu 55
Şekil 2.18. Çekme deneyi numunelerinin geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir) 55
Şekil 2.19. Çekme deneyi sonrası çekme numunelerinin görünüşleri 56
Şekil 2.20. Çekme numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri 57
Şekil 2.21. 2.50 mm kalınlığında poliüretan elastomer malzemeden üretilen eksenel çekme testi numunesi (Ölçüler mm'dir) 58
Şekil 2.22. Çekme deneyleri için üretilen numuneler 58
Şekil 2.23. Poliüretan elastomer malzemenin eksenel çekme altında mekanik özelliklerinin belirlenmesi 59
Şekil 2.24. Basınç dayanımının ve sertlik değerinin belirlenmesi için üretilen numuneler 59
Şekil 2.25. Poliüretan elastomer malzemenin sertlik değerinin belirlenmesi 60
Şekil 2.26. Poliüretan elastomer malzemenin eksenel basınç altında mekanik özelliklerinin belirlenmesi 60
Şekil 2.27. Çekme numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri 61
Şekil 2.28. Dairesel yuvalı çelik bloğun detaylı şematik görünümü 62
Şekil 2.29. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü 63
Şekil 2.30. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümleri 64
Şekil 2.31. KSDE çelik çubuklardan oluşan sönümleyici tasarımlarının deneysel çalışmaya hazır hali (S-KSDE-1, S-KSDE-2) 64
Şekil 2.32. KDE çelik çubuklardan oluşan sönümleyici tasarımlarının deneysel çalışmaya hazır hali (S-KDE-1, S-KDE-2) 64
Şekil 2.33. S-KSDE-1'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir) 65
Şekil 2.34. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü 66
Şekil 2.35. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümleri 67
Şekil 2.36. Çelik plakalardan oluşan sönümleyici tasarımlarının deneysel çalışmaya hazır hali (S-ÇP-2, S-ÇP-3) 67
Şekil 2.37. S-ÇP-1'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir.) 68
Şekil 2.38. Dairesel yuvalı çelik bloğun detaylı şematik görünümü 69

Şekil 2.39. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü 70
Şekil 2.40. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin görünümleri 70
Şekil 2.41. İBES'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir) 71
Şekil 2.42. Dairesel yuvalı çelik bloğun detaylı şematik görünümü 72
Şekil 2.43. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü 73
Şekil 2.44. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin görünümleri 73
Şekil 2.45. ÜBES'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir) 74
Şekil 2.46. Mafsal plakaları, mafsal pimleri ve bağlantı plakalarının geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir.) 75
Şekil 2.47. Deney düzeneğinin demonte halinin şematik görünümü 76
Şekil 2.48. Deney düzeneğinin sönümleyici tasarımlarının montajına hazır halinin görünümü 77
Şekil 2.49. Deney düzeneğinin deney sonrası yatay ötelenme yapmış halinin görünümü 77
Şekil 2.50. Deney düzeneğindeki mafsallı birleşimlerin detaylı görünümleri 78
Şekil 2.51. Deney düzeneğinin şematik görünümü ve ölçüleri (Ölçüler mm'dir) 79
Şekil 2.52. Hidrolik piston ve hidrolik güç ünitesinin detaylı görünümleri 80
Şekil 2.53. Yük hücresinin görünümleri 81
Şekil 2.54. Doğrusal potansiyometrelerin (DP) görünümleri ve deney düzeneği içerisindeki konumları 81
Şekil 2.55. Deney elemanlarına yapıştırılan gerinim pullarının (GP) yerleşiminin şematik gösterimi 82
Şekil 2.56. Deney elemanlarına yapıştırılan gerinim pullarının (GP) görünümleri 82
Şekil 2.57. Yükleme protokolü 83
Şekil 2.58. Yüklem protokolünün, yükleme hızına göre ayrıntılı gösterimi 84
Şekil 2.59. Her bir çevrim için etkin rijitlik değerlerinin elde edilmesi 86
Şekil 2.60. Bir çevrimde tüketilen enerji ve depolanan elastik şekil değiştirme enerjisi 88
Şekil 2.61. Dairesel kesitli çekme numunelerine ait nominal ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrileri 90
Şekil 2.62. Dikdörtgen kesitli çekme numunelerine ait nominal ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (nominal kalınlığı Şekil 2.00 mm olan numuneler) 91
Şekil 2.63. İzotropik pekleşme parametrelerinin kalibrasyonu 93

Şekil 2.64. Tek eksenli gerilme durumunda birleşik pekleşme modelinin gösterimi 94
Şekil 2.65. Sadece çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının sayısal modellerine örnek olarak S-KSDE-1 elemanının görünümü ve özellikleri 96
Şekil 2.66. Çelik plakaların sonlu eleman analizlerinde dikkate alınan sınır koşulları..... 97
Şekil 2.67. Sayısal modellemelerde kullanılan sonlu elemanların şematik görünümleri..... 97
Şekil 2.68. KSDE-30/12 çelik çubuğun, farklı sayıda sonlu elemana bölünmüş hali (C3D8R)..... 98
Şekil 2.69. Yakınsama çalışması (KSDE ve KDE çelik çubuklar)..... 98
Şekil 2.70. Çelik plakaların farklı sayıda sonulu elemana bölünmüş hali (S4R)..... 101
Şekil 2.71. Yakınsama çalışması (çelik plakalar) 101
Şekil 3.1. S-KSDE-1 deney elemanının görünümleri 103
Şekil 3.2. A1 ve A4 numaralı çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri 104
Şekil 3.3. A1 ve A4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük eğrileri 104
Şekil 3.4. S-KSDE-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 105
Şekil 3.5. S-KSDE-1 elemanının deney anından görünümleri 106
Şekil 3.6. S-KSDE-1 elemanının deney anından görünümleri (hasar oluşumları) 107
Şekil 3.7. KSDE çelik çubuklarda oluşan hasarlar 108
Şekil 3.8. A5 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri 108
Şekil 3.9. A6 ve A8 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar..... 109
Şekil 3.10. A2, A5 ve A7 numaralı çelik çubukların yükseklik ortasına yakın bölgelerdeki çatlamalar..... 109
Şekil 3.11. Deneyin son aşamasına ait bir görünüm 109
Şekil 3.12. S-KSDE-2 deney elemanının görünümleri 110
Şekil 3.13. B1 ve B4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri 111
Şekil 3.14. B1 ve B4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri 111
Şekil 3.15. S-KSDE-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 112
Şekil 3.16 S-KSDE-2 elemanının deney anından görünümleri 113
Şekil 3.17. S-KSDE-2 elemanının deney anından görünümleri (hasar oluşumları) 114

Şekil 3.18. KSDE çelik çubuklarda oluşan hasarlar 115
Şekil 3.19. B5 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri 115
Şekil 3.20. B3, B4, B6 ve B8 numaralı çelik çubukların mesnet bölegelerinde oluşan hasarlar 116
Şekil 3.21. S-KSDE-3 deney elemanının görünümleri 117
Şekil 3.22. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri 118
Şekil 3.23. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri 118
Şekil 3.24. S-KSDE-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 119
Şekil 3.25. S-KSDE-3 elemanının deney anından görünümleri 120
Şekil 3.26. KSDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 121
Şekil 3.27. KSDE çelik çubuklarda oluşan şekildeğiştirmeler 122
Şekil 3.28. C3, C5, C7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 122
Şekil 3.29. C3, C5, C7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 123
Şekil 3.30. Yatay bağlantı cıvatalarında oluşan hasarlar 123
Şekil 3.31. Deneyin son aşamasına ait bir görünüm 123
Şekil 3.32. S-KDE-1 deney elemanının görünümleri 124
Şekil 3.33. D1 ve D4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri 125
Şekil 3.34. D1 ve D4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri 125
Şekil 3.35. S-KDE-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 126
Şekil 3.36. S-KDE-1 elemanının deney anından görünümleri 127
Şekil 3.37. Çelik çubukların mesnet bölgelerindeki hasar oluşumları 128
Şekil 3.38. KDE çelik çubuklarda oluşan şekildeğiştirmeler 129
Şekil 3.39. D3, D5 ve D7 numaralı çelik çubuklarda oluşan hasarların detaylı görünümleri 129
Şekil 3.40. D3, D5 ve D7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 130
Şekil 3.41. Deneyin son aşamasına ait bir görünüm 130
Şekil 3.42. S-KDE-2 deney elemanının görünümleri 131
Şekil 3.43. E1 ve E4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri 132

Şekil 3.44. E1 ve E4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri 132
Şekil 3.45. S-KDE-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 133
Şekil 3.46. S-KDE-2 elemanının deney anından görünümleri 134
Şekil 3.47. KDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 135
Şekil 3.48. E3, E5 ve E7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 136
Şekil 3.49. S-KDE-3 deney elemanının görünümleri 137
Şekil 3.50. F1 ve F4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri 138
Şekil 3.51. F1 ve F4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri 138
Şekil 3.52. S-KDE-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 139
Şekil 3.53. S-KDE-3 elemanının on yedinci yerdeğiştirme adımına kadar farklı yerdeğiştirme seviyelerindeki şekildeğiştirme halleri 140
Şekil 3.54. KDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 141
Şekil 3.55. Çelik çubukların nihai durumdaki şekildeğiştirmiş halleri 142
Şekil 3.56. F1, F3 ve F5 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar 142
Şekil 3.57. Deney düzeneğinin ve deney elemanının görünümleri 143
Şekil 3.58. S-ÇP-1 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi 144
Şekil 3.59. S-ÇP-1 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi 144
Şekil 3.60. S-ÇP-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 145
Şekil 3.61. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri 146
Şekil 3.62. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri (13. adım) 147
Şekil 3.63. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri (14. adım) 147
Şekil 3.64. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri (15. adım) 148
Şekil 3.65. S-ÇP-1 elemanının nihai hasar durumları 148
Şekil 3.66. Deney düzeneğinin ve deney elemanının görünümleri 149
Şekil 3.67. S-ÇP-2 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi 150
Şekil 3.68. S-ÇP-2 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi 150
Şekil 3.69. S-ÇP-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 151
Şekil 3.70. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri 152

Şekil 3.71. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri (13. adım) 153
Şekil 3.72. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri (14. adım) 153
Şekil 3.73. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri (15. adım) 154
Şekil 3.74. S-ÇP-2 elemanının nihai hasar durumları 154
Şekil 3.75. Deney düzeneğinin ve deney elemanının görünümleri 155
Şekil 3.76. S-ÇP-3 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi 156
Şekil 3.77. S-ÇP-3 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi 156
Şekil 3.78. S-ÇP-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 157
Şekil 3.79. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri 158
Şekil 3.80. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri (13. adım) 159
Şekil 3.81. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri (14. adım) 159
Şekil 3.82. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri (15. adım) 160
Şekil 3.83. S-ÇP-3 elemanının nihai hasar durumları 160
Şekil 3.84. İBES deney elemanının görünümleri 161
Şekil 3.85. İBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi (ÇP) 162
Şekil 3.86. İBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi (ÇP) 162
Şekil 3.87. C1 ve C4 numaralı çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri 163
Şekil 3.88. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme yatay yük eğrileri 163
Şekil 3.89. İBES deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 164
Şekil 3.90. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (12. adım) 165
Şekil 3.91. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (14. adım) 166
Şekil 3.92. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (15. adım) 167
Şekil 3.93. Çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarların görünümleri 167
Şekil 3.94. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (16. adım) 168
Şekil 3.95. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (17. adım) 168
Şekil 3.96. Hem plakaların hem de çelik çubukların nihai hasar durumlarına ait görünümler 169
Şekil 3.97. ÜBES deney elemanının görünümleri 170
Şekil 3.98. ÜBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi 171
Şekil 3.99. ÜBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi 171
Şekil 3.100. C1 ve C4 numaralı çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri 172

Şekil 3.101. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme yatay yük eğrileri 172
Şekil 3.102. ÜBES deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 173
Şekil 3.103. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (12. adım) 174
Şekil 3.104. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (14. adım) 175
Şekil 3.105. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (15. adım) 176
Şekil 3.106. Poliüretan elastomer dolgunun çelik bloklardan ayrılması (15. adım) 176
Şekil 3.107. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (16. adım) 177
Şekil 3.108. Poliüretan elastomer dolgunun çelik bloklardan ayrılması (17.adım) 178
Şekil 3.109. Çelik plakaların ve çelik çubuk-poliüretan elastomer dolgunun deney sonundaki nihai görünümleri 179
Şekil 3.110. ÜBES deney elemanını X-Ray tarama görüntüsü 179
Şekil 3.111. S-KSDE tipi sönümleyici elemanların dayanım zarfı eğrileri 180
Şekil 3.112. S-KDE tipi sönümleyici elemanların dayanım zarfı eğrileri 182
Şekil 3.113. S-ÇP tipi sönümleyici elemanların dayanım zarfı eğrileri 184
Şekil 3.114. İBES ve ÜBES sönümleyici elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (1-17 yerdeğiştirme adımları arası) 186
Şekil 3.115. Deney elemanlarından elde edilen dayanım zarfı eğrileri 189
Şekil 3.116 Deney elemanlarının rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 190
Şekil 3.117. Tüm deney elemanlarının rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 191
Şekil 3.118. Tüm deney elemanlarının rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri (0-60 mm) 192
Şekil 3.119. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri 197
Şekil 3.120. Tüm deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri 198
Şekil 3.121. Tüm deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri (0-60 mm) 199
Şekil 3.122. Deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri 203
Şekil 3.123. Tüm deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri 204
Şekil 3.124. Tüm deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri (0-60 mm) 205
Şekil 3.125. Deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları (ξ) ile etkili rijitlik değerleri (k_{etkin}) arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler 209

Şekil 3.126. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 210
Şekil 3.127. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri..... 211
Şekil 3.128. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 211
Şekil 3.129. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri 211
Şekil 3.130. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 212
Şekil 3.131. S-KSDE-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler.... 214
Şekil 3.132. KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri..... 215
Şekil 3.133. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 216
Şekil 3.134. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri..... 216
Şekil 3.135. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 216
Şekil 3.136. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri 217
Şekil 3.137. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 217
Şekil 3.138. S-KSDE-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler.... 219
Şekil 3.139. KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri..... 220
Şekil 3.140. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 221
Şekil 3.141. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri..... 221
Şekil 3.142. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 222
Şekil 3.143. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri 222
Şekil 3.144. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 222
Şekil 3.145. S-KSDE-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler.... 225
Şekil 3.146. KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri..... 225

Şekil 3.147. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 226
Şekil 3.148. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri 226
Şekil 3.149. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 227
Şekil 3.150. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri 227
Şekil 3.151. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 227
Şekil 3.152. S-KDE-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler 230
Şekil 3.153. KDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri 231
Şekil 3.154. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 232
Şekil 3.155. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri 232
Şekil 3.156. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 233
Şekil 3.157. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri 233
Şekil 3.158. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 233
Şekil 3.159. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 236
Şekil 3.160. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri 236
Şekil 3.161. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 237
Şekil 3.162. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri 237
Şekil 3.163. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 237
Şekil 3.164. S-KDE-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler 240
Şekil 3.165. KDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri 241
Şekil 3.166. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri 242
Şekil 3.167. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri 242
Şekil 3.168. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği 242

Şekil 3.169. S-ÇP-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler.... 244
Şekil 3.170. Çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri..... 245
Şekil 3.171. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri..... 245
Şekil 3.172. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri..... 246
Şekil 3.173. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği..... 246
Şekil 3.174. S-ÇP-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler.... 248
Şekil 3.175. Çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri..... 248
Şekil 3.176. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri..... 249
Şekil 3.177. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri..... 249
Şekil 3.178. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği..... 250
Şekil 3.179. S-ÇP-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler.... 252
Şekil 3.180. Çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri..... 252
Şekil 3.181. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri..... 253
Şekil 3.182. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri..... 253
Şekil 3.183. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği..... 254
Şekil 3.184. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri..... 254
Şekil 3.185. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri..... 254
Şekil 3.186. İBES elemanının ana parçaları olan çelik çubuk ve plakaların deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri 257

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Çekme çubuklarının mekanik özellikleri 52
Tablo 2.2. Çekme çubuklarının mekanik özellikleri 56
Tablo 2.3. Poliüretan elastomer malzemenin mekanik özellikleri 60
Tablo 2.4. KSDE ve KDE çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici tasarımları 62
Tablo 2.5. Çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici tasarımları 66
Tablo 2.6. Deney düzeneğini oluşturan parçalar 76
Tablo 2.7. Pekleşme parametreleri 95
Tablo 3.1. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KSDE-1) 212
Tablo 3.2. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KSDE-2) 217
Tablo 3.3. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KSDE-3) 223
Tablo 3.4. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KDE-1) 228
Tablo 3.5. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KDE-2) 234
Tablo 3.6. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri(S-KDE-3) 238
Tablo 3.7. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-ÇP-1) 243
Tablo 3.8. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-ÇP-2) 246
Tablo 3.9. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-ÇP-3) 250
Tablo 3.10. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (İBES) 255

SEMBOLLER DİZİNİ

ADAS : Adding damping and stiffness

AKS : Ayarlı kütle sönümleyiciler

CNC : Computer numerical control

ÇP : Çelik plaka

DP : Doğrusal potansiyometre

DN : Dikdörtgen enkesitli çekme çubukları

E : Elastisite modülü

GP : Gerinim pulu

İBES : İki bileşenli enerji sönümleyici

KDE : Konik şekilli dairesel enkesitli

KSDE : Kum saati şekilli dairesel enkesitli

MAÇÇ : Moment aktaran çelik çerçeveler

MÇÇÇ : Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler

L : Çubuk net yüksekliği

n : Çubuk sayısı

N : i.yerdeğiştirme adımı

S-ÇP-1 : Kalınlığı 1.50 mm olan çelik plakaların kullanıldığı deney elemanı

S-ÇP-2 : Kalınlığı 2.00 mm olan çelik plakaların kullanıldığı deney elemanı

S-ÇP-3 : Kalınlığı 2.50 mm olan çelik plakaların kullanıldığı deney elemanı

S-KDE-1 : Yükseklik ortası çap değeri 12 mm olan konik şekilli dairesel enkesitli çubukların kullanıldığı deney elemanı

S-KDE-2 : Yükseklik ortası çap değeri 14 mm olan konik şekilli dairesel enkesitli çubukların kullanıldığı deney elemanı

S-KDE-3 : Yükseklik ortası çap değeri 16 mm olan konik şekilli dairesel enkesitli çubukların kullanıldığı deney elemanı

S-KSDE-1 : Yükseklik ortası çap değeri 12 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli çubukların kullanıldığı deney elemanı

S-KSDE-2 : Yükseklik ortası çap değeri 14 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli çubukların kullanıldığı deney elemanı

S-KSDE-3 : Yükseklik ortası çap değeri 16 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli çubukların kullanıldığı deney elemanı

ŞHA : Şekil hafızalı alaşımlar

TADAS : Triangular adding damping and stiffness

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

ÜBES : Üç bileşenli enerji sönümleyici

W : Mukavemet momenti

Øi : i. burkulma mod şekli

$\xi_{eşdeğer}$: Eşdeğer viskoz sönüm oranı

μ_f : Sürtünme katsayısı

με : Mikro şekildeğiştirme

β : Narinlik oran

ω_i : Mod şekli ölçek değeri

$\bar{\omega}$: Frekans (deprem)

ω : Frekans (yapı)

δ : Yatay ötelenme (yerdeğiştirme)

σ_y, σ_{y0} : Akma dayanımı

σ_{true} : Gerçek gerilme

σ_{nom} : Nominal (İtibari) gerilme

ε_{true} : Gerçek şekildeğiştirme

ε_{nom} : Nominal (İtibari) şekildeğiştirme

$M(x)$: Herhangi bir x mesafesindeki moment

$D(x)$: Herhangi bir x mesafesindeki çap

$V(x)$: Herhangi bir x mesafesindeki kesme kuvveti

$P_{maks,i}$:i. yerdeğiştirme adımındaki maksimum yük

$P_{\min,i}$: i. yerdeğiştirme adımındaki minimum yük

$\delta_{maks,i}$: i. yerdeğiştirme adımındaki maksimum yerdeğiştirme

$\delta_{\min,i}$: i. yerdeğiştirme adımındaki minimum yerdeğiştirme

l_0 : Çubuk ilk boyu

A_0 : Çubuk ilk çapı

ε_p : Plastik şekildeğiştirme

ε_{eq} : Eşdeğer plastik şekildeğiştirme

S : Deviatorik gerilme tensörü

a : Geri gerilme parametresi

Q_∞ : İzotropik pekleşme parametresi

b : İzotropik pekleşme parametresi

R : İzotropik pekleşme parametresi

C : Kinematik pekleşeme parametresi

γ : Kinematik pekleşeme parametresi (gevşeme terimi)

v : Poisson oranı

h_p : Plaka yüksekliği

t : Plaka kalınlığı

σ_{cr} : Kritik elastik burkulma dayanımı

D^I : Çubuk yükseklik ortası çap değeri

a_i : Genlik

$E^{'}_{D}$: Tek bir çevrimde sönümle tüketilen enerji

P_y : Akma yükü

u_y : Akma yerdeğiştirmesi

C_o : Pekleşme parametresi

dR : Akma yüzeyinin boyutunu belirleyen parametre

E_k : Kinetik Enerji

Eş : Şekildeğiştirme enerjisi

Ev : Kümülatif viskoz sönüm enerjisi

Eh : Çevrimsel yükleme etkisinde kümülatif olarak tüketilen enerji

Eı : Deprem enerjisi

E_D : Tek bir çevrimde tüketilen enerji

E_{SO} : Elastik şekil değiştirmelerden dolayı depolanan enerji

k_{etkin} : Etkin rijitlik

k_s : Plaka burkulma katsayısı

u : Yatay yerdeğiştirme

v : Düşey yerdeğiştirme

ɵ : Dönme

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde birçok yapı deprem nedeniyle oluşabilecek karmaşık etkilere karşı koyabilecek şekilde tasarlanmamaktadır. Bu yapılar yetersiz dayanım ve rijitliğin yanı sıra yeteri kadar sünek olmayan birleşimlerle detaylandırıldığından, deprem etkileri sebebiyle ortaya çıkan enerjiyi tüketemeyecek hale gelebilmektedir. Bu nedenle yapı sistemlerinde deprem gibi doğal sebeplerden dolayı yatay çevrimsel yüklemeler oluşturan etkilere karşı yeterli dayanımı, rijitliği ve sünekliği gösterebilmesi için yapının karakterini oluşturan bu üç önemli parametrenin birbirleriyle olan etkileşimlerinin doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Yapıların yatay yükler etkisinde yeterli rijitliği ve dayanımı gösterebilmesi, geleneksel perde (betonarme, çelik, kompozit) elemanların ve/veya çelik çaprazlı perdelerin kullanılması ile mümkündür. Buna rağmen, yeterli derecede sünek tasarlanmayan bu tür yapı elemanları ve bağlantıları, yapı sisteminin deprem etkileri altında yeteri kadar enerjiyi tüketmesini önleyerek, ana taşıyıcı elemanların taşıma kapasitelerini kaybetmesine ve yapıda ciddi hasarların oluşmasına sebep olmaktadır.

Bu amaçla, geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarım (kapasite tasarımı) felsefesi, yapısal elemanların, özel olarak belirlenen bölgelerdeki elastik ötesi şekildeğiştirmeler ile yapı sistemine aktarılan deprem enerjisini tüketmesine izin vererek, yapının göçmesini önlemeye çalışmaktadır. Bu tasarım felsefesi, yapı elemanlarında belirli sınırlamalar içerisinde kalmak kaydıyla hasar oluşumunu kabul etmektedir. Ancak kapasite tasarımı felsefesine göre tasarımı yapılan yapı sistemlerinde şiddetli deprem etkileri altında onarılamayacak ciddi hasarlar da oluşabilmektedir.

Çelik yapılarda ise yanal ötelenmeyi sınırlandırmak için kullanılan çelik çaprazların burkulması, önemli hasarlara ve ani dayanım azalmalarına sebep olmaktadır. Bu nedenle geleneksel yöntemlerin yanı sıra yapılarda deprem yüklerinden dolayı oluşabilecek hasarlara karşı çelik çapraz elemanların çerçevelere birleşim noktalarının dayanım ve rijitlikten ödün vermeden sünek bir biçimde tasarlanması ve detaylandırılması gerekmektedir. Bu amaçla, özellikle yapı elemanlarının mesnet ve birleşim noktalarına eklenecek sönümleyiciler tasarlanmaktadır. Enerji tüketim sistemleri ana başlığı altında incelenen bu elemanlar, farklı

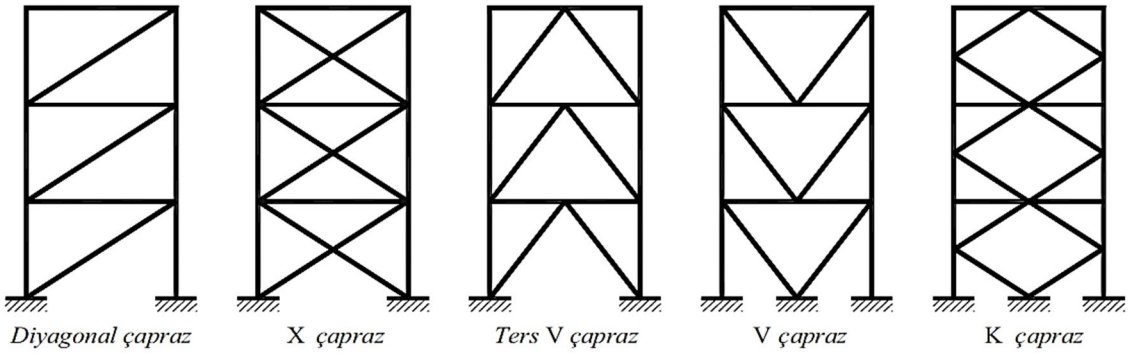
sönümleme mekanizmalarıyla, deprem etkisiyle yapı sistemine aktarılan enerjinin sönümlenmesini sağlamaktadırlar.

Özellikle son 50 yılda enerji tüketim sistemleri alanında farklı sönümleyici eleman tasarımları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sönümleyici sistemlerin gelişimiyle paralel olarak farklı çözüm metotları, sayısal ve deneysel yöntemler de geliştirilmiştir. Bu bölümde, enerji tüketim sistemleri hakkında genel bilgiler ve bu zamana kadar önerilen enerji tüketim sistemleri alanında yapılan çalışmaları içeren özet literatür taraması verilmektedir.

1.2. Merkezi Çaprazlı Çelik Çerçevelerin (MÇÇÇ) Çevrimsel Yük Etkisindeki Davranışı

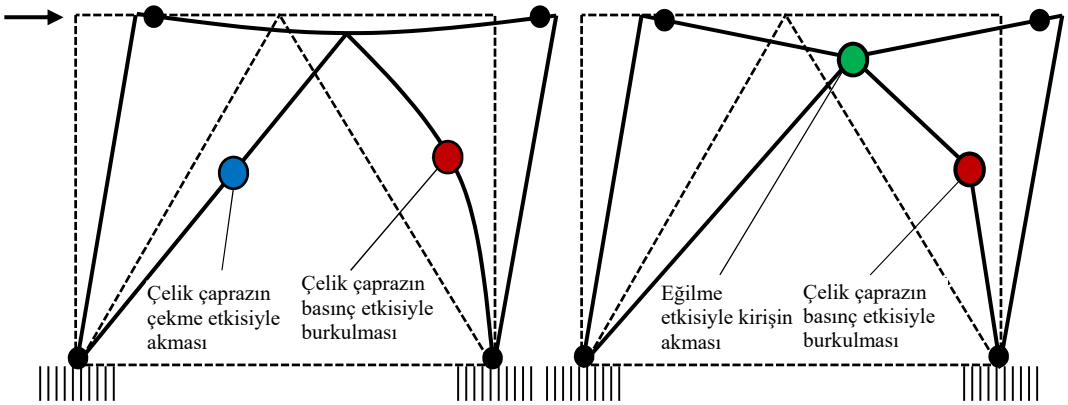
Yapı sistemlerinde deprem ve rüzgâr gibi yapılar üzerinde dinamik yatay yüklemeler oluşturan etkilere karşı, söz konusu yükleri karşılayacak elemanlara ve/veya sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çelik yapılar için moment aktaran çelik çerçeve sistemler (MAÇÇ) ve MÇÇÇ bu amaçla sıklıkla kullanılan önemli taşıyıcı sistemlerdir. Dayanım ve süneklik açısından, MAÇÇ sistemler iyi bir performansa sahip olmasına rağmen, göreceli olarak daha esnek olan yüksek katlı çelik yapılarda kat ötelenmelerini istenilen sınırlar içerisinde tutmak ekonomik olmamaktadır. Buna ek olarak, moment aktaran birleşimler, basit çapraz birleşimlerine kıyasla daha masraflı olmaktadır. Ayrıca kaynaklı birleşimlerde, kaynaklarda oluşan yerel süreksizlikler ve hatalar, birleşim bölgelerinin yeterli dayanımı göstermesini engellemektedir. MAÇÇ sistemler yüksek süneklik kapasitesine sahip olduklarından, yüksek deprem riski olan bölgelerde tercih edilmektedir. Buna rağmen, 1994 yılında meydana gelen Northridge depremi sonrasında, MAÇÇ sistemlerde ciddi hasarların meydana geldiği görülmüştür. Diğer yatay yük taşıyıcı sistemlere kıyasla, MÇÇÇ yapı sistemleri dayanım ve özelliklede rijitliği sağlayabilmesi açısından öne çıkmaktadır. Buna rağmen, MAÇÇ'lere kıyasla çok daha düşük enerji sönümleme kapasitesine sahiptirler.

MÇÇÇ'ler genellikle düşük ve orta yükseklikteki çelik yapı sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu yapı sistemleri, çelik çapraz elemanların çerçeve içerisindeki yerleşimine göre farklı tiplerde olabilmektedir (Şekil 1.1).

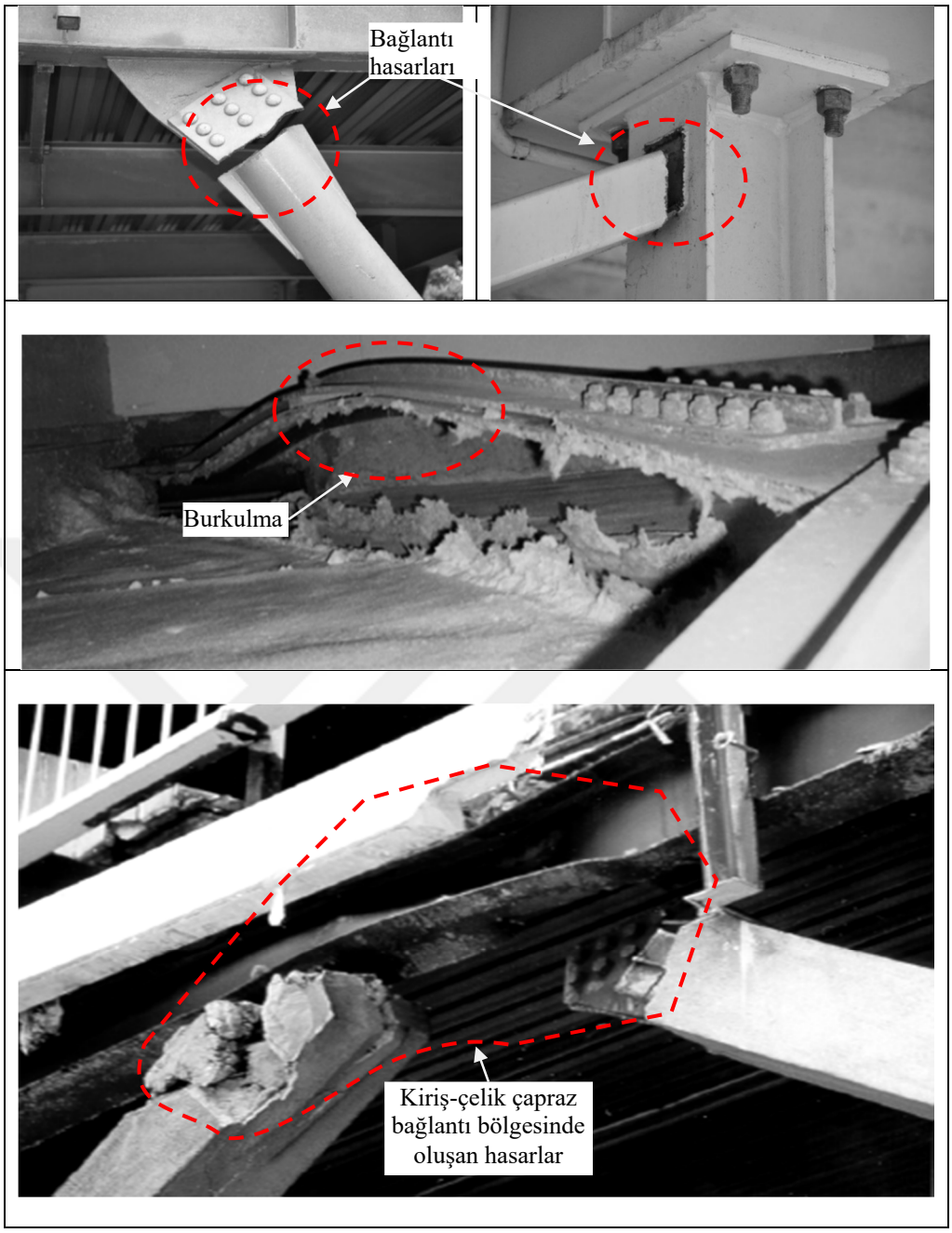


Şekil 1.1. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler (TBDY, 2018)

MÇÇÇ'lerde görülen en büyük problem, yatay yük etkisinde çapraz elemanlarda meydana gelen burkulma davranışıdır. Basınç kuvvetleri etkisinde çaprazlardan birinin burkulması, diğer çapraz elemana etkiyen çekme kuvvetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, hem çekme etkisindeki çapraz elemanlarda ve/veya birleşim noktalarında hasarların oluşmasına hem de çelik çaprazların bağlı olduğu kirişlerde noktasal olarak aşırı yük etkimesinden kaynaklanan, kirişte plastik mafsal oluşumuna sebep olmaktadır (Şekil 1.2). Bu durum, düşey yükler altında yapının kısmen ya da tamamen göçmesine neden olabilmektedir. Bir MÇÇÇ'de deprem yükleri etkisinde oluşması muhtemel tipik hasarların bazıları örnek olarak Şekil 1.3'te verilmektedir.

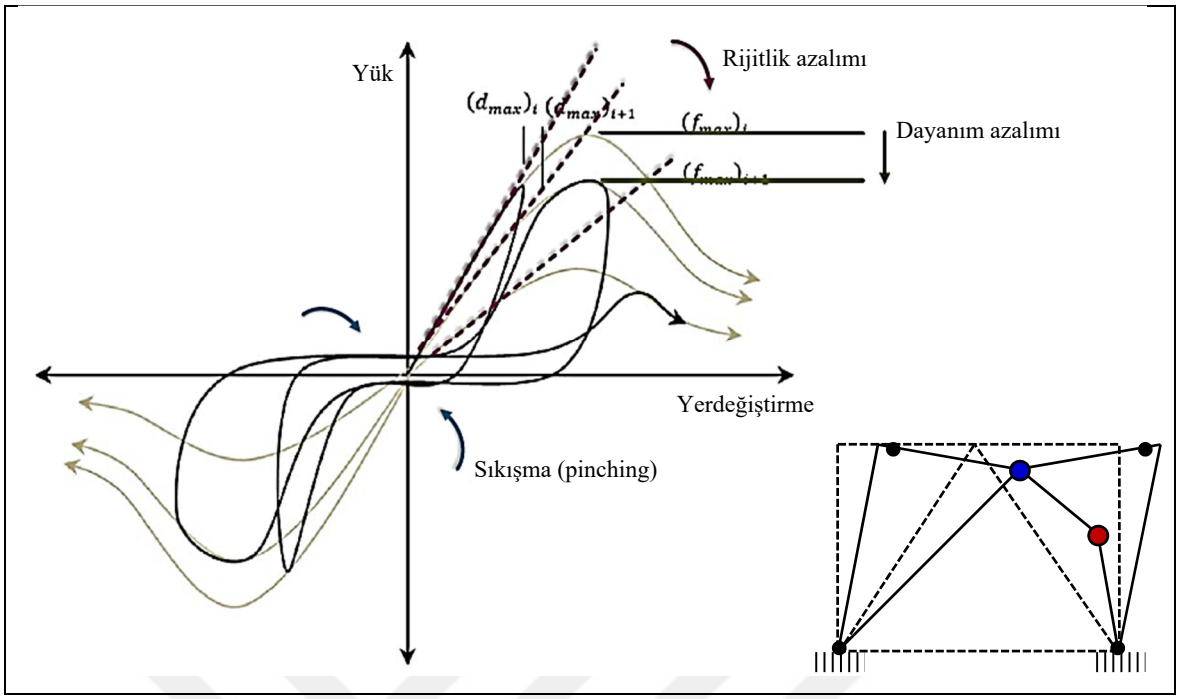


Şekil 1.2. Çekme ve burkulma etkisiyle kirişte plastik mafsal oluşumu



Şekil 1.3. MÇÇÇ'lerde deprem yükleri etkisinde oluşan tipik hasarlar (URL-1, 2018)

Tipik bir MÇÇÇ'nin özel hali olan ters V şeklinde çapraz düzenine sahip bir çerçevenin çevrimsel yatay yükleme altındaki davranışı Şekil 1.4'te verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yukarıda bahsedilen ani burkulma etkisiyle oluşan hasarlar ani rijitlik azalımlarına sebep olmakta ve bu durum çevrimsel yük yerdeğiştirme eğrisinde kendisini sıkışma (pinching) etkisi olarak göstermektedir. Söz konusu sıkışma etkisi sistemin yeteri kadar enerji tüketmesini önlemektedir.



Şekil 1.4. Ters V şeklinde çapraz düzenine sahip bir çerçevenin çevrimsel yatay yükleme altındaki davranışı

Bu durumda çelik çaprazların kullanım amacı olan yapıya rijitlik sağlama kabiliyetinin tek başına yapı sistemini depreme dayanıklı hale getirmediği ve deprem performasını artırmadığı açıkça görülmektedir. Bu amaçla, çelik çaprazların kullanıldığı yapı sistemlerinde rijitliğin yanısıra sistemin sönüm ve enerji tüketme kapasitesini artıracak farklı çözümler geliştirilmektedir. Bu çözümler arasıdan en etkili yöntem, yapıyı oluşturan çerçevelerdeki bağlantı noktalarına, oluşması muhtemel hasarları kendi bünyesinde toplayarak, ana taşıyıcı elemanlarda hasarların oluşmasını engelleyecek literatürde "sigorta (fuse), kurban (sacrificial) veya sönümleyici (damper, dissipater)" olarak adlandırılan elemanların kullanılmasıdır.

1.3. Yapılarda Enerji Tüketimi Kavramı ve Enerji Tüketim Sistemlerinin Kullanım Amaçları

Geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkesince yapıya etkiyecek olan deprem yükleri söz konusu yapının sünekliğine göre deprem yükü azaltma katsayısına bölünerek hesaplanmaktadır. Bu katsayı belirlenirken yapının enerji tüketim kapasitesi ve şekildeğiştirme kabiliyeti dikkate alınarak elastik olmayan davranış sergileyeceği

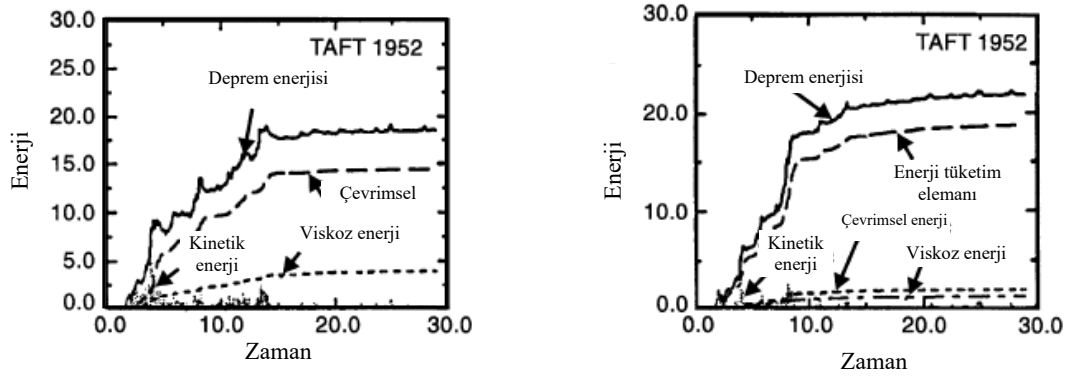
öngörülmektedir. Bu öngörüye dayanarak, yapıdan beklenen yeterli sünek davranışı gösterebilmesi için özel olarak belirlenen kritik bölgelerin elastik ötesi şekildeğiştirme yapabilecek şekilde sünek davranışa uygun detaylandırılması gerekmektedir. Bu elastik olmayan şekildeğiştirmeler, genellikle kirişlere yakın bölgelerde, kiriş-kolon birleşimlerinde oluşması amaçlanmaktadır. Yapılan çalışmalar ve gözlemler, söz konusu bölgelerdeki elastik olmayan davranışların, yapıda önemli miktarda enerjiyi dağıtabilmesine imkân sağlamakta fakat çoğu zaman da yapı sisteminin tümüne önemli zararlar verebileceğini göstermektedir. Söz konusu kritik bölgeler sünek davranış gösterecek şekilde detaylandırılmalarına rağmen tekrarlı yükler altında yapı elemanlarının davranışları, ileri yerdeğiştirme değerlerinde ana taşıyıcı elemanların hasar görmeye başlaması ile bozulma eğilimi göstermektedir (Aiken vd., 1992). Geleneksel yapı tasarımı ilkesinden dolayı oluşabilecek bu eksikliklere karşı olarak, bir dizi yenilikçi yaklaşım geliştirilmektedir. Bu yaklaşımlardan biri de yapıya enerji sönümleyici elemanların yerleştirilmesidir. Yapılara enerji sönümleyici elemanların yerleştirilmesinin temel amacı, yapının özel tasarlanmış ve ayrıntılı bölgelerinde elastik ötesi şekildeğiştirmeleri yoğunlaştırmak ve birincil yapısal elemanlarda hasarların oluşmasını engellemektir. Bu amaç için birçok farklı türde enerji sönümleyici cihaz önerilmiştir. Herhangi bir yapı sisteminde enerji dengesi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Denk 1.1).

$$E_I = E_K + E_Ş + E_V + E_H \tag{1.1}$$

Burada, E_K,yapı kütlesinin hareketiyle oluşan kinetik enerjiyi, $E_Ş$,şekildeğiştirme enerjisini, E_V, kümülatif viskoz sönüm enerjisini, E_H ise çevrimsel yükleme etkisinde kümülatif olarak tüketilen enerjiyi ifade etmektedir. E_I ise deprem enerjisini ifade etmektedir (Uang ve Bertero, 1990).

Şekil 1.5'te ise enerji tüketim sistemlerinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda yapılardaki enerji terimlerinin birbirleriyle oluşan ilişkileri grafiksel olarak verilmektedir. Şekil 1.5-(a,b)'de görüldüğü gibi, hem enerji tüketim sistemlerinin kullanılmadığı hem de kullanıldığı bir yapıda, deprem sonlandığında, yapı kütlesinin hareketiyle oluşan kinetik enerji ve E_K şekildeğiştirme enerjisi $E_Ş$, sıfırlanmaktadır. Bu durum, bir yapının enerji tüketme kapasitesini belirleyen en önemli parametrenin çevrimsel olarak tüketilen enerji olduğunu göstermektedir. Söz konusu çevrimsel olarak tüketilen enerji, geleneksel bir yapı

sisteminde yapı elemanlarında oluşan hasarlar ile sağlanmaktadır. Deprem etkisiyle oluşması muhtemel bu hasarlar, yapı sünekliğini ve enerji talebini azaltarak veya süneklik ile histeretik enerji kapasitesini artırarak azaltılmaktadır. Söz konusu yapının sünekliği veya histeretik enerji kapasitesini arttırmanın ekonomik olarak mümkün olmadığını varsayarak, performans yalnızca süneklik veya enerji tüketim talebini azaltarak iyileştirilebilmektedir. Örneğin, pasif enerji tüketim cihazları kullanılan yapılarda, yapının kritik bileşenleri üzerindeki histerik enerji tüketim talebi, pasif enerji tüketim elemanlarına aktarılarak azaltılabilir. Şekil 1.5-(b)'de görüldüğü gibi yapıya eklenen pasif sönümleyici eleman birincil yapı elemanlarında oluşan hasarlar ile sağlanan çevrimsel enerji tüketimini azaltarak, söz konusu ana taşıyıcı sistem elemanlarına düşen deprem enerjisi payını kendi üzerine almaktadır. Böylelikle birincil yapı elemanlarında oluşması muhtemel hasarları en aza indirilebilmektedir.



(a) Enerji tüketim elemanının kullanılmadığı geleneksel bir yapı	(b) Enerji tüketim elemanının kullanıldığı bir yapı

Şekil 1.5 Enerji tüketim sistemlerinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar (Soong ve Dargush, 1999)

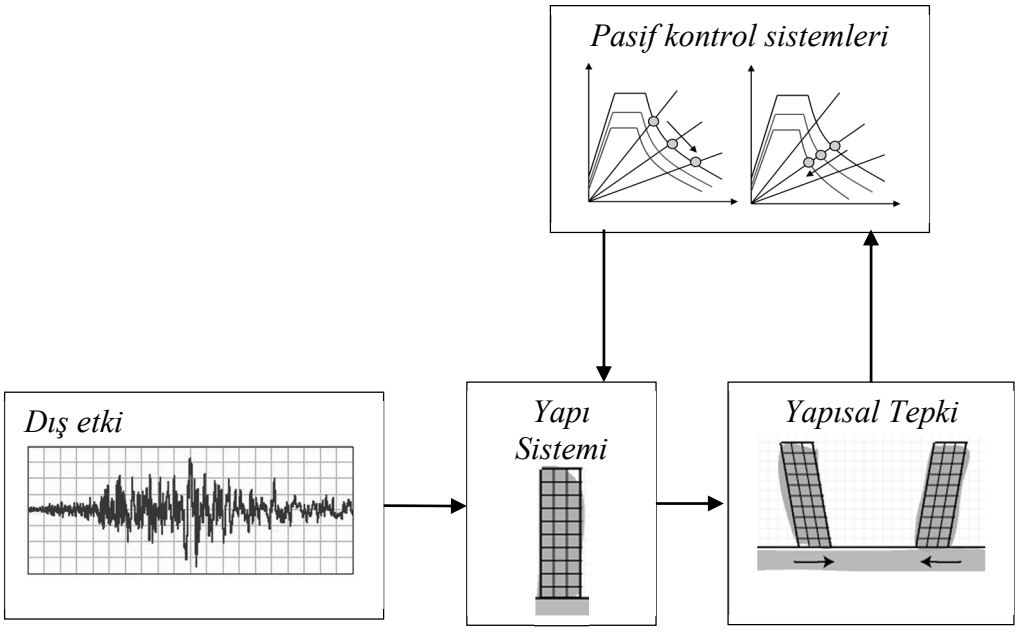
1.4. Yapısal Kontrol Sistemleri

Enerji tüketim sistemleri öncelikle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmıştır (Takewaki, 2009). İnşaat mühendisliği alanında ise 1950'li yıllara kadar fazla kullanım alanı bulamayan enerji tüketim sistemleri; malzeme, teknoloji ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak yaygınlaşmaya başlamıştır. 1970'li yıllara gelindiğinde ise enerji tüketim sistemleri deprem, rüzgâr gibi yapılara dinamik yükler etkimesine neden olan durumlara karşı kullanılmaya başlanmıştır. Modern yapısal enerji

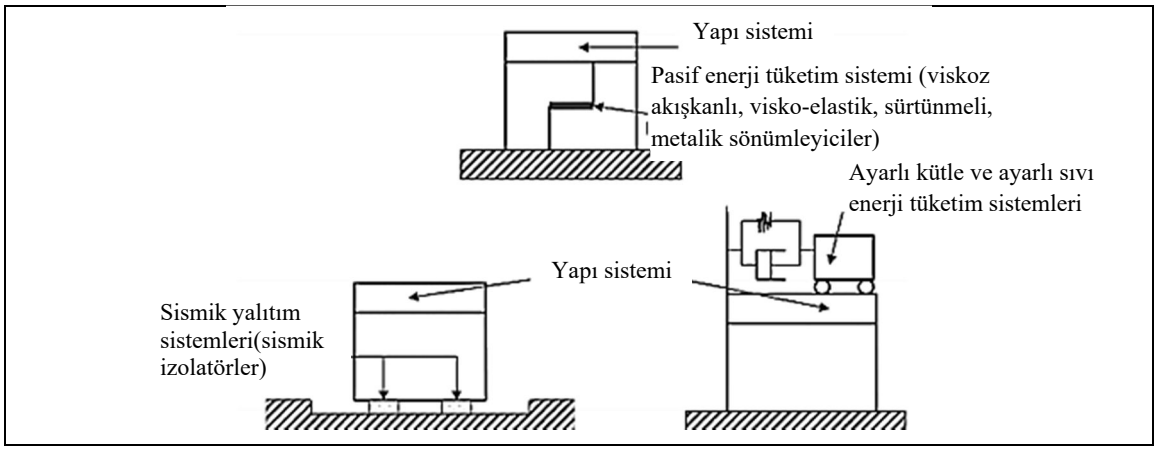
tüketim sistemleri üç ana gruba ayrılmaktadır (Hadi ve Uz, 2017). Bunlar; pasif, aktif ve yarı aktif kontrol sistemleridir.

1.4.1. Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri, deprem ve rüzgâr gibi yapılar üzerinde dinamik yatay yüklemelere neden olan etkilerin zararlarını azaltmak ve/veya engellemek amacıyla geliştirilen sistemlerdir. Yatay yükler altında, yapı sistemlerinde oluşabilecek yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmelerin, bu sönümleyiciler yardımıyla kontrol edilmesi amaçlanmaktadır. Pasif kontrol sistemleri özellikle enerji tüketimi yapmak için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaktadır. Çalışma prensibi olarak pasif kontrol sistemleri, doğrudan dinamik etkiler sonucu ortaya çıkan yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmelerden yararlanarak enerji tüketimi gerçekleştirmektedir (Şekil 1.6). Pasif kontrol sistemleri; sismik izolatörler, viskoz akışkanlı, visko-elastik, sürtünmeli, metalik, ayarlı kütle ve ayarlı sıvı sönümleyiciler ve şekil hafızalı alaşımlı sönümleyiciler olmak üzere sekiz gruba ayrılmaktadır. Şekil 1.7'de pasif enerji tüketim sistemlerinin yapı sistemlerine uygulamaları şematik olarak verilmektedir.



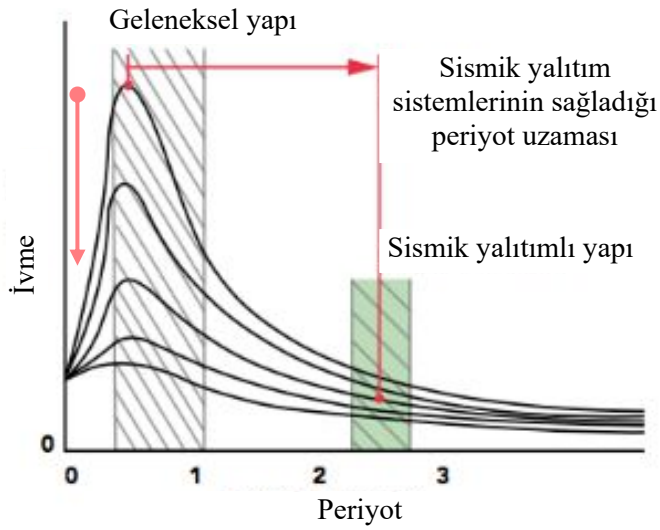
Şekil 1.6. Pasif kontrol sistemlerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi



Şekil 1.7. Pasif kontrol sistemlerinin yapı sistemlerine uygulamaları (Christenson vd., 1999)

1.4.1.1. Sismik Yalıtım Sistemleri

Deprem nedeniyle ortaya çıkan dinamik etkileri yapı sistemine ulaşmadan sönümleme yaparak, söz konusu sistemin hasar görmesini ve/veya göçmesini önlemek amacıyla geliştirilen sistemlerdir. Özellikle deprem nedeniyle ortaya çıkan ve yapılara çevrimsel yanal yüklerin etkimesine sebep olan yatay yük bileşenlerinin yıkıcı etkileri sismik yalıtım sistemleri ile en aza indirilebilmektedir (Naeim ve Kelly, 1999). Böylelikle, yapı sisteminin periyodu uzatılarak ve/veya enerji tüketimi artırılarak sisteme etkiyen deprem etkileri azaltılmaktadır (Şekil 1.8., Skinner vd., 1993).



Şekil 1.8. Sismik yalıtım sistemlerinin yapı üzerindeki etkileri (Skinner vd., 1993)

Sismik yalıtım sistemlerinin ilk örneği 1909 yılında J.A. Calantarients tarafından önerilmiş ve patenti alınmıştır (Naeim ve Kelly, 1999). Sismik yalıtım sistemlerinin düşük sönümlü kauçuk esaslı, kurşun çekirdekli kauçuk esaslı, yüksek sönümlü kauçuk esaslı ve sürtünmeli sarkaç tipi gibi farklı uygulamaları bulunmaktadır.

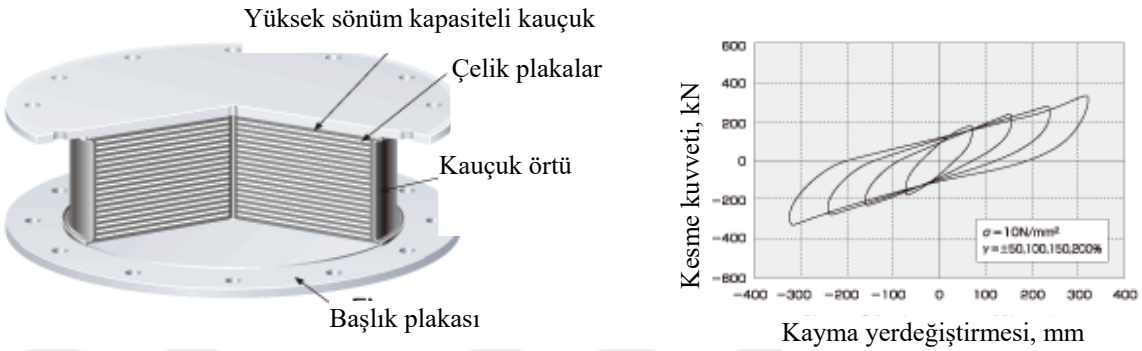
Düşük sönümlü kauçuk esaslı yalıtım sistemleri, üretim maliyeti göreceli olarak az, modellenmesi kolay, yükleme geçmişinden nispeten bağımsız olması sebebiyle tercih edilmektedir. Söz konusu yalıtım sistemlerinin ek enerji tüketim elemanlarına ihtiyaç duyması, ortam sıcaklığının mekanik özellikleri üzerinde etkili olması ise bu tür sistemlerin dezavantajlarındandır.

Kurşun çekirdekli kauçuk esaslı yalıtım sistemleri, üretim maliyeti düşük sönümlü kauçuk esaslı yalıtım sistemlerine kıyasla maliyeti fazla olmasına rağmen yalıtım ve enerji tüketimini beraber yapabilmesi bakımından daha avantajlıdır. Söz konusu yalıtım sistemlerinin deprem sonrası kurşun çekirdeğin hasar durumunun belirlenmesindeki zorluklar ise bu tür sistemlerin dezavantajlarındandır.

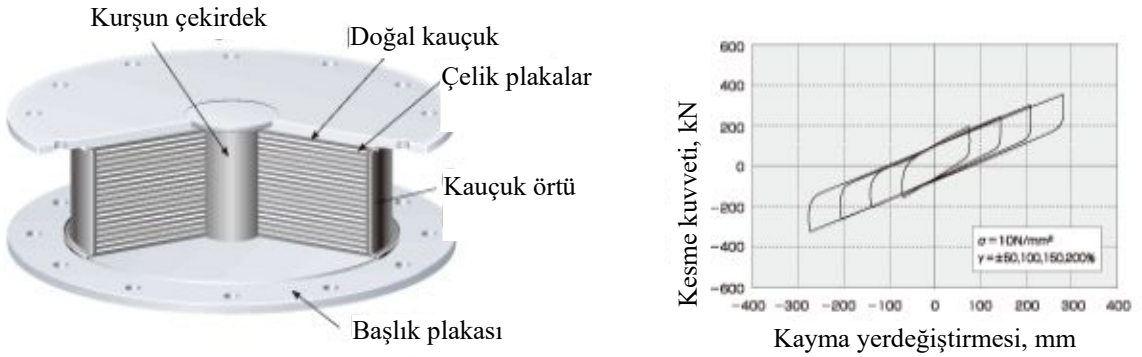
Yüksek sönümlü kauçuk esaslı yalıtım sistemleri, kurşun çekirdekli kauçuk esaslı yalıtım sistemlerine benzer olarak hem yalıtım hem de enerji tüketimini beraber yapabilen sistemlerdir. Söz konusu yalıtma sistemleri yükleme geçmişine bağlı olarak mekanik özelliklerini kaybedebilmesi ise bu tür sistemlerin dezavantajlarındandır.

Sürtünmeli sarkaç yalıtım sistemleri ise yapı ağırlığından bağımsız olarak titreşim periyodunun ayarlanabilmesi, hem üretim hem de yapı sistemine montajı bakımından düşük maliyetli olması, yükleme geçmişinden bağımsız olması sebebiyle kararlı davranış göstermesi ve bakım-onarımının kolay olması sebebiyle tercih edilmektedir. Sürtünmeli sarkaç yalıtım sistemleri, sismik yalıtımın yanı sıra küresel konkav yüzey ile kayıcının sürtünmesi ile bir miktar enerji de tüketebilmektedirler (Patil ve Reddy, 2012). Söz konusu yalıtım sistemlerinin sıcaklığa bağlı olarak sürtünme davranışlarının değişmesi bu tür sistemlerin dezavantajlarındandır. Şekil 1.9'da yaygın olarak kullanılan sismik yalıtım sistemlerinin şematik olarak görünümleri ve çevrimsel yük-yerdeğiştirme grafikleri verilmektedir. Ülkemizde 2016 yılında taslağı yayınlanan ve 2018 yılında kabul edilen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) sismik yalıtım sistemleri, "Bölüm 14–Deprem etkisi altında yalıtımlı bina taşıyıcı sistemlerinin tasarımı için özel kurallar" başlığı altında yer verilmiştir. Bu bölümde, deprem yalıtımı uygulanacak olan yeni binaların ve deprem yalıtımı uygulanarak güçlendirilecek olan mevcut binaların deprem tasarımı esasları açıklanmıştır. Yönetmelik pasif enerji tüketim sistemlerinden olan, elastomer ve eğri

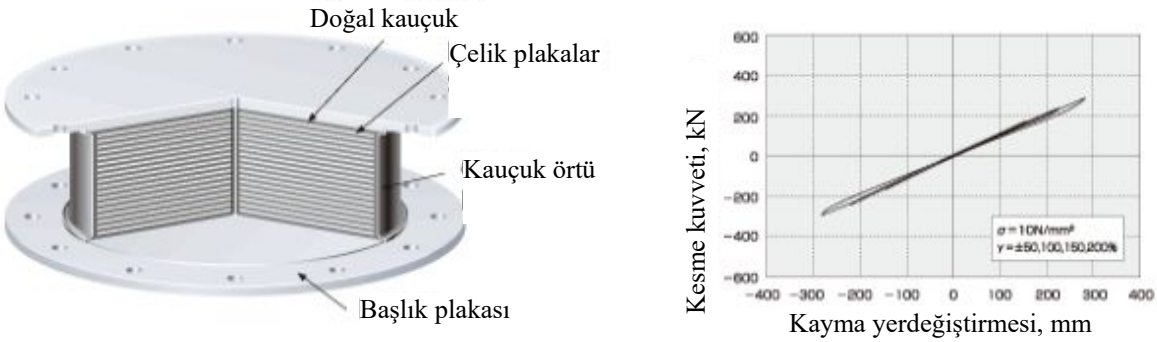
yüzeyli sürtünmeli (sürtünmeli sarkaç) yalıtım birimlerinin kullanımını kapsamaktadır (TBDY-2018). TBDY-2018 kapsamına alınan sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım sistemlerinin şematik görünüşleri Şekil 1.10'da verilmektedir.



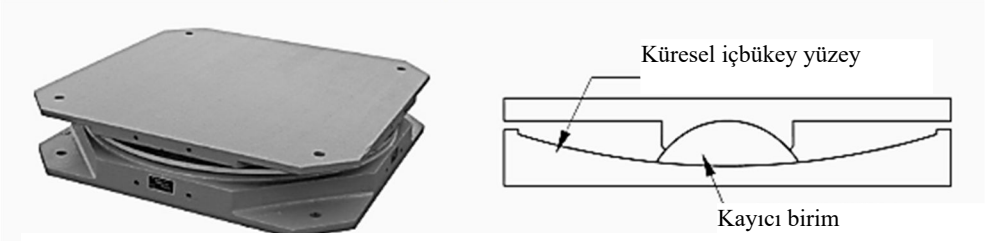
(a) Yüksek sönümlü kauçuk esaslı izolatör (URL-2, 2018)



(b) Kurşun çekirdekli kauçuk esaslı izolatör (URL-2, 2018)

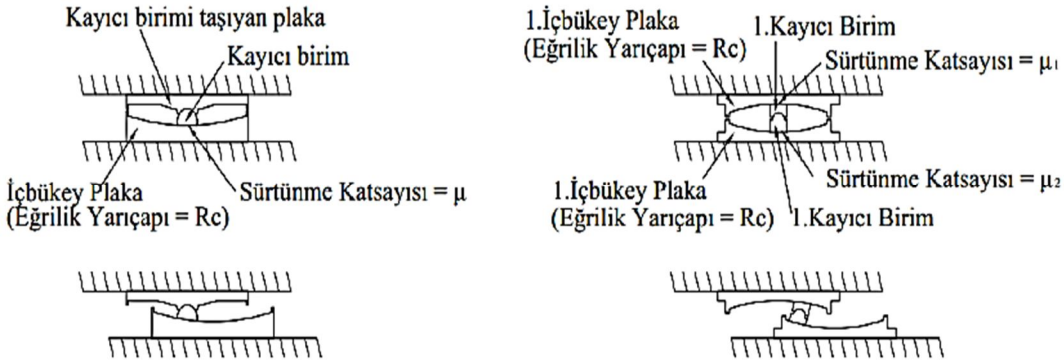


(c) Düşük sönümlü kauçuk esaslı izolatör (URL-2, 2018)

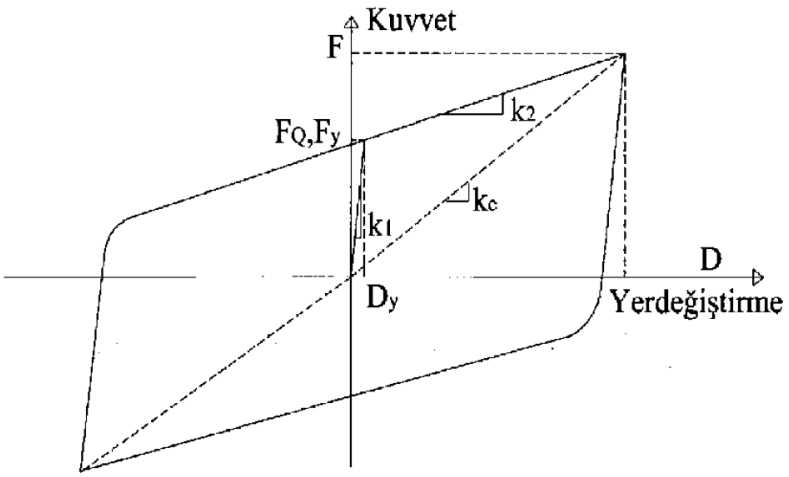


(d) Sürtünmeli sarkaç sistem ve şematik kesit görünümü

Şekil 1.9. Sismik yalıtım sistemlerinin şematik görünümleri



(a) Şematik görünümler

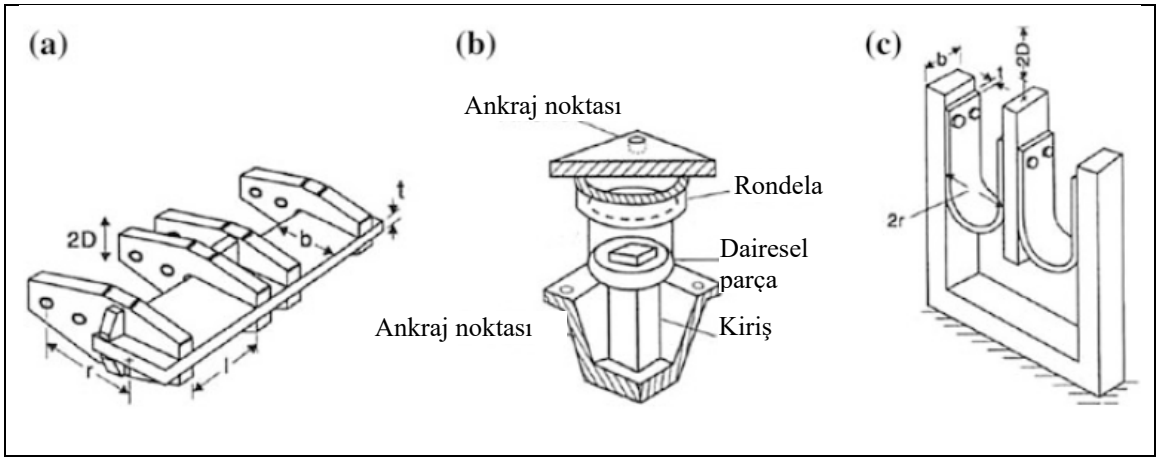


(b) Sürtünmeli yalıtım sistemlerinin basitleştirilmiş kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 1.10. Sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım sistemleri (TBDY-2018)

1.4.1.2. Metalik Sönümleyiciler ve Sınıflandırılması

Deprem sırasında bir yapıya giren enerjinin sönümlenebilmesi için mevcut en etkili mekanizmalardan birisi de metallerin elastik ötesi şekildeğiştirme davranışıdır (Soong ve Dargush 1997). Metalik sönümleyicilerin ana çalışma prensibi, deprem yükleri etkisi altında yapıda oluşan yatay yerdeğiştirmelerin, söz konusu sisteme monte edilen metalik sönümleyicinin elastik ötesi davranış göstermesinin sağlanmasına bağlıdır. Metalik sönümleyiciler; üretim için ileri teknoloji gerektirmemesi, kolayca uygulanabilir olup depremde kararlı davranış gösterebilmesi, düşük maliyetli olması, çevresel faktörlerden diğer sönümleyici sistemlere kıyasla daha az etkilenmeleri, asıl görevi olan enerji sönümlemenin yanında rijitlik de sağlaması gibi sebeplerle yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu sönümleyiciler, deprem sonrası değiştirilme gerekliliği, sayısal analiz sürelerinin uzunluğu ve modelleme aşamasındaki belirsizlikler, söz konusu sönümleyicilerin dezavantajlarındandır. Sismik enerjinin büyük bir kısmını absorbe etmek için bir yapı içinde ayrı metalik histeretik damperler kullanma fikri, Kelly vd. (1972) ve Skinner vd. (1975) tarafından ortaya atılmıştır. Bu araştırmacılar tarafından önerilen cihazların bazıları Şekil 1.11'de şematik olarak verilmektedir.



Şekil 1.11. Metalik sönümleyicilerin şematik görünümleri (Soong ve Dargush, 1997)

Araştırmacılar tarafından bir çok tip metalik sönümleyici tasarımı önerilmiştir. Temel olarak söz konusu tasarımlar iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; burkulması önlenmiş çelik çaprazlar ve genellikle çelik çaprazların kirişlere ve/veya birbirlerine birleştiği noktalara konumlandırılan sönümleyicilerdir. Bu iki tip sönümleyici sistem dışında farklı

sönümleyiciler de önerilmiştir. Bu ana başlık altında, burkulması önlenmiş çelik çapraz sönümleyiciler ve araştırmacılar tarafından sıklıkla faydalanılan diğer temel sönümleyici tasarımlar özet olarak anlatılmaktadır. Metalik sönümleyici sistemler ile ilgili yapılan diğer çalışmalar ise "Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar" alt başlığı altında verilmektedir.

1.4.1.2.1. Burkulması Önlenmiş Çelik Çaprazlar

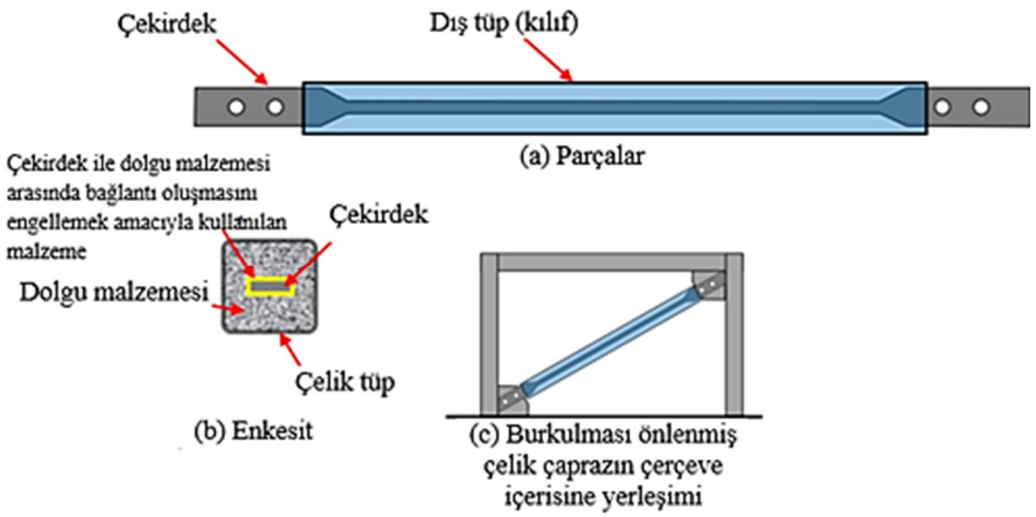
Çelik çaprazlı çerçeve sistemlerdeki çaprazlar, çevrimsel yüklemeler altında, dönüşümlü olarak çekme ve basınç yüklerine maruz kalması durumlarında basınç kuvvetleri sebebiyle burkulma davranışı göstermektedir. Bu durum çelik çaprazlı çerçevelerin enerji tüketim kapasitesini ciddi oranda azaltmaktadır (Sabelli et al. 2003). Çapraz elemanların burkulma davranışından kaynaklanan bu eksikliğinin giderilmesi ve/veya iyileştirilmesi amacıyla, birçok araştırmacı tarafından burkulmayı engellemenin farklı yolları önerilmiştir (Wakabayashi, 1973).

Burkulması önlenmiş çelik çaprazlar, pasif kontrol sistemlerinden metalik sönümleyiciler sınıfına dâhil olan enerji tüketim sistemleridir. Söz konusu enerji tüketim sisteminin çalışma şekli, çapraz elemanın çevrimsel yükleme etkisinde basınç yüklemesine maruz kaldığı durumlarda oluşması muhtemel burkulma davranışını engelleyerek, metalin çekme kuvvetleri etkisindeki gibi davranmasını sağlayarak kararlı bir enerji tüketim davranışı göstermesi üzerine kuruludur.

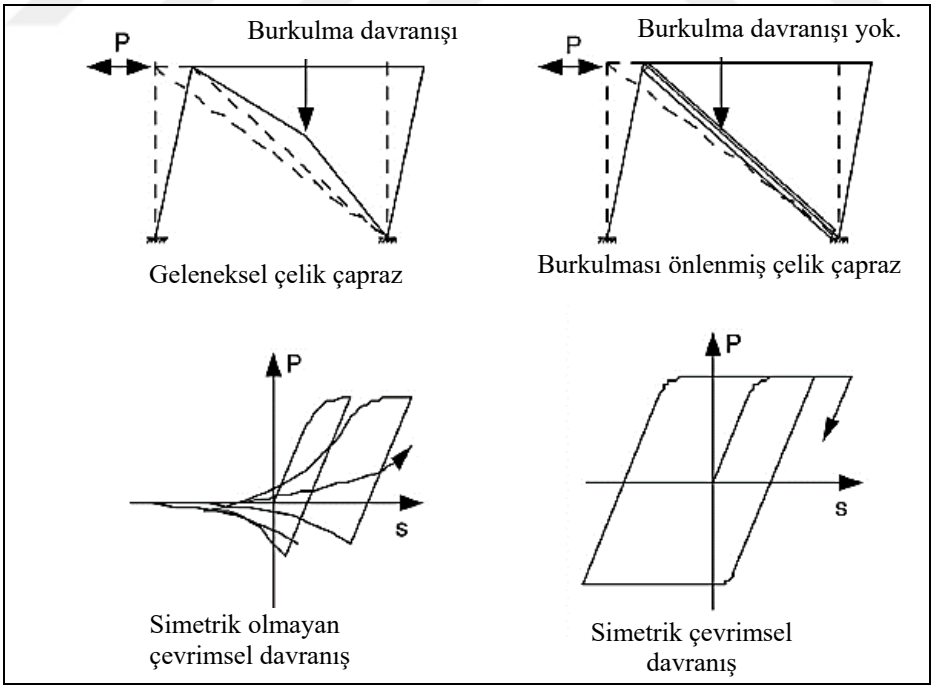
Burkulması önlenmiş çelik çaprazlar üzerinde yapılan çalışmalar, bu cihazların çevrimsel yüklemeler altında yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir (Clark vd., 2000; Merrit vd., 2003; Black vd., 2004; İwata ve Murai, 2006; Zhao vd., 2010; Yu vd., 2013; Guerrero vd., 2016). Söz konusu enerji sönümleyici elemanlar ile ilgili ilk çalışmalar Yoshino vd., (1971) tarafından gerçekleştirilmiştir. bugünkü forma sahip tasarım ise ilk olarak Watanabe vd., (1988) tarafından önerilmiştir.

Burkulması önlenmiş çelik çaprazlar genel olarak üç ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar; bir çelik çapraz eleman, rijit bir dış tüp ve dolgu malzemesidir (Şekil 1.12). Çelik çapraz eleman ve çelik tüp arasında kalan bölgeye, çelik ile dolgu malzemesinin bağ kurması önlenecek bir şekilde, yerleştirilen beton vb. malzemelerle çelik çaprazların burkulması önlenmektedir (Symans vd., 2008).

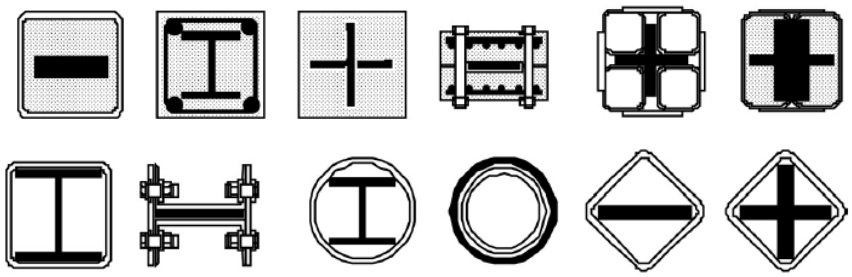
Çevrimsel yük altında, geleneksel ve burkulması önlenmiş çelik çaprazın davranışları şematik olarak Şekil 1.13'te verilmiştir. Araştırmacılar tarafından, enkesit bakımından farklı birçok tasarım önerilmiştir (Şekil 1.14).



Şekil 1.12. Burkulması önlenmiş çelik çaprazı oluşturan parçalar (Guerrero vd., 2016)



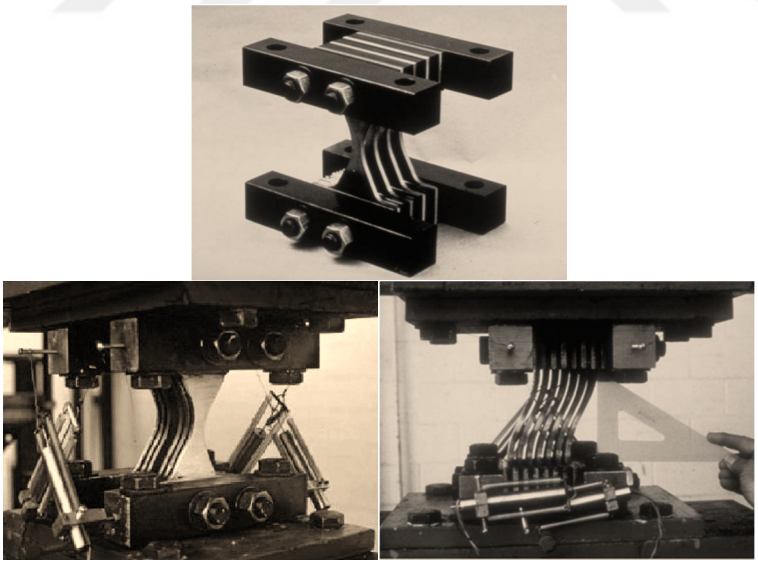
Şekil 1.13. Çevrimsel yükleme etkisindeki geleneksel ve burkulması önlenmiş çelik çapraz elemanların davranışları (Xie, 2005)



Şekil 1.14. Burkulması önlenmiş farklı çelik çapraz elemanların şematik enkesit görünümleri (Xie, 2005)

1.4.1.2.2. ADAS (Added Damping and Stiffness) Sönümleyici Elemanı

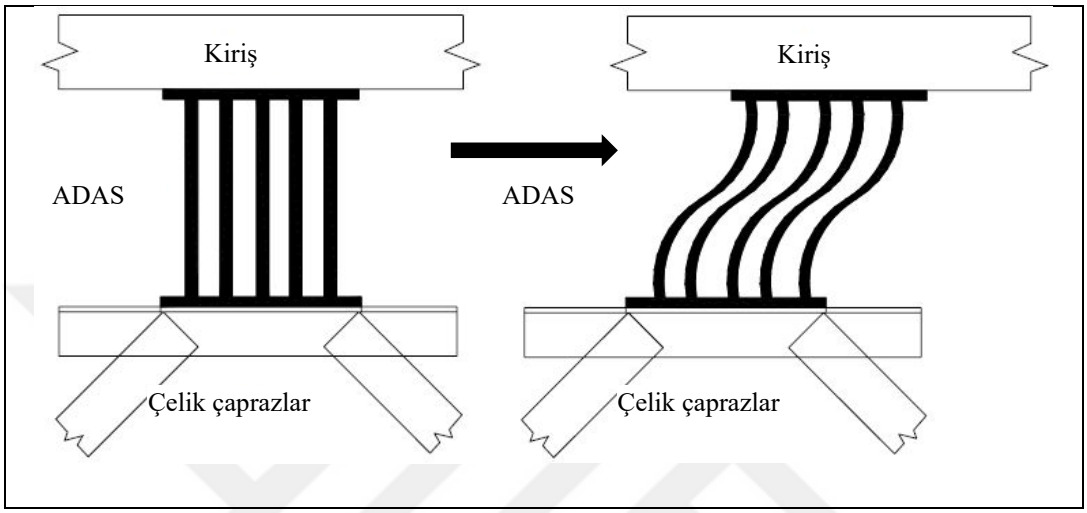
ADAS sönümleyici elemanı, bir dizi "X" şeklindeki çelik plakadan oluşmaktadır (Şekil 1.15). Söz konusu plakaların tabanı ters V çaprazlı çelik çerçeve sistemdeki çaprazların birleşim noktasına, üst kısmı ise kat kirişine tam bağlanmaktadır (Whittaker vd., 1989; Whittaker vd., 1991; Xia ve Hanson 1992; Fierro ve Perry 1993; Aiken vd., 1993). ADAS sönümleyici sistemi, Whittaker vd. (1991) tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 1.15. ADAS sönümleyici elemanı (Whittaker vd., 1991; Aiken, 2006)

Söz konusu plakaların "X" şeklindeki geometrik formu, deprem etkisiyle katlara etkiyen ve sönümleyici tasarımındaki levhalara aktarılan kesme kuvvetlerinden dolayı oluşan eğilme momenti etkisiyle çift eğrilikli olarak eğilme davranışı gösterecek olan

plakaların, kesit boyunca şekildeğiştirmelerin homojen olarak yayılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Castaldo, 2015). Şekil 1.16'da ADAS elemanının şekildeğiştirmiş halinin şematik görünümü verilmektedir. Bu tasarımın prototipi, Bergman ve Goel (1987) tarafından çevrimsel yüklemeler altında test edilmiştir.



Şekil 1.16. ADAS elemanın şekildeğiştirmiş halinin şematik görünümü (Castaldo, 2015)

ADAS sönümleyici elemanının etkinliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak verilmektedir.

Xia vd. (1990), ADAS sönümleyici elemanın davranışını etkileyen; akma yükü, akma yerdeğiştirmesi ve cihazların yapı içeresindeki dağılımı gibi cihazın davranışını etkileyebilecek farklı parametreler üzerinde çalışmışlardır. Söz konusu çalışmada, farklı özelliklerdeki ADAS elemanlarına sahip üç adet on katlı moment aktaran çerçeveli yapı sistemleri dikkate alınmıştır. DRAIN-2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen çıkarımlar aşağıda özet olarak verilmektedir.

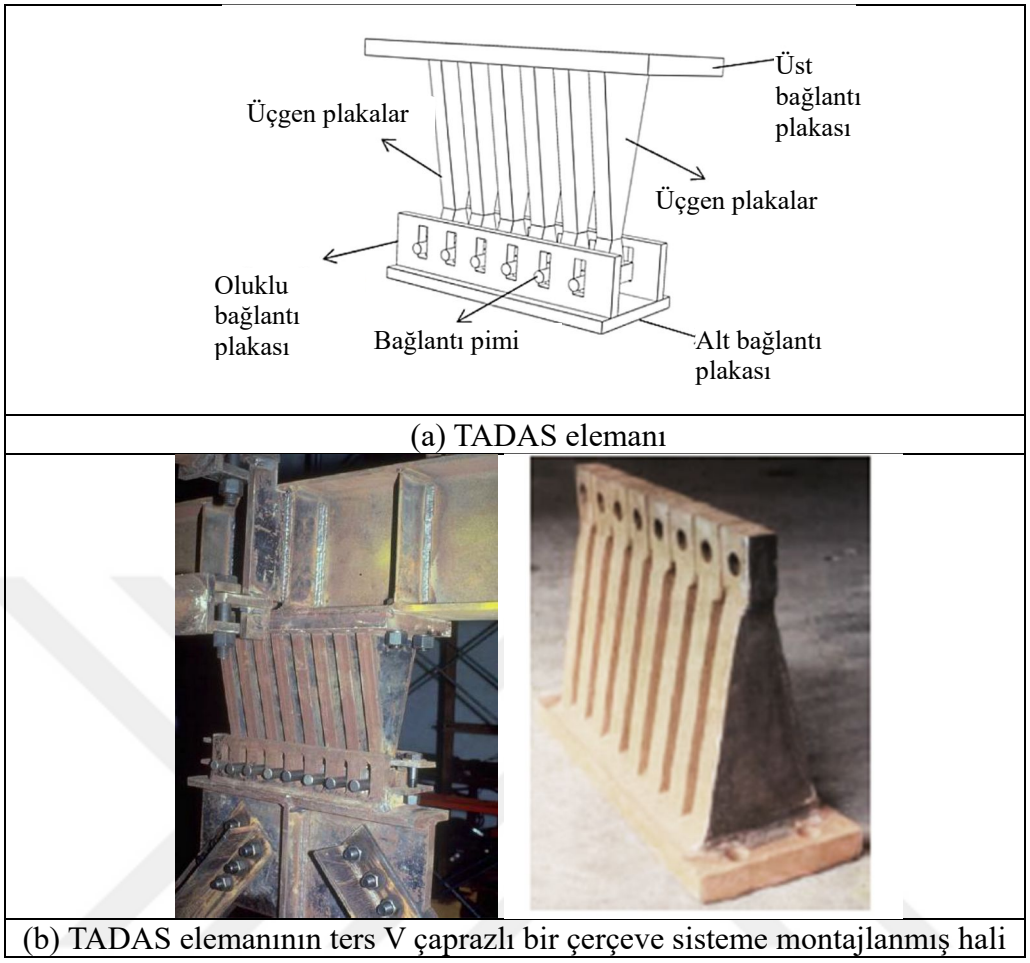
- Cihazın akma yerdeğiştirmesi 0.0014H ile 0.002H arasında değişmelidir. Burada, H kat yüksekliğini ifade etmektedir Xia vd. (1990).
- ADAS elemanlarının akma yükleri, tasarım kesme kuvvetleriyle orantılı olarak dağıtılabilirken, ADAS elemanlarının rijitliği ADAS elemanının olmadığı durumdaki çerçevenin rijitliğine bağlı olarak dağıtılabilmektedir Xia vd., (1990).

Whittaker vd., (1991), ADAS tipi sönümleyicilerin hem sarsma masası testleri hem de çevrimsel yüklemeler altında yarı statik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerinin, Bergman ve Goel (1987) tarafından elde edilen eğrilerle küçük yerdeğiştirme genlikleri için uyum gösterirken, büyük yerdeğiştirme genliklerinde farklar oluştuğu vurgulanmıştır. Söz konusu bu farkın, büyük yatay yerdeğiştirme değerlerinde plakalar üzerinde etkinliği artan eksenel kuvvetlerden dolayı oluştuğu belirtilmiştir (Soong ve Dargush, 1997).

Whittaker vd. (1991) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise ADAS sönümleyicilerinin 1985 yılı Şili ve 1940 yılı El Centro depremleri altında davranışları incelenmiştir. Söz konu incelemede, tek açıklıklı üç katlı süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeve sistemi dikkate alınmıştır. Araştırmacılar, ADAS sönümleyici elemanının kullanılmadığı durumda elde edilen ilk iki modun doğal titreşim periyotları sırasıyla 0.74 ve 0.22 olduğunu, ADAS elemanının kullanıldığı durumda ise bu periyotların sırasıyla 0.47 ve 0.17 olarak elde edildiğini belirtmişlerdir.

1.4.1.2.3. TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness) Sönümleyici Elemanı

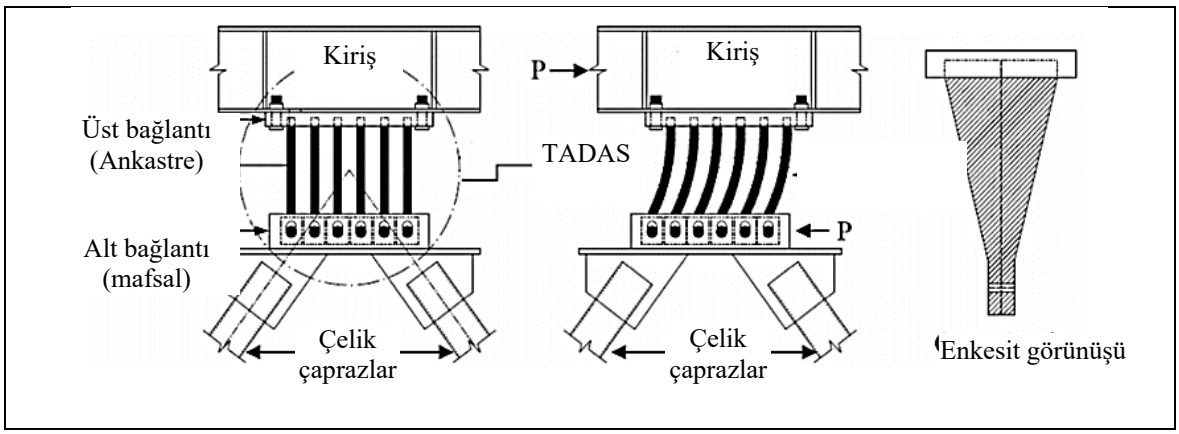
TADAS sönümleyici elemanı, Tsai vd. (1993) tarafından geliştirilmiştir. ADAS sönümleyici sisteminden farklı olarak bir dizi üçgen şeklindeki çelik plakadan oluşmaktadır. Söz konusu eleman, ters V çaprazlı çelik çerçeve sistemdeki çaprazların birleşim noktasına pimler ve oluklu plaka bağlantısı kullanılarak mafsallı, üst kısmı ise kat kirişine kaynaklı birleşimle tam bağlıdır (Şekil 1.17). ADAS elemanından farklı olarak, TADAS elemanındaki plakaların üçgen şeklindeki geometrik formu, deprem etkisiyle katlara etkiyen ve sönümleyici tasarımındaki levhalara aktarılan kesme kuvvetlerinden dolayı oluşan eğilme momenti etkisiyle tek eğrilikli olarak eğilme davranışı gösterecek olan plakaların, kesit boyunca şekildeğiştirmelerin homojen olarak yayılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1.18'de TADAS elemanının şekildeğiştirmiş halinin şematik görünümü verilmektedir. TADAS sönümleyici elemanının, çelik çaprazlı çerçeve sistem içerisindeki performansı deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. TADAS elamanı ile % 46 sönüm oranı elde edilebildiği belirtilmektedir (Tsai vd., 1993).



(a) TADAS elemanı

(b) TADAS elemanının ters V çaprazlı bir çerçeve sisteme montajlanmış hali

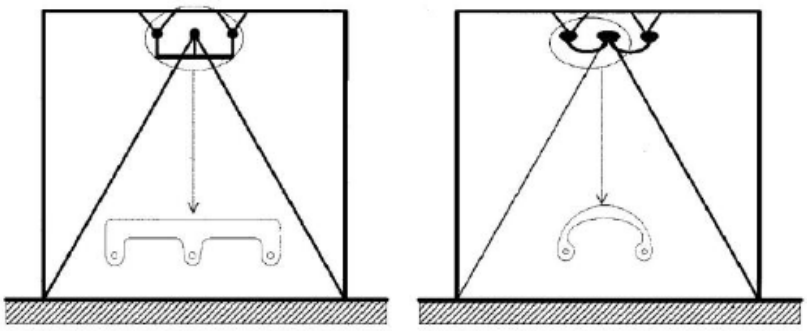
Şekil 1.17. TADAS sönümleyici elemanı (Tsai vd., 1993)



Şekil 1.18. TADAS elemanının şekildeğiştirmiş halinin şematik görünümü (Saeedi vd., 2014)

1.4.1.2.4. E ve C Şekilli Metalik Sönümleyiciler

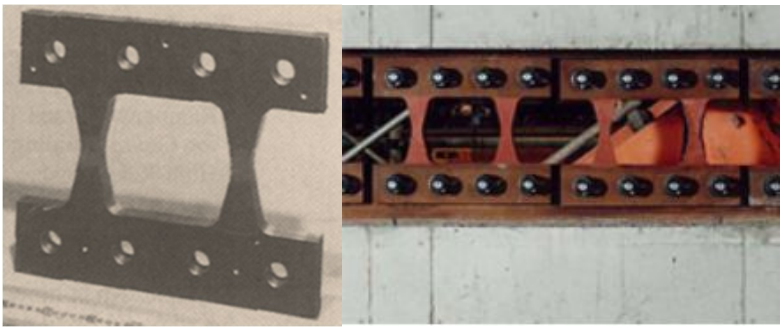
Ciampi vd. (1993; 1995) tarafından önerilen, E ve C şekilli sönümleyici elemanları, ADAS ve TADAS elemanlarına benzer olarak ters V çaprazlı çerçeve tipi yapı sistemlerine uygulanmaktadır. Şekil 1.19'da bu elemanların ters V çaprazlı çerçevelerde yerleşimi şematik olarak verilmektedir. Araştırmacılar bu elemanlarla, çevrimsel yatay yükleme altında, çelik çaprazların elastik sınırlar içinde davranmasını sağlarken, sönümleyici elemanların elastik sınırı aşarak enerji tüketimi yapmasını amaçlamışlardır.



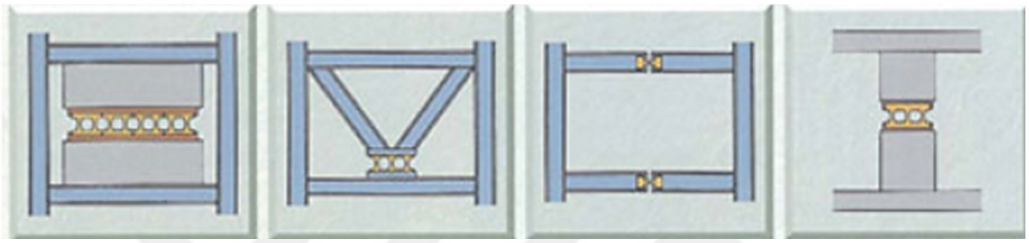
Şekil 1.19. E ve C şekilli metalik sönümleyiciler (Ciampi vd., 1993)

1.4.1.2.5. Bal Peteği (Honeycomb) Şekilli Metalik Sönümleyici

Bal peteği şekilli sönümleyici elemanı, Sakamoto ve Kobori, (1995) tarafından önerilmiştir. Bu sönümleyici eleman bir çelik plaka gövdesine petek şeklinde boşluklar açılarak üretilmiştir (Şekil 1.20). Söz konusu sönümleyici elemanın farklı yapı sistemlerine uygulanabileceği belirtilmiştir (Şekil 1.21). Araştırmacılar, önerilen tasarımların amacını söz konusu elemanların yerleştirildiği yapı sisteminin göreli kat ötelenmelerinden dolayı oluşan elastik ötesi şekildeğiştirmelerden yararlanarak enerji tüketimi yapması ve yapısal elemanlarına etkiyecek deprem kuvvetlerinin azaltılması olarak belirtmiştir. Ayrıca, bal peteği metalik sönümleyici elemanının kat kesme kuvvetlerini % 10.0-% 35.0 arasında azaltacağı ve % 46 oranında sönüm sağlaması beklenmektedir (Sakamoto ve Kobori, 1993;1995).



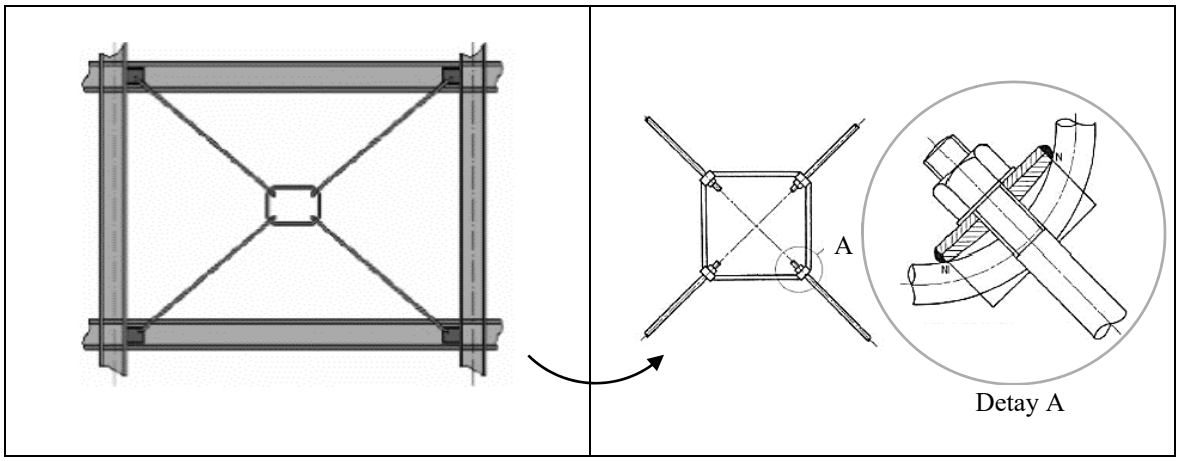
Şekil 1.20. Bal peteği (Honeycomb) şekilli metalik sönümleyici (URL-3, 2018)



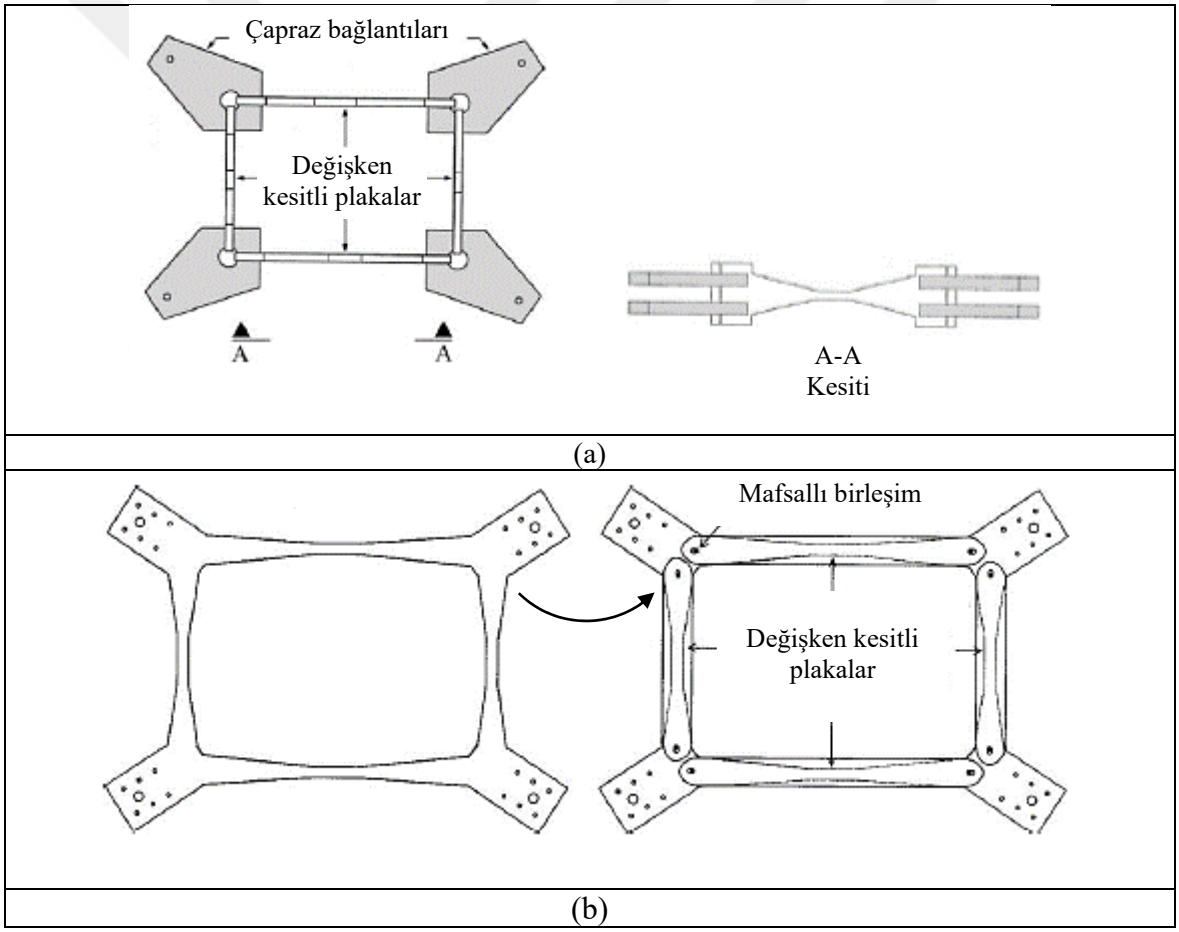
Şekil 1.21. Bal Peteği (Honeycomb) sönümleyici elemanının farklı yapı sistemlerindeki uygulamalarının şematik görünümü (URL-3, 2018)

1.4.1.2.6. Eğilme Çerçeveli Metalik Sönümleyiciler

Eğilme çerçeveli metalik sönümleyiciler, genellikle X çaprazlı çelik çerçeve sistemlerde kullanılmak için geliştirilen metalik sönümleyicilerdir. Söz konusu sönümleyici elemanların prototipi Tyler (1985) tarafından önerilmiştir. Önerilen tasarımda, dikdörtgen biçimli eğilme çerçevesi X şeklindeki çaprazların birleşim noktasına yerleştirilmiştir (Şekil 1.22). Eğilme çerçeveli metalik sönümleyicilerde enerji tüketimi, çevrimsel yüklemeler altında çelik çaprazlara aktarılan eksenel kuvvetlerin etkisiyle eğilme çerçevesinin elastik ötesi şekildeğiştirme yapması ile sağlanmaktadır. Bir diğer tasarım ise Ciampi ve Samuelli-Ferretti, (1990) tarafından önerilmiştir. Söz konusu tasarımlar Tyler'ın (1985) tasarımından farklı olarak eğilme çerçevesi elemanlarının parçalarının değişken kesitli olmasıdır (Şekil 1.23). Söz konusu elemanlarda enerji tüketimi, değişken kesitli plakaların elastik ötesi davranışı ile sağlanmaktadır. Plakaların değişken kesitli olarak tasarlanması ile gerilme yığılmalarının önlenerek şekildeğiştirmelerin homojen olarak dağılması amaçlanmıştır. Böylelikle, düşük çevrim yorulma ömrü de artırılmış olmaktadır.



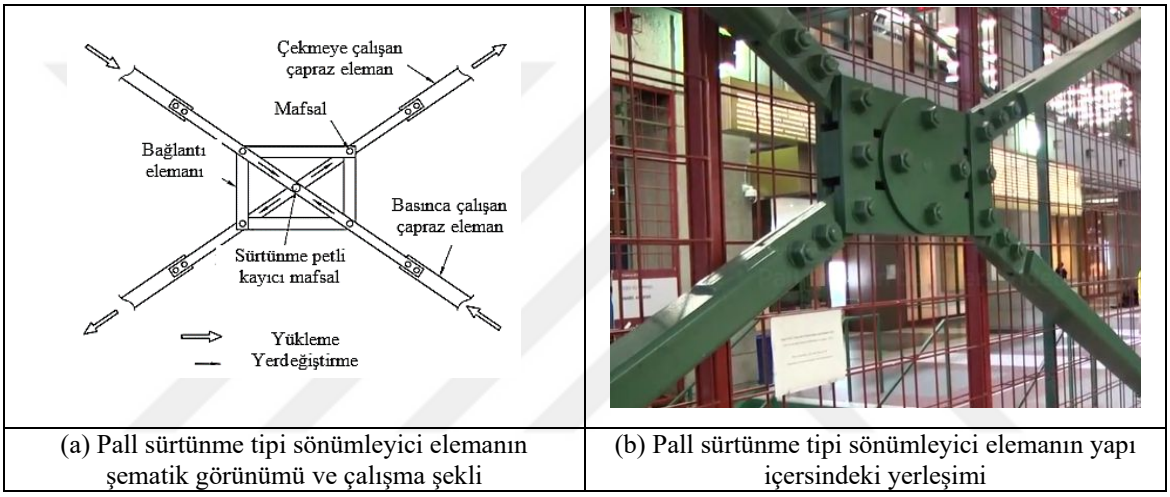
Şekil 1.22. Eğilme çerçeveli metalik sönümleyici (Tyler, 1985)



Şekil 1.23. Eğilme çerçeveli metalik sönümleyiciler (Ciampi ve Samuelli-Ferretti, 1990)

1.4.1.3. Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

Sürtünme, eski zamanlardan bu yana hareketli sistemleri kontrol etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır. Yapı sistemlerinde sürtünme davranışının enerji sönümleyici bir unsur olarak kullanılma çalışmaları yetmişli yılların sonunda başlamıştır (Pall vd., 1980). Bilinen ilk sürtünme tipi sönümleyici deney elemanı Pall ve Marsh, (1982) tarafından önerilmiştir. Söz konusu eleman eğilme çerçeveli metalik sönümleyicilere benzer olarak X çaprazlı çelik çerçeve sistemlere yerleştirilen bir tasarımdır (Şekil 1.24).

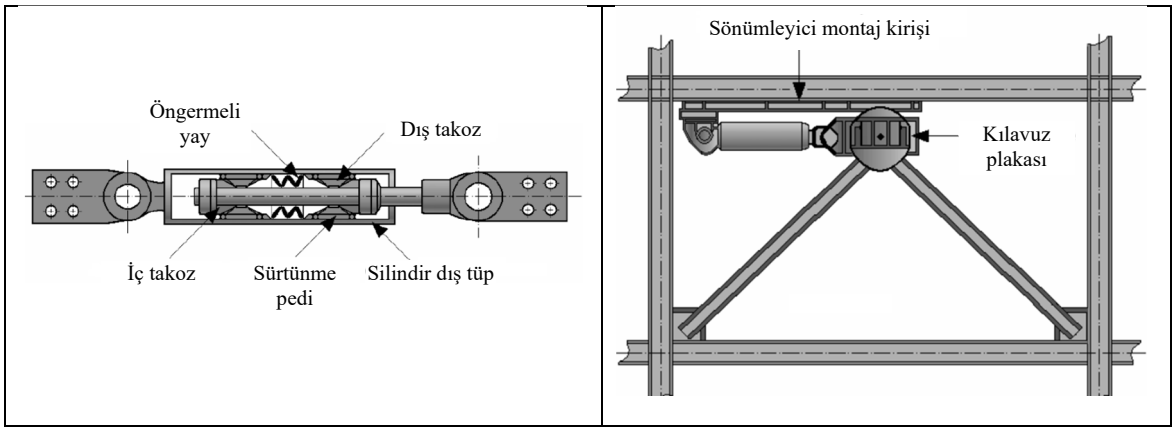


(a) Pall sürtünme tipi sönümleyici elemanın şematik görünümü ve çalışma şekli

(b) Pall sürtünme tipi sönümleyici elemanın yapı içersindeki yerleşimi

Şekil 1.24. Pall sürtünme tipi sönümleyici (Pall ve Marsh, 1982)

Diğer bir sürtünme tipi sönümleyici eleman ise Japonya Sumitomo Metal Endüstrisi tarafından üretilen “Sumitomo” sürtünme tipi elemanıdır. Bu elemanda grafit emdirilmiş bakır petler kullanılmıştır (Constantinou 1994). Tasarımın şematik görünümü Şekil 1.25’te verilmektedir.



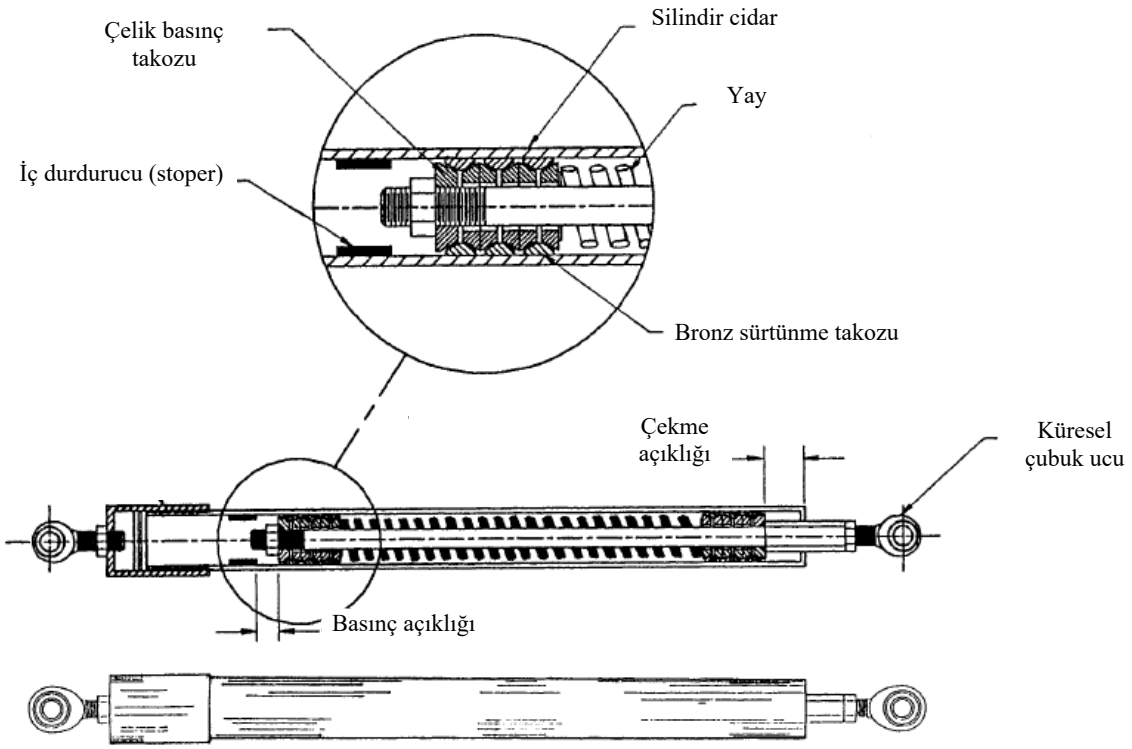
Şekil 1.25. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici (Aiken ve Kelly, 1990)

Söz konusu elemanda enerji tüketimi, öngermeli yayın iç ve dış takozlara normal kuvvet uygulanması sonucunda sürtünme petlerinde zorlanma oluşturulması ile sağlanmaktadır. Grafit, sürtünme kuvvetlerinin istikrarlı kalmasını sağlayarak etkili enerji tüketimi sağlamaktadır. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici, Aiken vd., (1990) tarafından 9 katlı bir binada deneysel olarak test edilmiştir. Araştırmacılar, sönümleyici elemanın yapının enerji tüketme kapasitesini arttırdığını ve yükleme süresince kararlı davranış sergilediğini belirtmişlerdir.

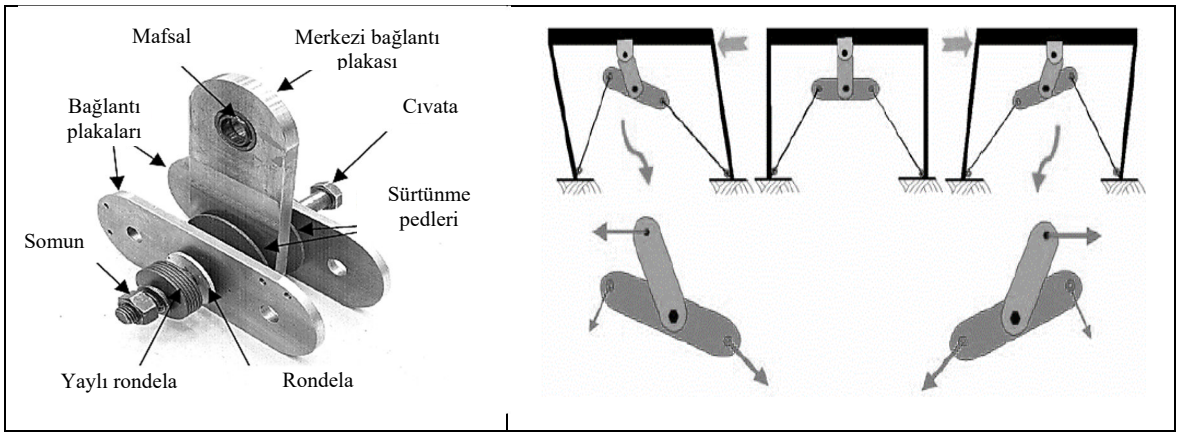
Aiken vd. (1990) tarafından test edilen başka bir sürtünme cihazı ise, başlangıçta boru hatlarında amortisör olarak hizmet etmesi için geliştirilen bir tasarımdır (Richter vd., 1990). Söz konusu sönümleyici elemanın şematik görünümü Şekil 1.26'da verilmektedir. Bu sönümleyicinin ayırt edici özelliği, uzunlamasına yönlendirilmiş yay ve kamalar yardımıyla üretilen tepki kuvvetlerinin normal kuvvet oluşturması ve böylelikle yerdeğiştirme seviyesine bağlı olarak enerji tüketimi gerçekleştirmesidir.

Bir diğer sürtünmeli sönümleyici ise Takai vd. (1988) tarafından geliştirilen ve test edilen tasarımdır. Sismik yalıtımlı bir binada kullanılmak üzere tasarlanmış bir dönmeli-sürtünmeli enerji tüketim elemanlarına örnektir. Bu sönümleyici elemandaki kayar yüzeyler, araç fren balatalarında kullanılan bir malzeme olan sinterlenmiş metal ve paslanmaz çelik parçalardır. Yapı sistemindeki ötelenme hareketini, dönme hareketine dönüştüren bir mekanizma ile çalışmaktadır. Mualla (2000) tarafından, Takai vd., (1988)'nin geliştirdiği elemana benzer olarak sürtünme tipi sönümleyici geliştirilmiş (Şekil 1.27.) ve bu eleman Liao vd., (2004) tarafından 3 katlı bir yapı sistemine eklenerek sarsma masası testleri yapılmıştır. Ayrıca söz konusu tasarım DAMPTECH firması tarafından geliştirilerek farklı

uygulamalar için yeni tasarımlar önerilmiş ve patentlerini almıştır. Bu tasarımların bir kısmı Şekil 1.28'de verilmektedir.



Şekil 1.26. Sürtünme tipi sönümleyici tasarımı (Nims vd., 1993)

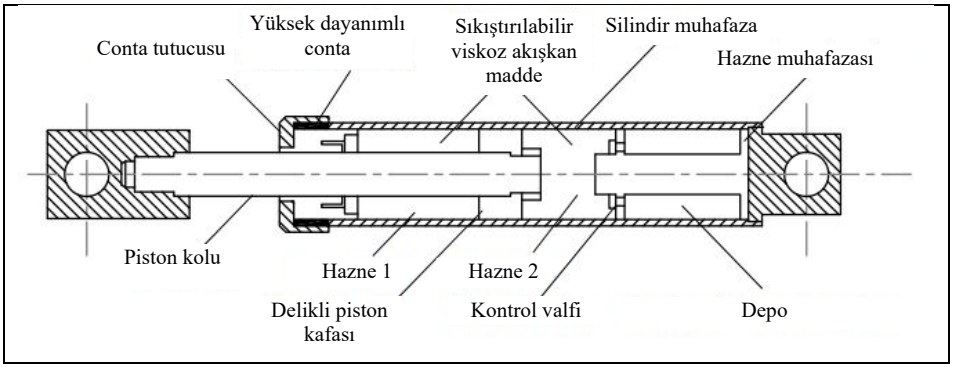


Şekil 1.27. Sürtünme tipi sönümleyici (Mualla, 2000)

Şekil 1.28. Sürtünme tipi sönümleyiciler (URL-4, 2018)

1.4.1.4. Viskoz Akışkanlı Sönümleyiciler

Viskoz akışkanlı sönümleyiciler, özellikle askeri ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğindeki ilk uygulamaları çelik çerçeveli bir yapı ve sismik yalıtımlı köprü üzerinde olmuştur (Constantinou ve Symans, 1993; Tsopelas vd., 1994). Bir viskoz akışkanlı sönümleyici genellikle, bir silikon bileşiği veya benzeri bir yağ bileşiği ile doldurulmuş bir sönümleyici muhafazadan ve içindeki pistondan oluşmaktadır. Piston başlığı, içinden sıvının bir tarafından diğerine geçebileceği birkaç küçük delik bulunmaktadır. Sönümleme işlemi, piston çubuğu ve piston başlığı hareket ettiğinde viskoz akışkan madde, piston başlığının etrafındaki deliklerden akmaya zorlanır. Piston kafası boyunca ortaya çıkan basınç farkı (yukarı akış tarafında yüksek basınç, aşağı akış tarafında düşük basınç), damperin göreceli hareketine dayanan büyük kuvvetler üretir (Lee ve Taylor, 2001). Böylelikle viskoz sıvı, basınç seviyeleri arasındaki farktan dolayı yüksek hızla akar. Bu durum, sıvı parçacıkları ve piston başlığı arasında sürtünmenin oluşmasına neden olur. Oluşan mekanik kuvvetler, ısı enerjisine dönüşerek sönümlenir. Şekil 1.29'da tipik bir viskoz akışkanlı sönümleyicinin boy kesit görünüşü verilmektedir. Şekil 1.30'da ise söz konusu sönümleyici elemanların yapı sistemi içerisindeki uygulamalarına örnekler verilmektedir.



Şekil 1.29. Tipik bir viskoz akışkanlı sönümleyicinin boy kesit görünüşü (Guo vd., 2014)

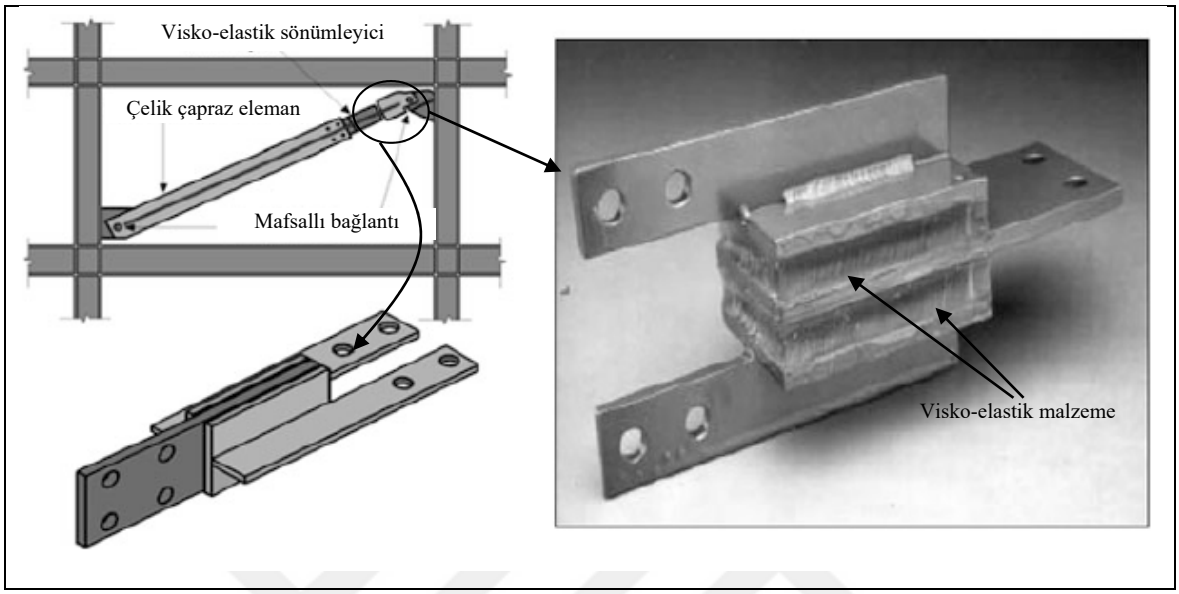
Şekil 1.30. Viskoz akışkanlı sönümleyici uygulamaları (URL-5, 2018)

1.4.1.5. Visko-elastik Sönümleyiciler

Visko-elastik malzemelerin titreşim kontrolü için kullanılması ilk kez uçaklarda titreşim kaynaklı yorgunluğu kontrol etmek için 1950'li tarihlerde kullanılmıştır (Ross vd., 1959). İnşaat mühendisliği alanında ilk olarak 1969'da New York'taki Dünya Ticaret Merkezi'nin ikiz kulelerine, rüzgâr yüklerine karşı direnç göstermesi amacıyla 10.000 adet visko-elastik sönümleyici kullanılmıştır. Visko-elastik sönümleyicilerin, deprem etkilerine karşı kullanılması fikri ise daha yeni bir kökene sahiptir (Castaldo, 2014).

Akrilik polimerler veya benzeri malzemeler, normal elastik davranışın yanı sıra viskoz davranış da göstererek sönümleme sağlayabilmektedir. Bu malzemeler visko-elastik sönümleyicilerin ana elemanlarıdır. Söz konusu sönümleyici elemanlarda, visko-elastik materyal petleri çelik plakalara bağlanır. Böylelikle çelik plakaların göreceli yerdeğiştirmesi, visko-elastik materyalde kayma gerilmesine neden olmakta ve enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Visko-elastik damperler genellikle rüzgâr kaynaklı titreşimlere karşı kullanılmaktadır. Aiken vd. (1993) ve Lobo vd. (1993) tarafından deprem yükleri etkisindeki performansları da deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Şekil 1.31'de tipik bir visko-elastik

sönümleyici elemanının çelik çaprazlı çerçeve içerisindeki şematik görünümü ve eleman detayı verilmektedir.

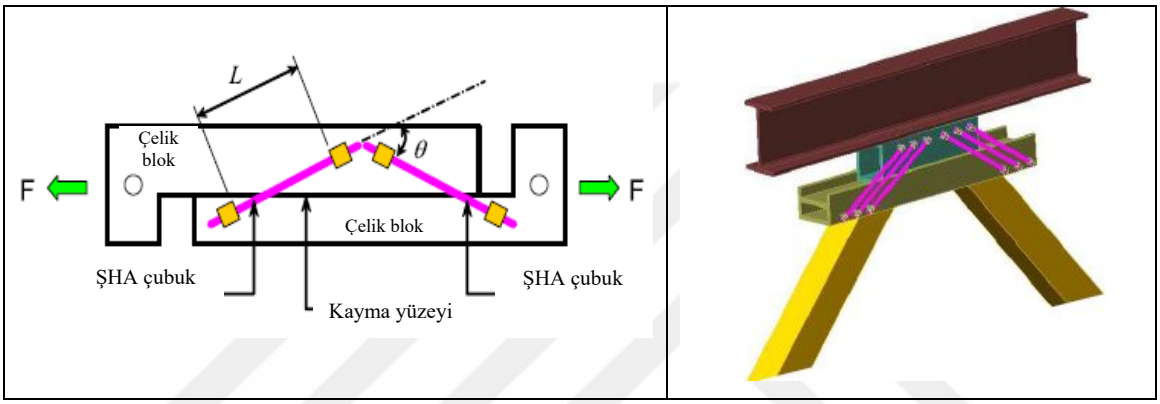


Şekil 1.31. Tipik bir visko-elastik sönümleyicinin görünümü (Castaldo, 2014)

1.4.1.6. Şekil Hafızalı Alaşımların (ŞHA) Kullanıldığı Sönümleyiciler

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), mekanik ve/veya ısı etkisiyle şekildeğişimi gösterdikten sonra söz konusu etkinin ortadan kalkması ile başlangıçtaki formuna dönebilme kabiliyetine sahip malzemelerdir (Milani, 2014). Şekil hafızası alaşımlar, yüksek esneklik, hem düşük hem de yüksek yorulma dayanımına sahip olması, yüksek sönümleme kapasitesi, korozyon direnci ve kararlı elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi gibi özellikleri nedeniyle sönümleyici tasarımlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, ŞHA özellikle yüksek şekildeğiştirme gerektiren çevrimsel yüklemelerde artık gerilmelerin oluşmasını önlemektedir (Javanmardi, 2019). ŞHA'nın sağladığı bu avantajlar, yapılar üzerinde tekrarlı yüklemelerin oluşmasına sebep olan deprem etkilerini azaltmakta etkili olmaktadır. Araştırmacılar, söz konusu elemanların kullanıldığı farklı sönümleyici tasarımları önermişlerdir. Casciati vd., (1998) köprülerde kullanılabilecek sönümleyici tasarımı önermiştir.. Söz konu sönümleyici, ŞHA kirişi ile birbirine bağlanmış üç dikey çelik dikmeden yapılmış çerçeve benzeri bir tasarımdır. Tasarımdaki, iki dikme köprü desteğine bağlanırken, orta dikme ise titreşim kaynağına monte edilmektedir. Sepúlveda vd., (2008) bakır esaslı ŞHA kullanarak çubuk

şeklinde bir tasarım önermişlerdir. Söz konusu sönümleyici tasarımı bir yapı sistemindeki kiriş-kolon bağlantısına monte edilerek sarsma masasında sismik testleri gerçekleştirilmiştir. Zhang ve Zhu (2007) tarafından önerilen tasarımda iki çelik blok ve "nitinol" adı verilen nikel-titanyum alaşımından üretilmiş çubuklar kullanılmıştır. Birbirine geçecek şekilde konumlandırılan çelik bloklar, nitinol çubuklarla birleştirilmiş böylelikle çelik blokların göreli hareketleri nedeniyle şekil değiştiren nitinol çubuklar yardımıyla enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Şekil 1.32'de söz konusu tasarımın yapı içeresindeki yerleşimi ve detayları şematik olarak verilmektedir.



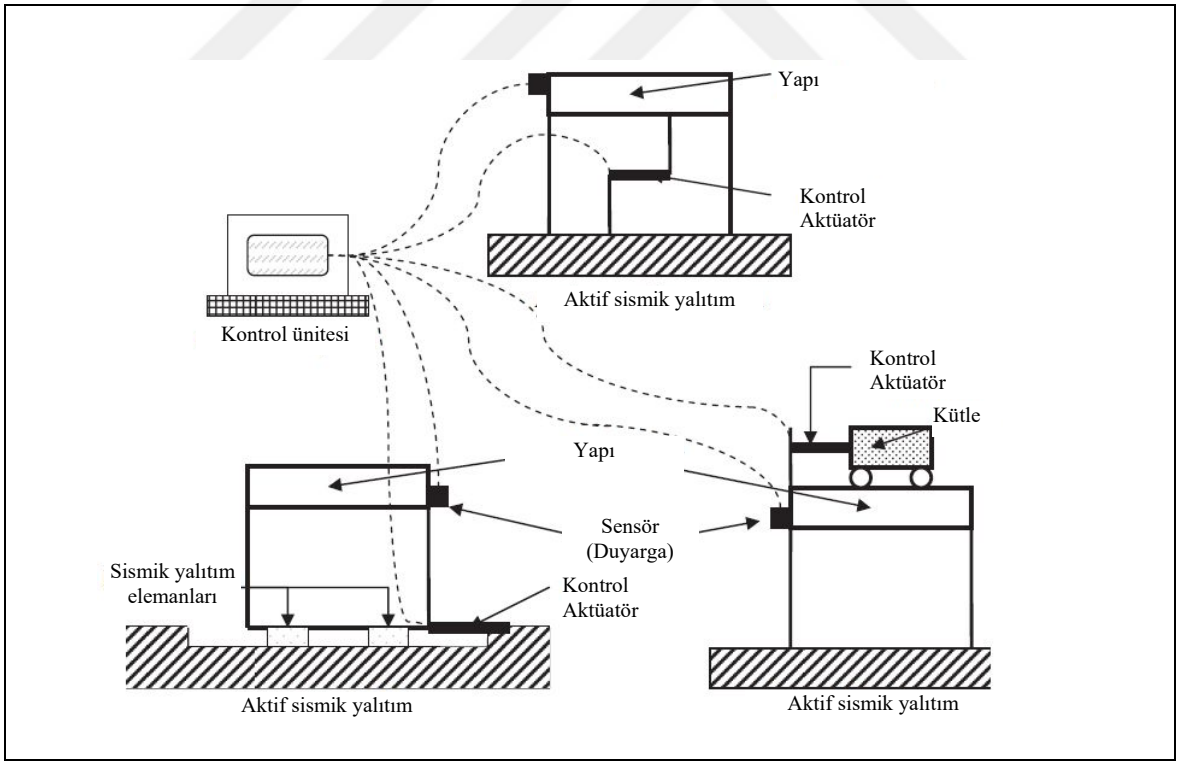
Şekil 1.32. Zhang ve Zhu (2007) tarafından önerilen sönümleyici tasarımına ait görünüm

1.4.1.7. Ayarlı Kütle ve Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler

Ayarlı kütle sönümleyiciler (AKS), genel olarak yapının dinamik tepkisini azaltmak için bir yapıya bağlanan bir kütle ve bir yaydan oluşmaktadır. Sönümleyicinin frekansı, belirli bir yapısal frekansa ayarlanarak, söz konusu bu frekans uyarıldığında, sönümleyicinin yapısal hareket ile faz dışı kalması sağlanır. Söz konusu sönümleyici elemanlarda deprem enerjisi, deprem etkisiyle üretilen atalet kuvvetleri ile sönümlenmektedir. Ayarlı sıvı sönümleyiciler de ise enerji tüketimi kullanılan akışkanın viskoz hareketi ile sağlanmaktadır. AKS ilk olarak gemilerin yalpalama hareketlerini ve gemi gövdesi titreşimlerini azaltmak için 1909'da Frahm tarafından uygulanmıştır (Frahm, 1911). AKS için öncü teorik çalışmalar Ormondroyd ve Den Hartog (1928) tarafından yapılmıştır. Den Hartog (1940) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, ayarlı kütle sönümleyicilerin, optimum sönümleme yapabilmesi için gerekli parametrelerinin detaylı incelemeleri yapılmıştır. AKS'in, tek serbestlik dereceli sistemlerdeki davranışı üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Randall vd., 1978; Warburton 1981, 1982;Warburton ve Ayorinde, 1980; Tsai ve Lin, 1993).

1.4.2. Aktif ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

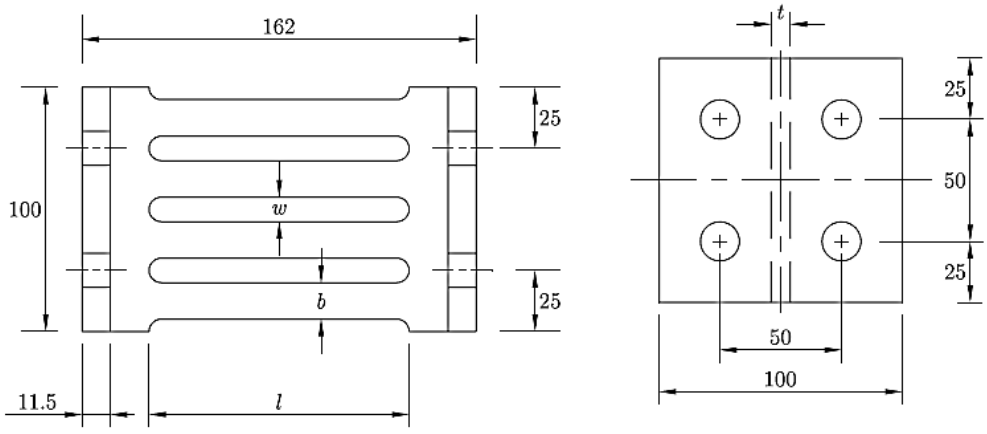
Aktif ve yarı aktif kontrol cihazlarında, deprem etkileriyle oluşan yapı hareketlerine karşı kontrol kuvvetlerini geliştirmek için yapıya bir kontrol cihazı (kontrol aktüatörü) bağlanmaktadır. Tasarımcı tarafından önceden belirlemiş bir kontrol algoritması, çeşitli sensörler tarafından sağlanan gerçek zamanlı verilere dayanarak kontrol kuvvetlerini belirler. Söz konusu sistemlerin çalışma şekli özellikle depreme dayanıklı yapı tasarımında tasarım ve uygulama aşamalarında yapılan kabullerin ve depremin doğasında kaynaklı olan belirsizliklerin fazla olması nedeniyle umut vadeden kontrol sistemleridir. Bunun yanında, söz konusu sistemlerin ana dezavantajları ise cihazların yapı kontrolünü sağlaması için harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymalarıdır. Bir diğer problem ise söz konusu kontrol sistemlerinin mevcut teknoloji ışığında depreme dayanıklı yapı tasarımı uygulamaları için ekonomik ve pratik olarak uygulanabilir olmamalarıdır (Milani, 2014). Şekil 1.33'te aktif kontrol sistemlerinin çalışma şekli şematik olarak verilmektedir.



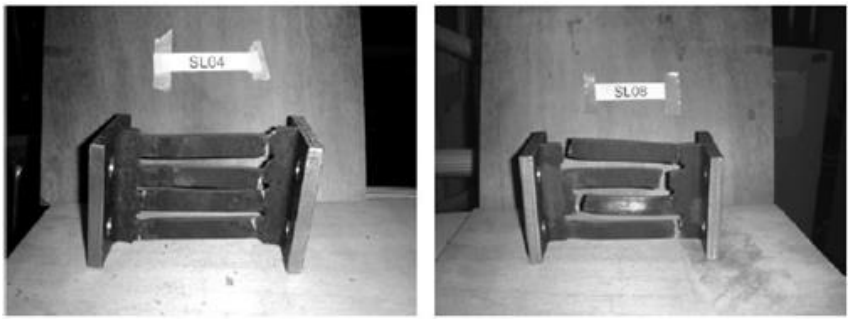
Şekil 1.33. Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeklinin şematik gösterimi (Hadi ve Uz, 2017)

1.5. Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar

Chan ve Albermani (2008) tarafından geniş başlıklı I profilin gövdesinde belirli aralıklarda yarıklar açılarak çelik bir pasif sönümleyici geliştirmişlerdir (Şekil 1.34). Geliştirilen bu sönümleyicinin enerjiyi sönümlemesi, yarıklar arasında kalan çelik kısımların eğilme etkisiyle akmasına ve elastik ötesi davranış göstermesine bağlıdır. Bu sönümleyici sistemi çapraz elemanların kirişe birleştiği noktaya yerleştirilerek kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında pasif sönümleyicide oluşan hasar durumları Şekil 1.35'te görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi hasarlar, yarıklar arasında kalan çelik çubukların, profilin başlığına yakın bölgelerde eğilme etkisinden daha çok kesme kuvvetlerinden dolayı oluşmuştur. Bu durum, sistemin yeteri kadar sünek davranış göstermesini engellemiş dolayısıyla da tüketilen enerji miktarının sınırlı kalmasına sebep olmuştur.

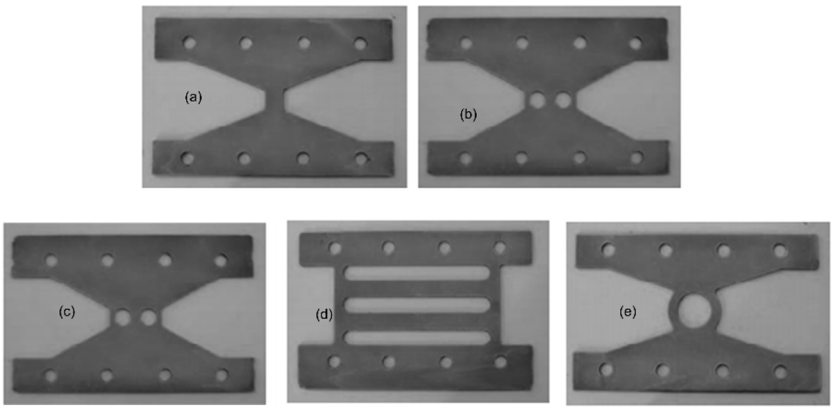


Şekil 1.34. Çelik yarıklı metalik sönümleyici (Chan ve Albermani, 2008)



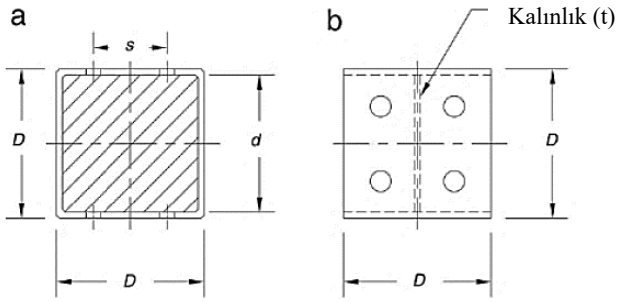
Şekil 1.35. Deney elemanlarında oluşan hasar durumları (Chan ve Albermani, 2008)

Li G. ve Li H. (2008) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda beş farklı geometride metalik sönümleyici tasarlanarak çevrimsel yüklemeye tabi tutmuştur. Önerilen metalik sönümleyicilerin hasar durumları ve enerji sönümleme kapasiteleri hesaplanarak optimum rijitlik ve sönüme sahip olan tasarımın belirlenmesine çalışılmıştır. Deney sonuçlarına göre tek daireli delikli metalik sönümleyicinin (Şekil 1.36) hem başlangıç rijitliği hem de tüketilen enerji miktarı açısından göreceli olarak daha iyi sonuç verdiği vurgulanmıştır.

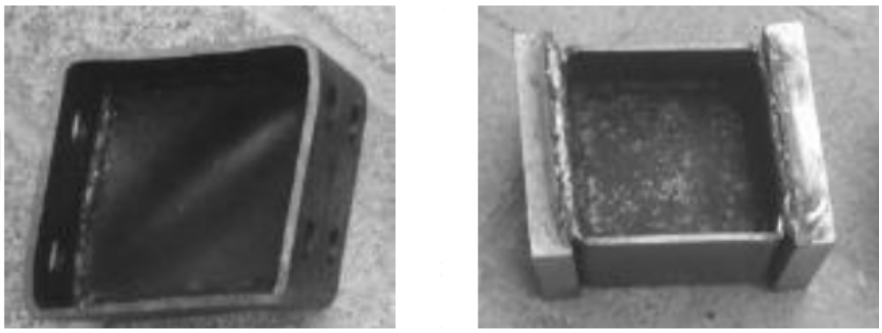


Şekil 1.36. Farklı geometrilerdeki metalik sönümleyiciler (Li G. ve Li H., 2008)

Chan vd., (2009) tarafından yapılan çalışmalarda on dokuz adet ½ ölçekte hazırlanmış pasif sönümleyici deney elemanları monotonik ve çevrimsel yüklemeye tabii tutulmuştur. Önerilen pasif sönümleyici, içi boş kare profilin iç kısmına bir diyafram levhasının kaynatılması ile oluşturulmuştur (Şekil 1.37). Çapraz elemanlarla kiriş arasına yerleştirilen deney elemanı, farklı kesit boyutları (D) ve farklı diyafram levhası kalınlıkları (2, 3, 4 mm) ile üretilmiştir. Ayrıca önerilen sönümleyicinin alt ve üst kısmına yerleştirilen rijitleştirici başlığın eleman davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, diyafram levhasının narinliğinin artması ile sönümlenen enerji miktarı da artmıştır. Ancak, sönümleyiciye eklenen rijitleştirici başlığın, elemanın daha az enerji sönümlemesine sebep olduğu görülmüştür. Rijitleştirici başlığın olması ve olmaması durumlarına göre deney elemanında oluşan hasar durumları Şekil 1.38'de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi başlığın sönümleyici levhaya birleştiği noktadaki kaynaklı birleşimlerde oluşan hasarlar, önerilen sönümleyici tasarımının enerji sönümleme kapasitesini azaltmıştır.

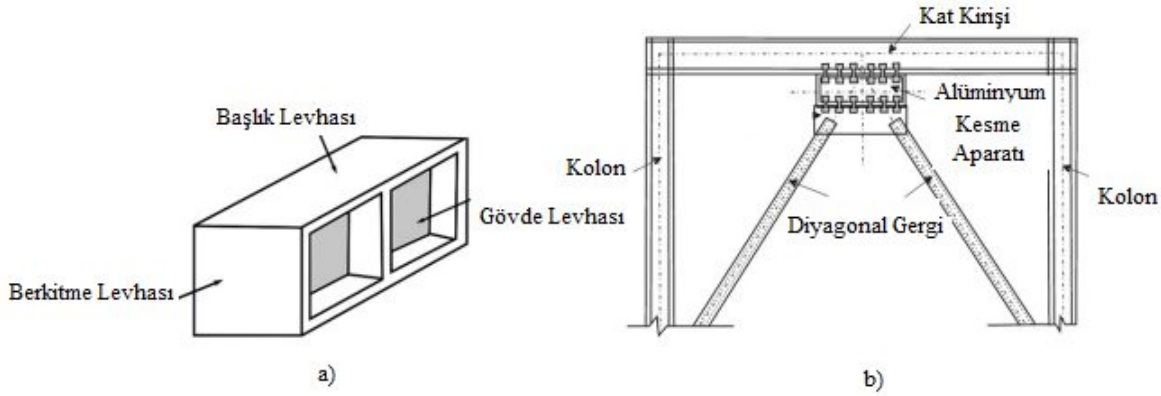


Şekil 1.37. Üretilen deney elemanlarının şematik görünümü (Chan vd., 2009)

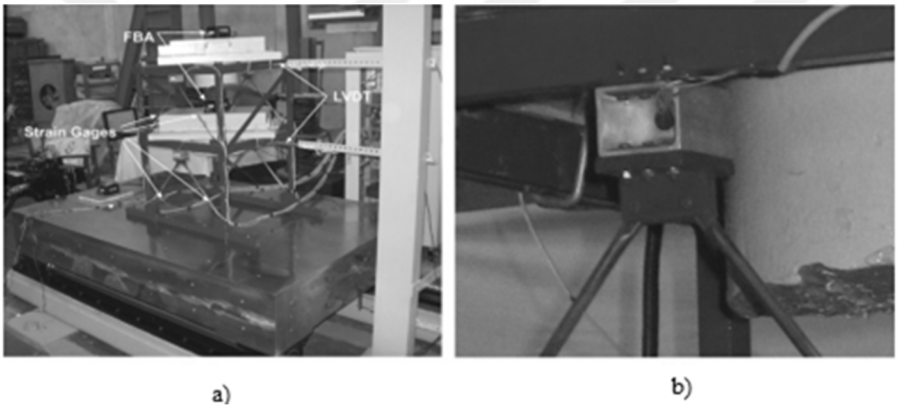


Şekil 1.38. Deney elemanlarında oluşan hasar durumları (Chan vd., 2009)

Rai vd. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, Chan vd. (2009)'nin çalışmasında kullanılan dikdörtgen kesitli diyafram levhalı sönümleyici tasarımına benzer alüminyum kutu biçimli metalik sönümleyici tasarlamışlardır. Üretilen sönümleyici aparat ters V-çaprazlı çelik perde sisteme monte edilerek sarsma tablası yardımıyla sismik deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.39). Deneysel çalışma kapsamında 1/12 ölçekli tek açıklıklı ve 2 katlı deney modelini "Taft" yer hareketine maruz bırakmışlardır (Şekil 1.40). Elde edilen sonuçları geleneksel merkezi çaprazlı çelik çerçevelerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalara göre alüminyum kesme aparatlı çerçevenin, referans deney elemanına kıyasla taban kesme kuvvetinin %41-60 oranında azaldığı belirlenmiştir.



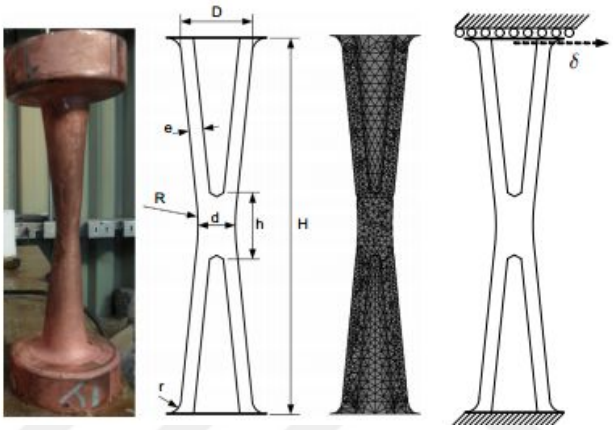
Şekil 1.39. a) Alüminyum sönümleyici, b) Sönümleyici eklenmiş çelik gergili çerçeve (Rai vd., 2013)



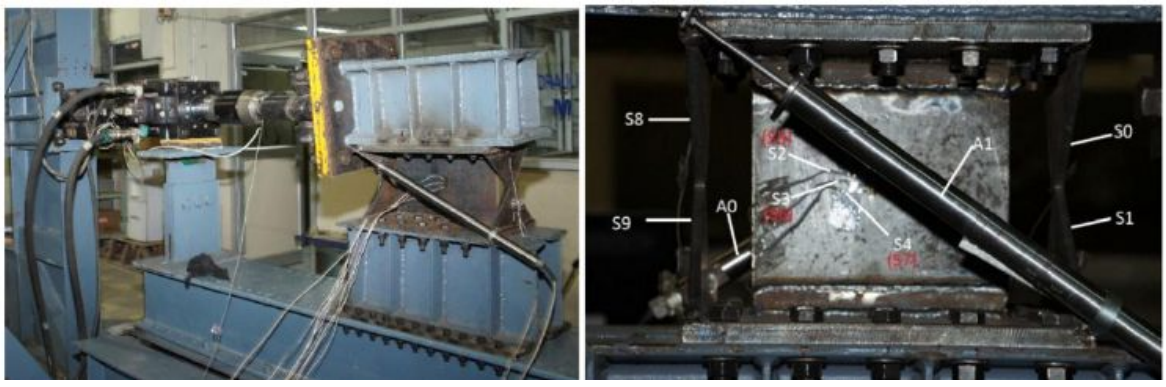
Şekil 1.40. a) Sarsma tablalı deney düzeneği, b) Alüminyum metalik sönümleyici (Rai vd., 2013)

Briones ve Llera (2014), bakır enerji yutma aparatının tasarımını ve tekrarlı yük etkisindeki davranışlarını araştırmak amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu yenilikçi sönümleyici tasarımı, elektrik iletiminde kullanılan saf bakırdan üretilmiş kum saati şekilli bakır enerji sönümleyicidir (Şekil 1.41). Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, önerilen tasarımın çevrimsel yük altında önemli ölçüde enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu ve kırılma öncesindeki 20 yük çevrimine dayanarak çelikten daha iyi bir pekleşme davranışı ortaya koyduğu görülmüştür. Önerilen tasarım, bakırın sünekliğinden yararlanarak yüksek çevrim sayılarında sistemin enerji sönümleme kapasitesini artırırken, bakırın akma ve kopma dayanımının düşük olması sebebiyle, sistemin dayanımına pozitif bir katkı sağlamadığı görülmektedir. Sahoo vd. (2015) çelik levhaların hem eğilme hem de kesme etkisi altında akmasını sağlayacak şekilde bir pasif sönümleyici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarımlarda, “X” şeklinde eğilme davranışı gösteren iki adet çelik

levha ve bir adet kesme etkisi altında şekildeğiştirecek olan çelik levha kullanılmıştır (Şekil 1.42). Farklı geometrik özelliklere sahip üç farklı levhadan oluşan sönümleyici tasarımlarının, yük taşıma kapasiteleri, çevrimsel davranışları, enerji sönümleme kapasiteleri ve süneklikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Yapılan sonlu eleman analizleri yardımıyla da tasarımların nihai dayanımları ve çevrimsel yükleme altındaki davranışları sayısal olarak elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçların, nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir.



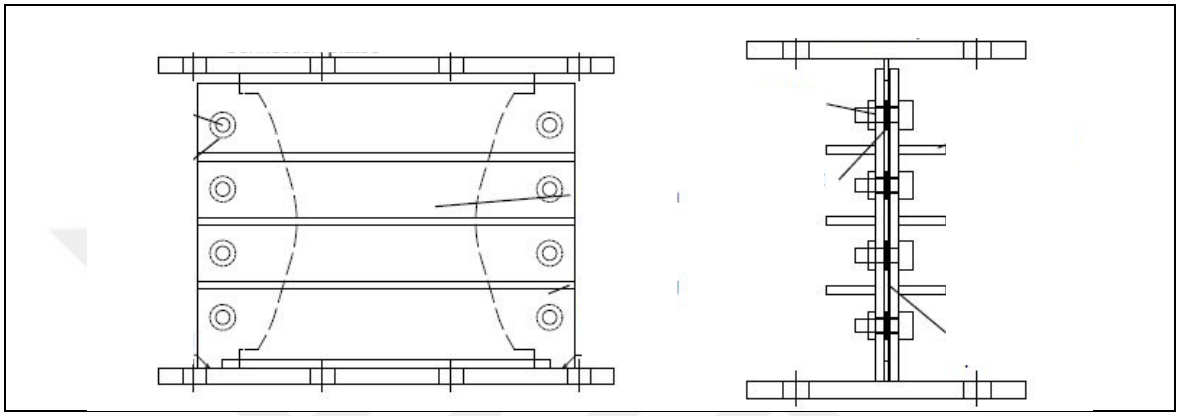
Şekil 1.41. Kum saati şekilli metalik sönümleyici (Briones ve Llera, 2014)



Şekil 1.42. Deney düzeneği (Sahoo vd., 2015)

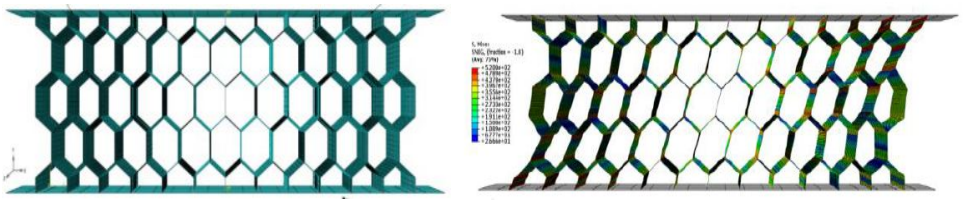
Deng vd. (2015) tarafından burkulması önlenmiş çelik levhalardan oluşan sönümleyici eleman önerilmiştir (Şekil 1.43). Önerilen sönümleyici tasarımı ile enerji sönümlemeyi sağlayacak çelik levha her iki yönde düzlem dışı burkulmasının önlenmesi amacıyla sınırlandırılmıştır. Tasarımın çevrimsel davranışının elde edilmesi amacıyla dört adet

numune üretilmiş ve yarı statik çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Sönümlemeyi sağlayan levhalar ile bu levhanın burkulmasını önleyecek levhaların rijitlik ve dayanımının yanı sıra bu levhaların aralarındaki mesafe araştırma parametresi olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, sonlu eleman analizlerinde elde edilen sonuçlar ile doğrulanarak önerilen sönümleyici tasarımının analitik modeli oluşturulmuştur.



Şekil 1.43. Burkulması önlenmiş çelik levhalı sönümleyici tasarımı (Deng vd., 2015)

Naeem vd. (2015) tarafından yapılan analitik çalışmalarda, yapıların deprem performansının artırılması amacıyla bal peteği şeklinde metalik sönümleyicilerin monotonik ve çevrimsel yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, yük-yerdeğiştirme, sönümlenen enerji-yerdeğiştirme eğrileri ve hasar durumları elde edilmiştir (Şekil 1.44). Eleman ölçeğinde yapılan çalışmalarının yanı sıra, önerilen metalik sönümleyicinin etkinliğinin tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla 15 katlı bir yapıya uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen metalik sönümleyicinin hem rijitliğe hem de dayanıma önemli oranda katkı sağladığı vurgulanmıştır.



Şekil 1.44. Bal peteği görünümlü metalik sönümleyicinin şekildeğiştirme durumu (Naeem vd., 2015)

Lee vd. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, kum saati şeklindeki şerit metalik sönümleyiciler (Hourglass-shaped strip damper (HSD)) geliştirilmiştir. Sönümleyiciyi oluşturan çelik şeritlerin enkesit alanları kesit ortasına gidildikçe azalan şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım yardımıyla, yatay yükler altında çubuk boyunca oluşacak plastik şekildeğiştirmelerin homojen olarak dağılacağı vurgulanmıştır. Deney elemanları monotonik ve tekrarlı yüklemelere tabi tutulmuştur. Çalışmalarda araştırma parametreleri olarak yükleme hızı, malzeme dayanımı ve sönümleyici çelik şerit sayısı olarak belirlenmiştir. Elde dilen sonuçlara göre, tasarlanan sistemin yüksek sünekliğe ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, monotonik yüklemelerden elde edilen sonuçlar ile çevrimsel yüklemelerden elde edilen sonuçların birbirinden farklı olduğu görülmektedir (Şekil 1.45). Şekillerden de görüleceği gibi monotonik yükleme durumunda, sönümleyiciyi oluşturan çelik şeritler kesitin daraldığı orta kısımdan koparken, çevrimsel yükleme altında aynı deney elemanının çubuklarında mesnet bölgelerine yakın kısımlarda hasar oluştuğu görülmüştür.

(a) Monotonik yükleme durumu (b) Çevrimsel yükleme durumu

Şekil 1.45. HSD elemanlarda oluşan hasar durumları (Lee vd., 2016)

Lee vd. (2016) yapıların sismik performansını artırmak için sürtünme ve çelik şerit tipi sönümleyiciden oluşan hibrit sönümleyiciyi önermişlerdir. Önerdikleri sistemin etkisini araştırmak için 10 farklı deney elemanı üzerinde yarı statik çevrimsel deney gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarının çevrimsel yük etkisindeki davranışları karşılaştırılmış ve kırılma modlarını incelenmiştir. Sürtünme davranışı, şekildeğiştirme davranışı, şerit tipi sönümleyicilerin histerik davranışı ve enerji yutma kapasitelerini belirlenmiştir. Şekildeğiştirme ve enerji sönümleme kabiliyetlerinin düzlem dışı davranışa karşı daha rijit olan şerit tipi sönümleyicilerin kullanılmasıyla arttığı ortaya koyulmuştur.

Ayrıca sürtünme pedi yardımıyla elemanın sünekliğine büyük oranda katkı sağlandığı vurgulanmıştır.

Garivani vd. (2016) tarafından tarak dişli (CTD-(comb-teeth damper)) metalik sönümleyiciler tasarlanmıştır. Sönümleyiciyi oluşturan birden fazla çelik dişin eğilmesi ile enerjinin sönümlenmesi düşünülmüştür. Bu amaçla, iki tip tasarım önerilmiştir (CDT-1, CTD-2).Yanal burkulması önlenmemiş (CTD-1) ve önlenmiş (CTD-2) olarak üretilen bu iki tasarım çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Yanal yük altında CDT-1'de oluşan hasarlarda dişlerde oluşan yanal burkulmanın etkili olduğu vurgulanmıştır (Şekil 1.46-a). CDT-2'de ise çelik dişler çelik bir mengene ile sınırlandırılarak burkulması önlenmiştir (Şekil 1.46-b). Böylece, çelik dişlerde oluşan yanal burkulma davranışının, sönümleyici davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Burkulması önlenmiş olan CTD-2 tasarımın, burkulması önlenmemiş olan CTD-1 tasarımına kıyasla daha çok enerji tükettiği ortaya konmuştur.

(a)-CDT-1 (b)-CDT-2

Şekil 1.46. Tarak dişli metalik sönümleyicilerde oluşan hasar durumları (Garivani vd., 2016)

Mohammadi vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, TADAS sönümleyici elemanının yüksek yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan sayısal model, deneysel verilerden yararlanılarak doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda, TADAS damperinin büyük yerdeğiştirmelere maruz kalması durumunda, sönümleyici elemandaki bağlantı pimlerinin, bağlantı plakasındaki olukların üst kısmına dayandığını ve bu durumun sönümleyicinin daha rijit bir eleman gibi davranmasına sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar, söz konusu rijitlik artışının ana yapı

elemanlarına (kirişler, çaprazlar vd.) daha fazla yükün etkimesine sebep olduğu vurgulanmıştır.

Yukarıda özet şekilde verilen çalışmaların yanı sıra, araştırmacılar tarafından farklı geometri ve malzeme özelliklerine sahip sönümleyici tasarımları önerilmiş, söz konusu tasarımların etkinliğinin araştırılması amacıyla da deneysel, sayısal ve teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. (Nakashima vd., 1994; Wang ve Chein, 2009; Benavent-Climent, 2010; Benavent-Climent vd., 2011; Maleki ve Bagheri, 2010; Maleki ve Bagheri, 2013; Maleki ve Bagheri, 2014; Hsu ve Halim, 2017; Özkaynak, 2017; Demir, 2018; Ghaedi vd., 2018; Javanmardi vd., 2019).

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapıların, yatay yükler etkisinde yeterli rijitliği ve dayanımı gösterebilmesi, geleneksel perde (betonarme, çelik, kompozit) elemanların ve/veya çelik çaprazlı perdelerin kullanılması ile mümkündür. Buna rağmen, yeterli derecede sünek tasarlanmayan bu tür yapı elemanları ve bağlantıları, yapı sisteminin deprem etkileri altında yeteri kadar enerjiyi tüketmesini önleyerek, yapıda ciddi hasarların oluşmasına sebep olmaktadır. Özellikle çelik yapılarda yanal ötelenmeyi sınırlandırmak için kullanılan çelik çaprazların burkulması, önemli hasarlara ve ani dayanım azalmalarına sebep olmaktadır. Bu elemanların çerçeve içerisine nasıl yerleştirildiği, mesnetlenme koşulları, malzeme dayanımı dolayısıyla da rijitliği, sistemin tüm davranışını etkilemektedir. Bu nedenle, yapılarda deprem yüklerinden dolayı oluşabilecek hasarlara karşı çelik çapraz elemanların çerçevelerde birleşim noktalarının dayanım ve rijitlikten ödün vermeden sünek bir biçimde tasarlanması ve detaylandırılması gerekmektedir. Bu amaçla, özellikle yapı elemanlarının birleşim noktalarına eklenecek sönümleyiciler tasarlanmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalar, metalik sönümleyicilerin üretiminde ve/veya çerçeve sisteme montajında kaynaklı birleşimler kullanılmasının hem yorulma dayanımını azaltması hem de yapı sünekliği bakımından yetersiz davranış göstermesine sebep olduğunu göstermektedir. Bu durum, yapı sisteminin yük altında gevrek bir davranış göstererek, önerilen tasarımın istenilen şekilde deprem enerjisini sönümlemesini engellemektedir. Ayrıca geleneksel sönümleyici tasarımlarında sıklıkla kullanılan dikdörtgen enkesitli çubuklar ve/veya şeritler, düzlem dışı yüklemelere maruz kalmaları durumunda enerji tüketemeden dayanımlarını kaybetmektedirler.

Bu tez çalışmasının amacı, literatürdeki kaynaklı ve yekpare üretilen sönümleyici tasarımlardan farklı olarak, tüm parçaları takıp çıkarılabilir, gerek görülmesi durumunda, sönümleyici tasarımlarındaki ana elemanların tasarımında herhangi bir değişiklik yapmadan yapının süneklik-rijitlik talebine uygun olarak azaltılıp-artırılmasına imkân sağlayan, farklı dayanım ve süneklik talebine sahip yapı sistemlerine kolay bir şekilde adapte edilebilen modüler sönümleyiciler tasarlamaktır.

Önerilen sönümleyici tasarımı ile hem sönümleyiciyi oluşturan parçaların üretilebilirliği hem de yapıya ait çerçeve sisteme montajı daha kolay bir hale gelmektedir. Özellikle geometrik optimizasyonu yapılan çelik çubuklar, çerçeve sistemin düzlem dışı yüklemelere maruz kalması durumunda, tüm doğrultularda rijitliğinin aynı olması sebebiyle dikdörtgensel enkesitli çubuklara ve/veya şeritlere kıyasla daha dengeli bir davranış gösterecektir. Ayrıca, deprem gibi yapılarda yatay yükler oluşturan etkiler altında sönümleyicide hasar oluşması durumunda yekpare ve kaynaklı sönümleyicilerden farklı olarak sönümleyicinin tamamının değiştirilmesi yerine sadece sönümlemeyi gerçekleştiren çelik levhalar ve çelik çubukların değiştirilmesi hem zaman hem de maddi açıdan üstünlük sağlayacaktır.

Deprem gibi yapı sistemlerine yatay yüklerin etkimesine neden olan yükleme durumlarında özellikle çerçeve tipi yapılarda sıklıkla görülen kat döşemelerinin teorik hesaplamalarda dikkate alınan rijit diyafram gibi davranmadığı dolayısıyla da sönümleyicilerin bağlı olduğu kirişlerde yatay ötelenme miktarına bağlı olarak düşey yer değiştirme yaptığı bilinmektedir. Genel olarak sönümleyici tasarımlarında, sönümleyicinin yatay yük altında enerjiyi tüketeceği düşünülerek sönümleyicinin bağlı olduğu kirişin düşey hareketi ihmal edilmektedir. Bu durum sönümleyici tasarımını oluşturan çelik levha, şerit ve/veya çelik çubuk gibi narin elemanların burkulmadan dolayı dayanımlarını kaybetmesine sebep olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubuklardan oluşan sönümleyiciler, konik şekilli dairesel enkesitli çelik çubuklardan oluşan sönümleyiciler, sadece çelik plakalardan (ÇP) oluşan sönümleyiciler ve KSDE ve ÇP'lerin birlikte kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) üretilmiştir. Ayrıca, düşey yerdeğiştirmeler nedeniyle KSDE ve ÇP'lerin birlikte kullanıldığı enerji sönümleyicide (İBES) çelik çubukların erkenden burkulmasını önlemek amacıyla yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu oluşturularak üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) üretilmiştir.

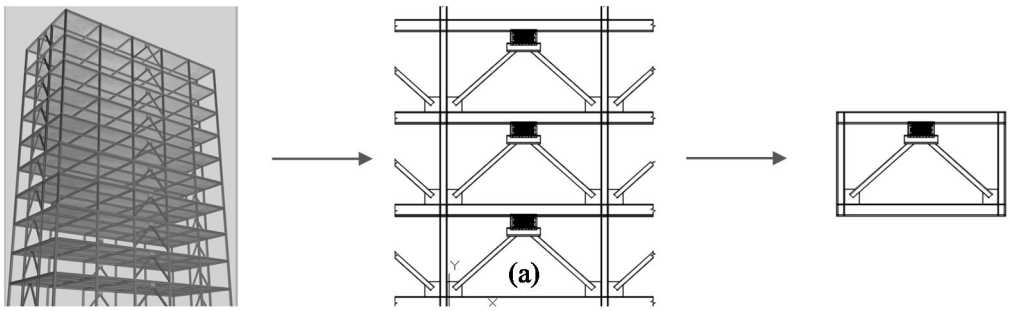
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu başlık altında, çalışma kapsamında tasarlanan deney elemanlarından, deney elemanlarının üretilmesinde kullanılan malzemeler ve özelliklerinden, deney elemanların detay ve üretimlerinden, deney düzeneği ve deneylerde kullanılan aletler ile numuneler üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışma aşamalarından bahsedilmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışmaların aşamaları ve bu kapsamda yapılan kabuller anlatılmaktadır.

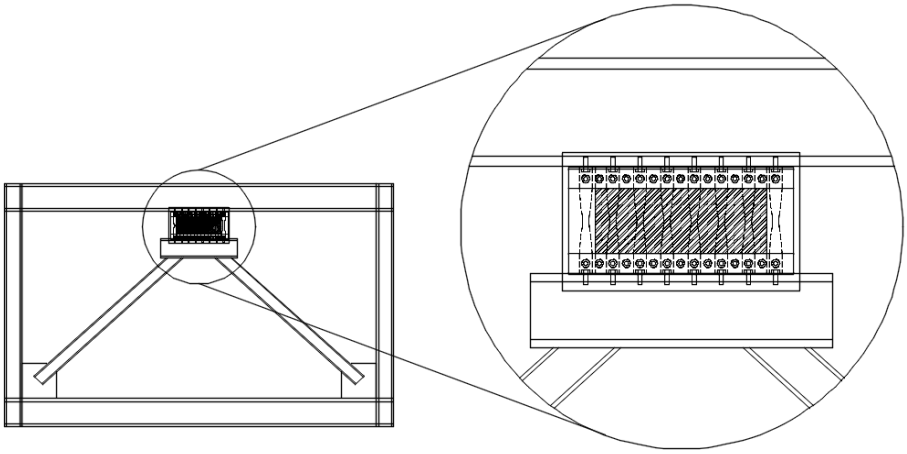
2.2. Deneylerde Kullanılan Elemanların Tasarımı, Üretimi ve Mekanik Özellikleri

Bu çalışma kapsamında, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi özellikle ters V çaprazlı çerçeve sistemlerde sönümleyici olarak kullanılabilecek modüler sönümleyicilerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubuklardan oluşan üç adet sönümleyici, konik şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubuklardan oluşan üç adet sönümleyici ve çelik plakalardan (ÇP) oluşan üç adet sönümleyici tasarlanmıştır. Ayrıca, KSDE çelik çubuklar ile çelik levhaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) ve iki bileşenli enerji sönümleyici tasarımındaki çelik çubukların yüzeyinin poliüretan elastomer dolgu oluşturulması ile kaplanarak üretilen üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) olmak üzere 11 adet sönümleyici tasarlanmıştır.



Şekil 2.1. ÜBES'in ters V çaprazlı çerçeve içerisindeki yerleşimi (a) ve birleşimin görünümü (b)

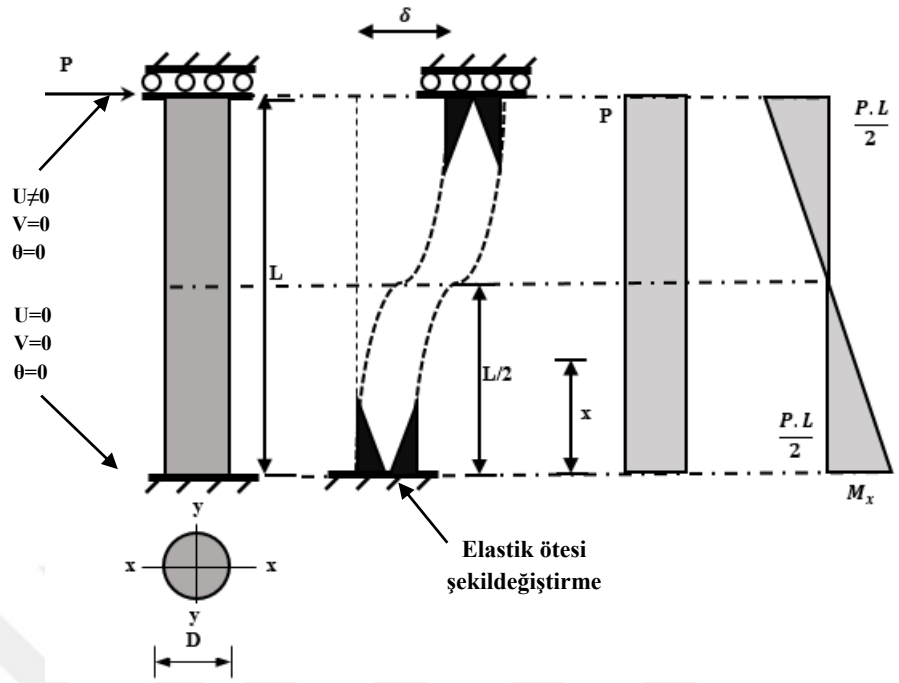
Şekil 2.1'in devamı



(b)

2.2.1. Deney Elemanlarında Kullanılan Çelik Çubukların Ön Boyutlandırılması ve Üretimi

Yapılarda kullanılan enerji sönümleme sistemlerinden metalik sönümleyicilerin tasarımında dikkate alınan en önemli parametre, yük etkisindeki yapı sistemine sönüm özelliği kazandıracak olan metal elemanlarda oluşan şekildeğiştirmelerin homojen ve olabildiğince eş zamanlı olarak gerçekleşmesinin sağlanmasıdır. Böylelikle kesitin tamamının sönümleme işlemine katkıda bulunması sağlanarak, eleman üzerinde oluşması muhtemel olan yerel hasarlar en aza indirilebilmektedir. Kesit boyunca şekildeğiştirmelerin homojen olarak yayılmasını sağlayacak olan tasarımın oluşturulabilmesi için sönümleyiciye sistem tarafından aktarılan yük miktarı ve elemanın yapı sistemine mesnetlenme durumu dikkate alınarak elde edilen kesme ve moment diyagramları yardımıyla en uygun geometrik form elde edilmelidir. Bu çalışmada kullanılan KSDE çelik çubukların tasarımında, bir ucu ankastre diğer ucunun ise dönmesi ($\theta=0$) ile düşey hareketi önlenmiş ($v=0$), yatay hareketine ise izin verilmiş ($u\neq0$) durumda elde edilen kesme kuvveti ve moment diyagramı dikkate alınmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Yatay yüke maruz dairesel kesitli bir çubuğun kesit tesir diyagramları

Yükleme esnasında, KSDE çelik çubuklarda oluşan şekildeğiştirmelerin homojen olarak dağılması ve enerjinin etkili bir biçimde sönümlenebilmesi için KSDE çelik çubukların yüzey formu, moment diyagramı dikkate alınarak belirlenmelidir. Çubuk tabanı ile orta yüksekliği (L/2) arasındaki farklı, x, mesafelerindeki moment değerlerini veren Denklem (2.1), Denklem (2.2)'de yerine yazıldığında elde edilen Denklem (2.3) yardımı ile çubuk tabanı ile orta yüksekliği (L/2) arasındaki farklı mesafelerdeki, x, enkesit çapları D(x) hesaplanabilmektedir. Denklem (2.1-5)'de, KSDE çelik çubuğun taban çapı D, çubuk boyu L, tasarımda kullanılan çeliğin akma dayanımı, σ_y, içi dolu dairesel kesitin mukavemet momenti, *W*, tek bir çubuğun geometrik formunun belirlenmesinde dikkate alınacak yük değeri ise P/n olarak ifade edilmektedir.

$$M(x) = \frac{P}{n}\left(\frac{L}{2} - x\right) \tag{2.1}$$

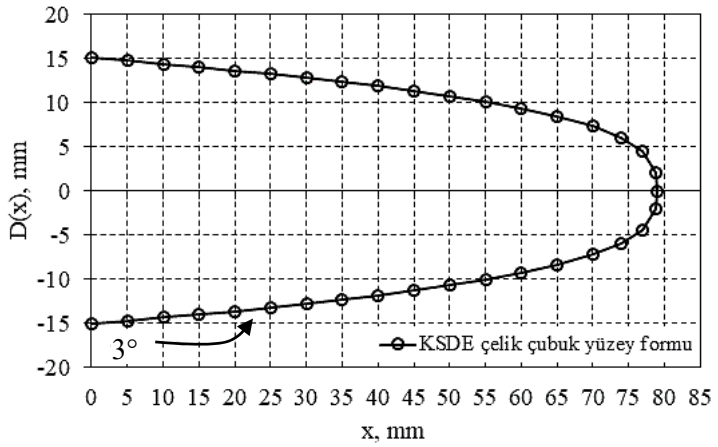
$$\frac{M(x)}{W} \le \sigma_y ; \qquad W = \frac{\pi D^3}{32} \tag{2.2}$$

$$\left(\frac{\frac{P}{n}(\frac{L}{2}-x)32}{\sigma_y \pi}\right)^{1/3} \leq D(x) \tag{2.3}$$

$$V(x) = \frac{P}{n} \tag{2.4}$$

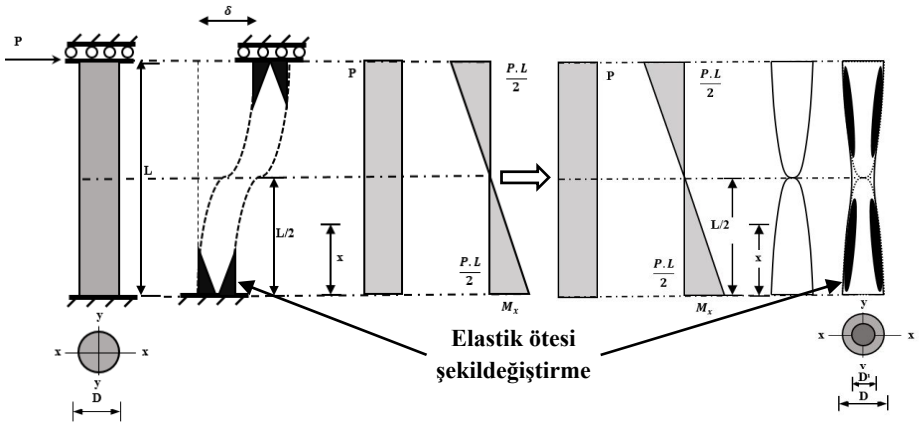
$$\left(\frac{\frac{P}{n}(\frac{L}{2}-x)32}{\sigma_y \pi}\right)^{1/3} = D(x) \tag{2.5}$$

Denklem (2.5) yardımıyla elde edilen çubuk yüzey formu, sadece moment etkisinin dikkate alındığı durumda çubuk orta yüksekliğindeki kesit çapının teorik olarak sıfır olduğu duruma aittir (bk. Şekil 2.2). Denklem (2.5) yardımıyla hesaplanan KSDE çelik çubuğun yüzey formunun sayısallaştırılırmış hali Şekil 2.3'te verilmektedir. Denklem (2.5)'den anlaşılacağı gibi elde edilen optimum yüzey formu üçüncü dereceden bir fonksiyondur.



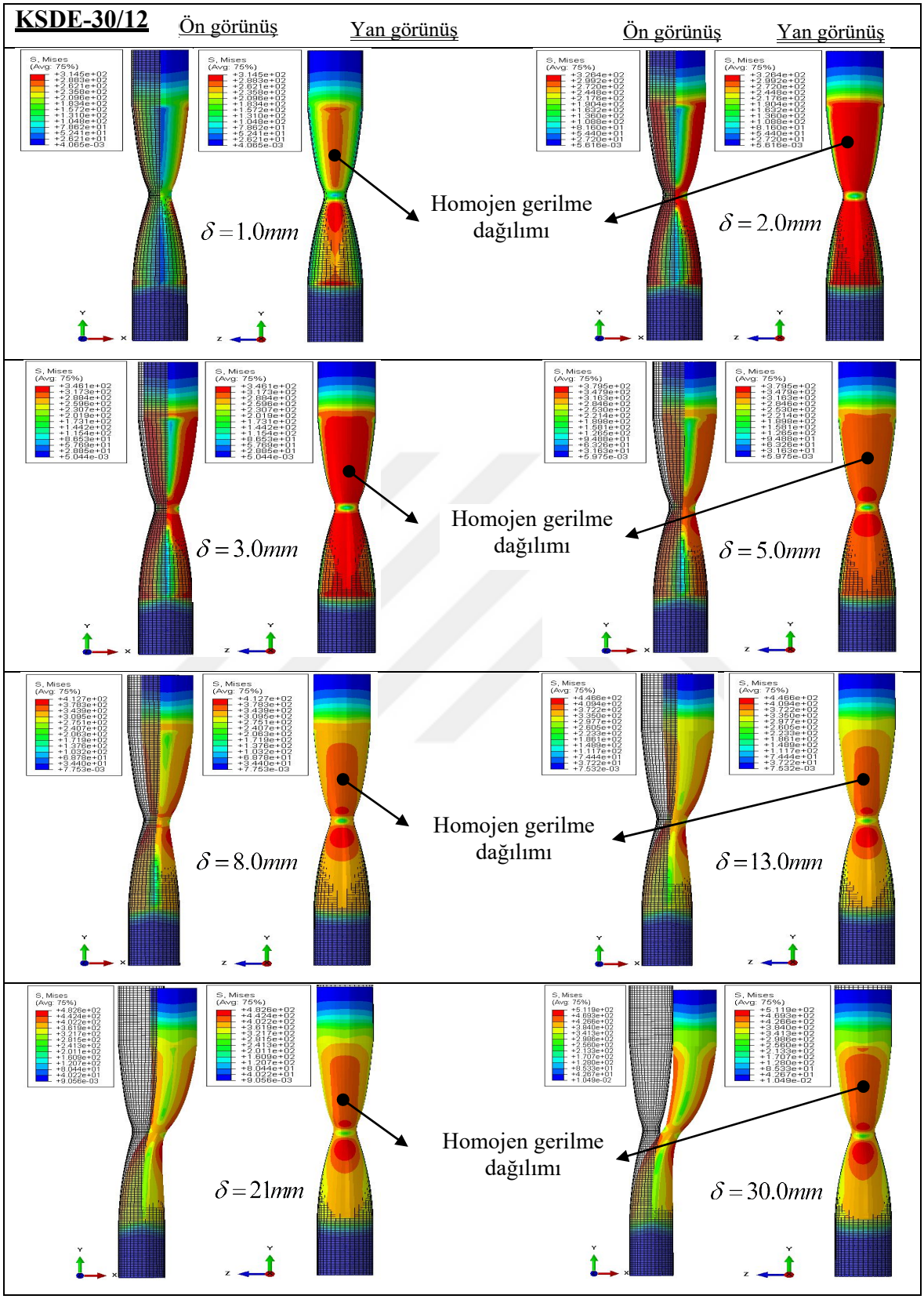
Şekil 2.3. KSDE çelik çubuğun yüzey formunun sayısallaştırılırmış hali

Yatay yükleme altındaki bir çubuğa moment etkisi ile beraber kesme kuvveti de etki edeceğinden, çubuk geometrisinin, kesme kuvvetleri etkisi dikkate alınarak çubuk yükseklik ortası çap değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi hem moment hem de kesme kuvveti etkisinin beraber dikkate alındığı durumda KSDE çelik çubuğun geometrik formu şematik olarak kum saati şeklini almaktadır.

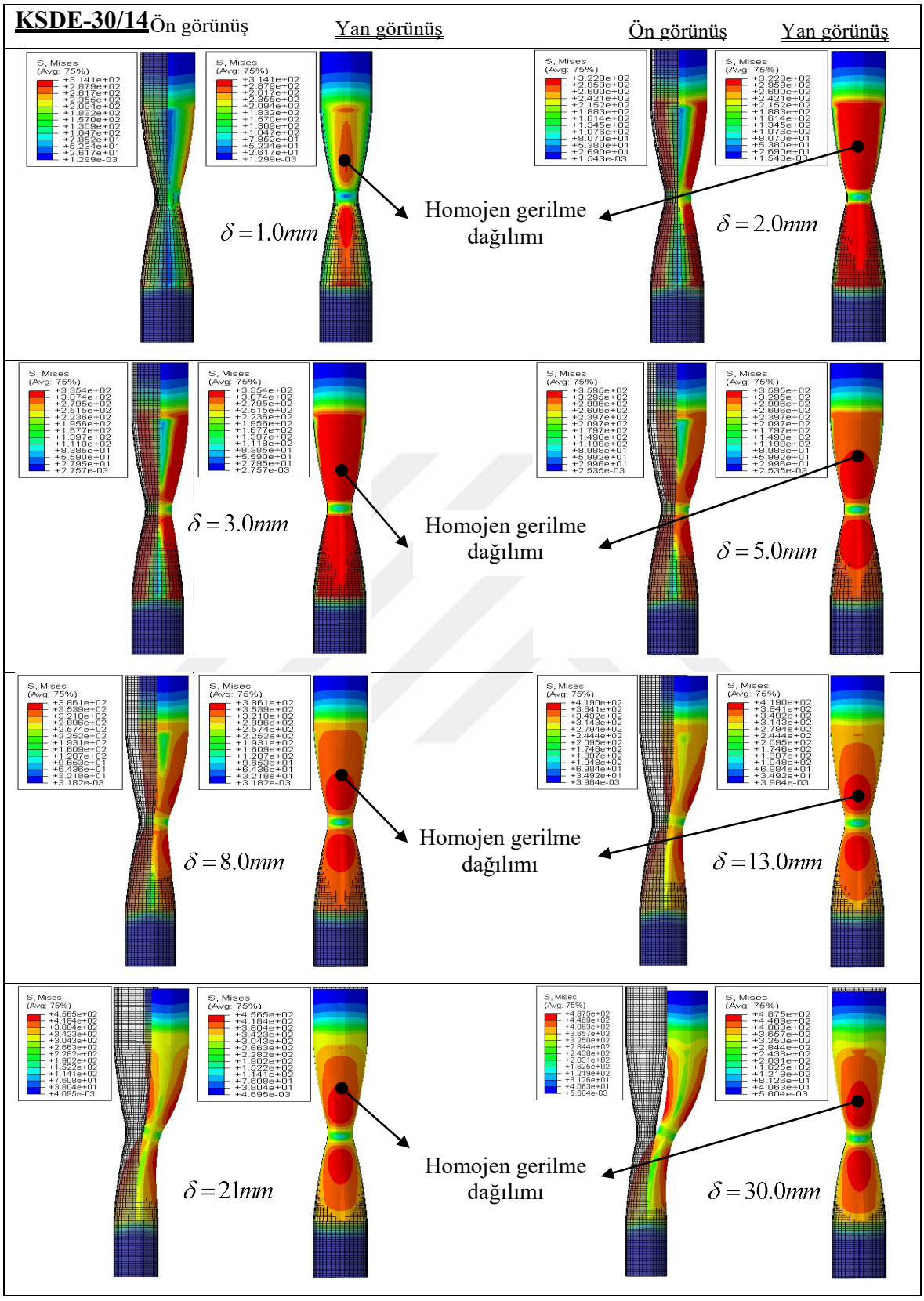


Şekil 2.4. Kesme kuvveti diyagramıyla güncellenen çubuk geometrisinin şematik gösterimi

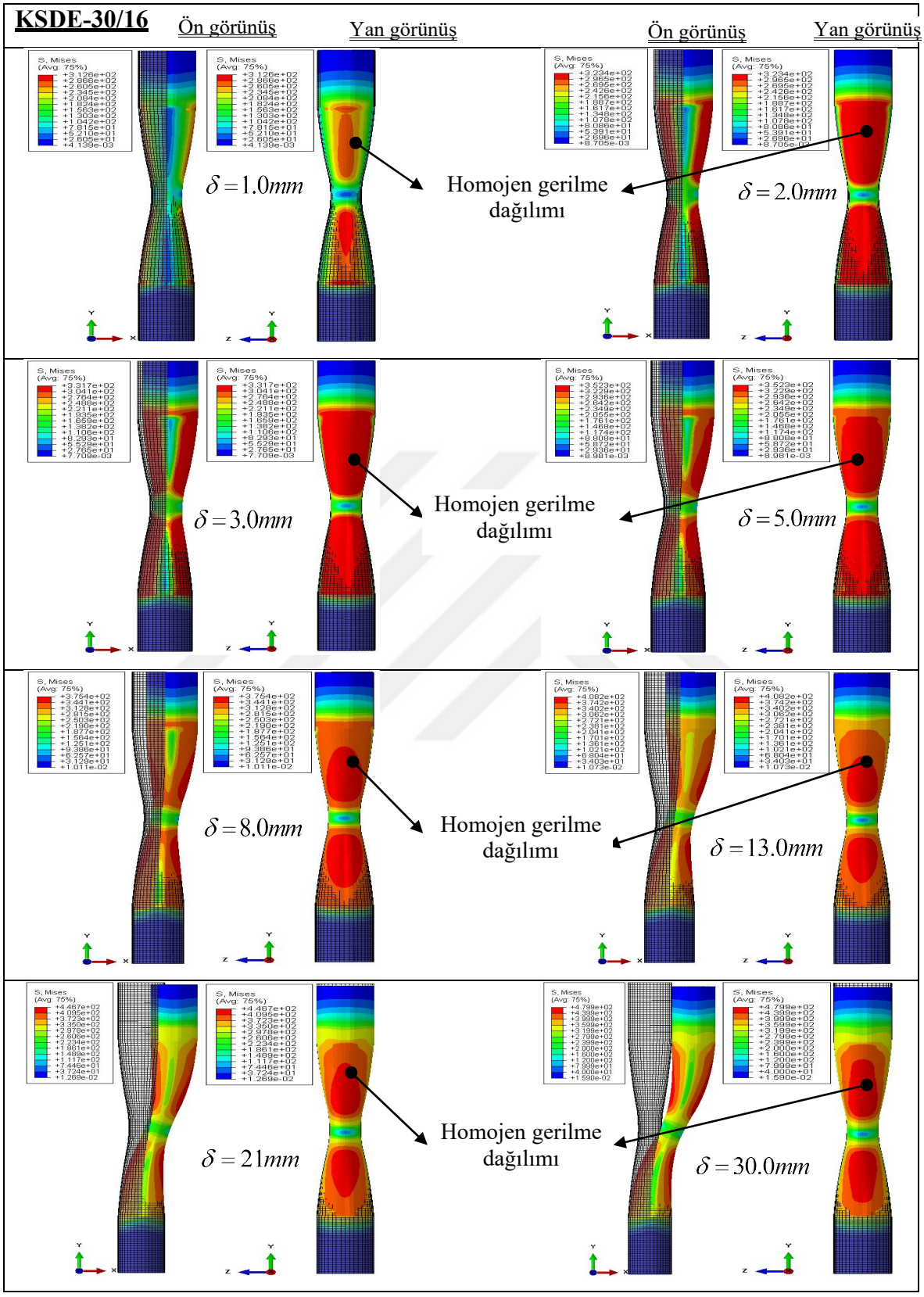
Elde edilen kum saati şekilli formun, kesme kuvvetleri etkisinde dayanımını kaybetmeden eğilme etkisiyle elastik ötesi şekildeğiştirme yaparak yeterli miktarlarda enerji sönümleyebilmesi için çubuk yüksekliği ortasındaki enkesit çapının (D^i) belirlenmesi gerekmektedir (bk. Şekil 2.4). Bu amaç doğrultusunda çubuk yükseklik ortası enkesit çaplarının belirlenmesinde ABAQUS 2017 yazılımı kullanılarak ön analizler gerçekleştirilmiştir. Ön analizlerde, tek bir KSDE çelik çubuğun statik itme yüklemesi altında akma yükü yaklaşık olarak 11.0 kN olacak şekilde (P/n=11.0 kN), taban çapı 30.0 mm ve mesnetler arası net yüksekliği 158.0 mm olan dairesel enkesitli çelik çubuk geometrisi esas alınmıştır. Analizler sonucunda, dayanım-süneklik dengesini sağlayan ve şekildeğiştirmelerin homojen olarak dağıldığı optimum çubuk yükseklik ortası çap değerleri 12.0 mm, 14.0 mm ve 16.0 mm olarak belirlenmiştir. Çubuk yükseklik ortası çap değerleri 12.0 mm, 14.0 mm ve 16.0 mm KSDE çelik çubukların gerilme dağılışları sırasıyla Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmektedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında KSDE çelik çubuklardan oluşan sönümleyicilere kıyasla üretim kolaylığı bakımından alternatif olabilecek konik şekilli dairesel enkesitli (KDE) çubukların, kullanıldığı sönümleyiciler de tasarlanmıştır. KDE çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici tasarımlarında çelik çubukların çubuk yükseklik ortası çap değerleri, KSDE çelik çubukların ön analizleri sonucu elde edilen çubuk yükseklik ortası çap değerleridir. Ön analizler sonucunda elde edilen çubuk yükseklik ortası çap değerlerine bağlı olarak boyutları belirlenen KSDE çelik çubukların ve aynı çubuk yükseklik ortası çap değerlerine sahip KDE çelik çubukların ölçüleri sırasıyla Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da verilmektedir.



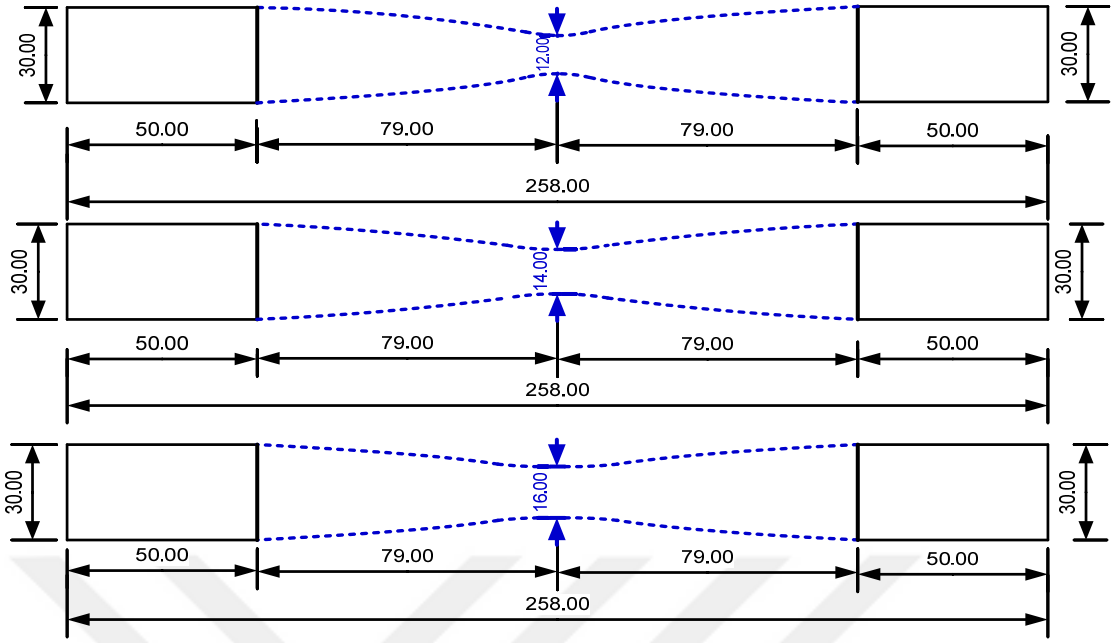
Şekil 2.5. Çubuk yükseklik ortası çap değeri 12 mm olan KSDE çelik çubuğun gerilme dağılımları



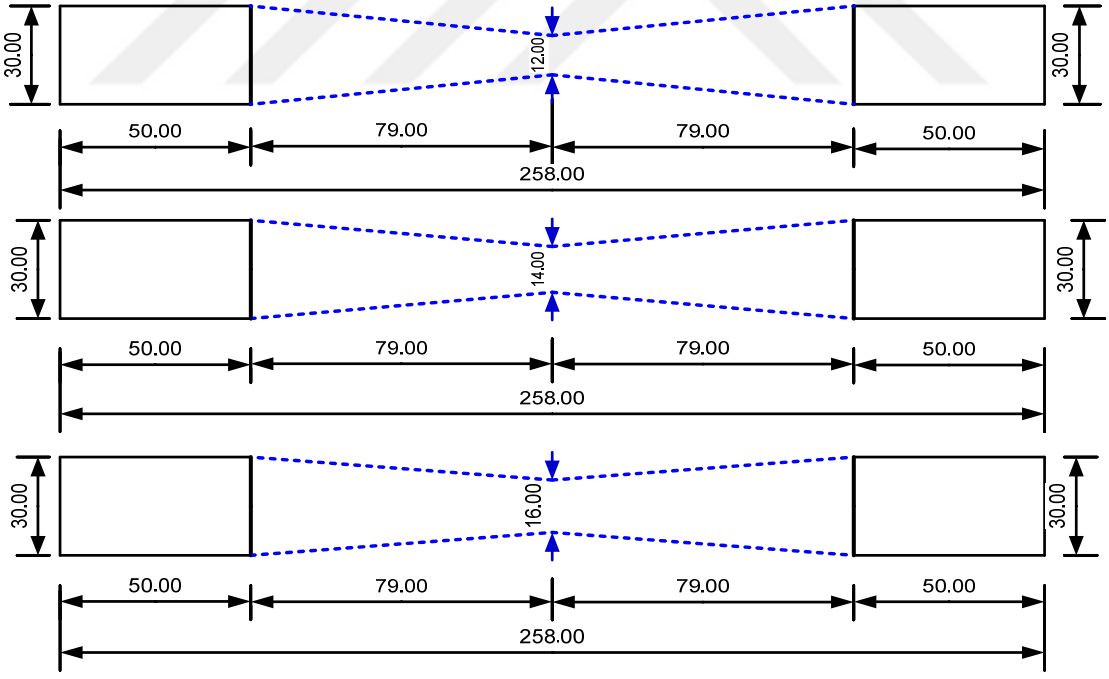
Şekil 2.6. Çubuk yükseklik ortası çap değeri 14 mm olan KSDE çelik çubuğun gerilme dağılımları



Şekil 2.7. Çubuk yükseklik ortası çap değeri 16 mm olan KSDE çelik çubuğun gerilme dağılımları

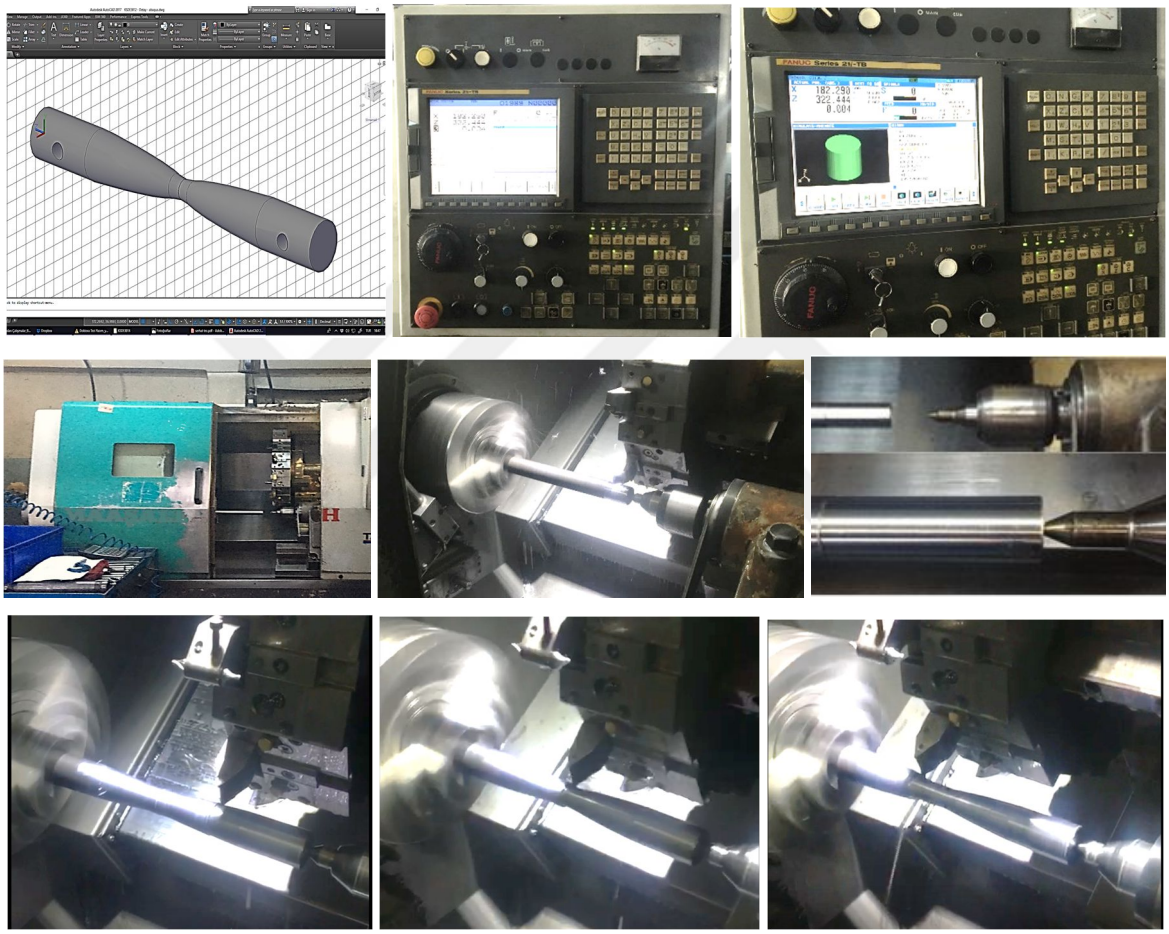


Şekil 2.8. KSDE çelik çubukların geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir)



Şekil 2.9. KDE çelik çubukların geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir)

Ön analizler sonucunda boyutları belirlenen KSDE ve KDE çelik çubuklar, bilgisayar destekli tasarım programı ortamına aktarılarak sayısallaştırılmış ve üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Üç boyutlu modeller yardımıyla kum saati ve konik şekilli çubuklar, S235JR sınıfı çelikten, yeterli uzunluktaki ve nominal çapı 32 mm olan dolu profillerden, CNC (Computer Numerical Control) makinesinde işlenerek üretilmiştir. KSDE ve KDE çelik çubukların üretim aşamalarına ait görünümler Şekil 2.10'da verilmektedir.



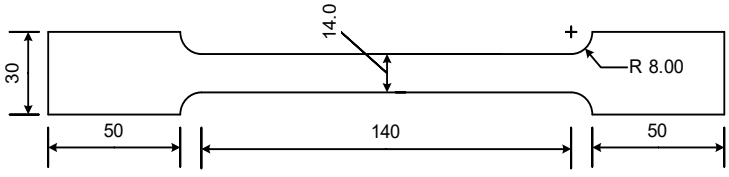
Şekil 2.10. KSDE ve KDE çelik çubukların CNC makinasında üretim aşamaları

Üretilen çubukların hem dairesel yuvalı bloklara mesnetlenmesini hem de dairesel yuvalı çelik blokların deney düzeneğine bağlantısını oluşturan köşebentler ile beraber çalışmasını sağlayacak olan cıvataların yerleşimini temin etmek amacıyla +0.75 mm toleranslı 10 mm çapında delikler açılarak KSDE ve KDE çelik çubuklar deneysel çalışmalara hazır hale getirilmiştir. Her bir seri için 8 adet olmak üzere çelik çubuklar

üretilmiş ve numaralandırılmıştır. KSDE ve KDE çelik çubukların montaja hazır hali Şekil 2.11'de verilmektedir.

Şekil 2.11. KSDE ve KDE çelik çubukların montaja hazır hali

KSDE ve KDE sönümleyici çelik çubukların üretiminde kullanılan S235JR sınıfı çeliğin mekanik özellikleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında, ASTM A370 standartlarına uygun olarak üretilen 3 adet test numunesi üzerinde gerçekleştirilen eksenel çekme testleri ile belirlenmiştir (Şekil 2.12).

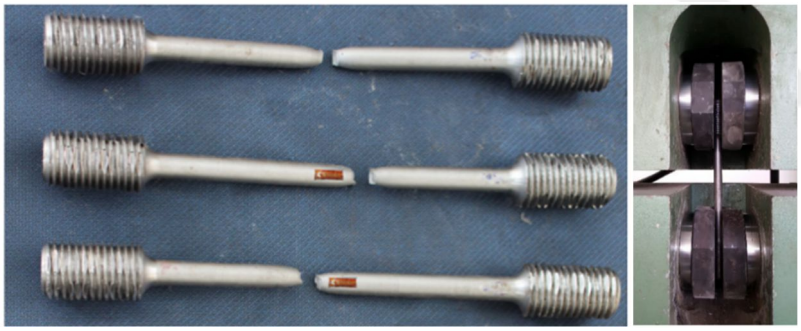


Şekil 2.12. Çekme deneyi numunelerinin geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir)

Çeliğin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenmesi amacıyla üretilen numuneler Şekil 2.13'te verilmiştir.

Şekil 2.13. Çekme deneyleri için üretilen numuneler

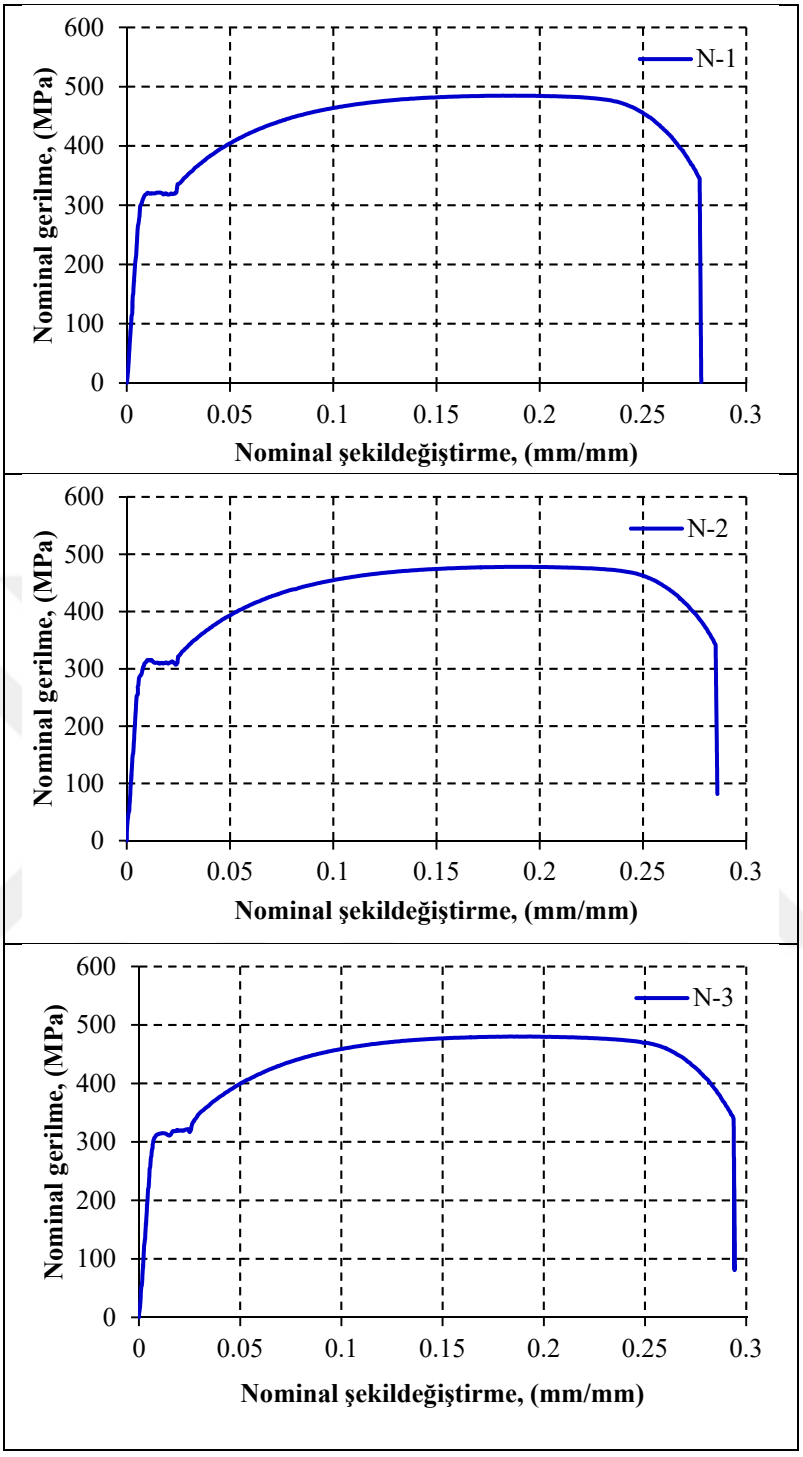
Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda numunelerinin görünüşleri Şekil 2.14'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.1'de özetlenmiş ve gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ise Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.14. Çekme deneyi sonrası çekme numunelerinin görünüşleri

Tablo 2.1. Çekme çubuklarının mekanik özellikleri

Çekme numuneleri		Elastisite Modülü (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Nihai nominal şekildeğiştirme (mm/mm)
Dairesel enkesitli çekme çubukları	N-1	-	310.10	485.12	0.28
	N-2	185482.352	315.32	478.29	0.285
	N-3	187117.647	318.12	480.37	0.295
	Ortalama	**186299.9**	**314.51**	**481.26**	**0.286**



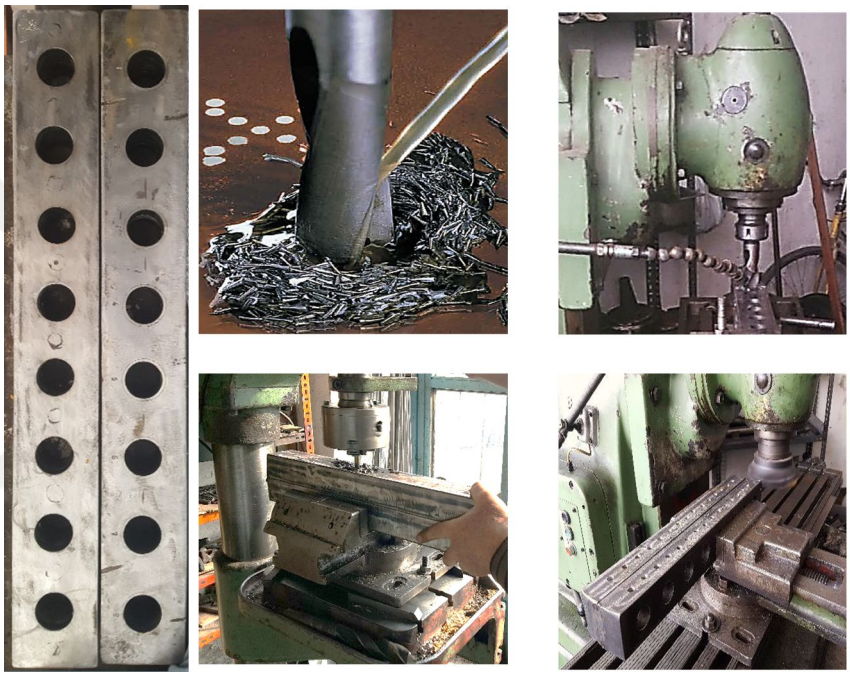
Şekil 2.15. Çekme numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

2.2.2. Deney Elemanlarında Kullanılan Dairesel Yuvalı Çelik Bloklar ve Plakalar

KSDE ve KDE çelik çubukların mesnetleneceği dairesel yuvalı alt ve üst çelik bloklar, çevrimsel yükleme süresince KSDE ve KDE çelik çubukların yerleştiği yuvalarda hasarların

oluşmaması dolayısıyla da önerilen sönümleyici tasarımlarında başlangıç rijitliklerinde birleşimden kaynaklı azalmalarının oluşmaması amacıyla yüksek dayanımlı Hardoks 450 sınıfı aşınma ve sürtünmeye karşı dirençli çelikten üretilmiştir.

Dairesel yuvalı çelik bloklar, 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik bloklara merkezleri arasındaki mesafe 65.0 mm ve nominal çapı 30.0 mm olacak şekilde +0.75 mm toleranslı 50.0 mm derinliğinde 8 adet dairesel yuva açılarak hazırlanmıştır. Şekil 2.16'da dairesel yuvalı çelik blokların üretim aşamalarına ait görünümler verilmiştir.

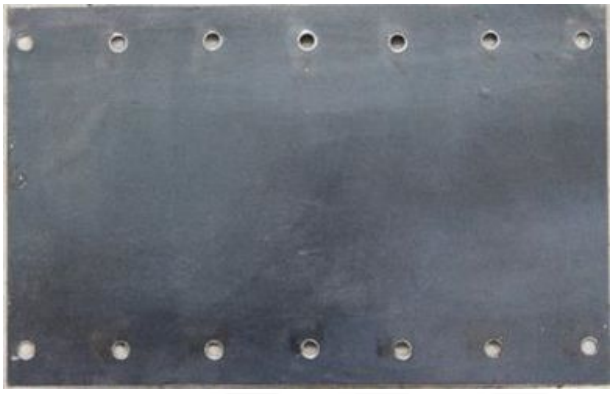


Şekil 2.16. Dairesel yuvalı alt ve üst çelik blokların üretim aşamaları

Çelik çubukların mesnetlenmesinin sağlanması amacıyla çelik bloklara açılan dairesel yuvalara dik doğrultuda, KSDE ve KDE çelik çubuklarına açılan nominal çapı 10 mm olan +0.75 mm toleranslı deliklerle eşleşecek şekilde, 8 adet 10 mm çapında +0.75mm toleranslı delikler açılmıştır. Açılan deliklere ek olarak, sönümleyici tasarımlarının deney düzeneğine sabitlenmesini sağlayacak şekilde köşebentlerle olan bağlantısını oluşturmak amacıyla 7 adet +0.75 mm toleranslı 10 mm çapında delikler açılmıştır. Böylelikle dairesel yuvalı çelik bloklar deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir.

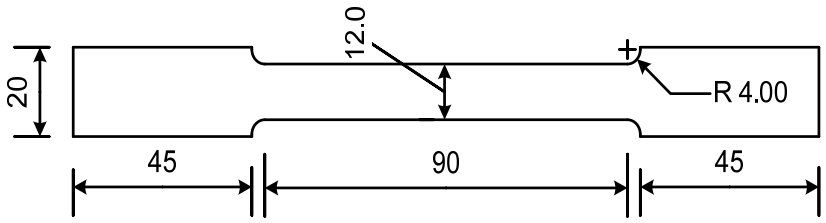
Çelik plakaların üretimi, montajlanacağı alt ve üst dairesel yuvalı çelik bloklara, köşebentlere ve deney düzeneğine uygun olarak yapılmıştır. Çelik plakaların kullanıldığı tüm sönümleyici tasarımlarında 2 adet plaka kullanılmış ve tasarıma simetrik olarak

yerleştirilmiştir. Her bir çelik plakaya alt ve üstte 7 adet olmak üzere +0.75 mm toleranslı 10 mm çapında 14 adet delik açılmıştır (Şekil 2.17).



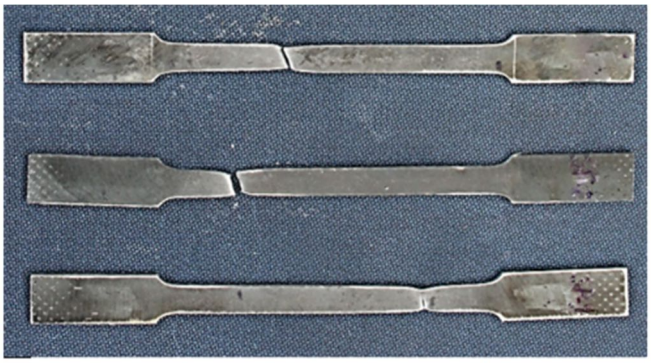
Şekil 2.17. Çelik plakalara açılan bağlantı deliklerinin konumu

Çelik plakaların üretiminde kullanılan S235JR sınıfı çeliğin mekanik özellikleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında, ASTM A370 standartlarına uygun olarak üretilen 9 adet test numunesi üzerinde gerçekleştirilen eksenel çekme testleri ile belirlenmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Çekme deneyi numunelerinin geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir)

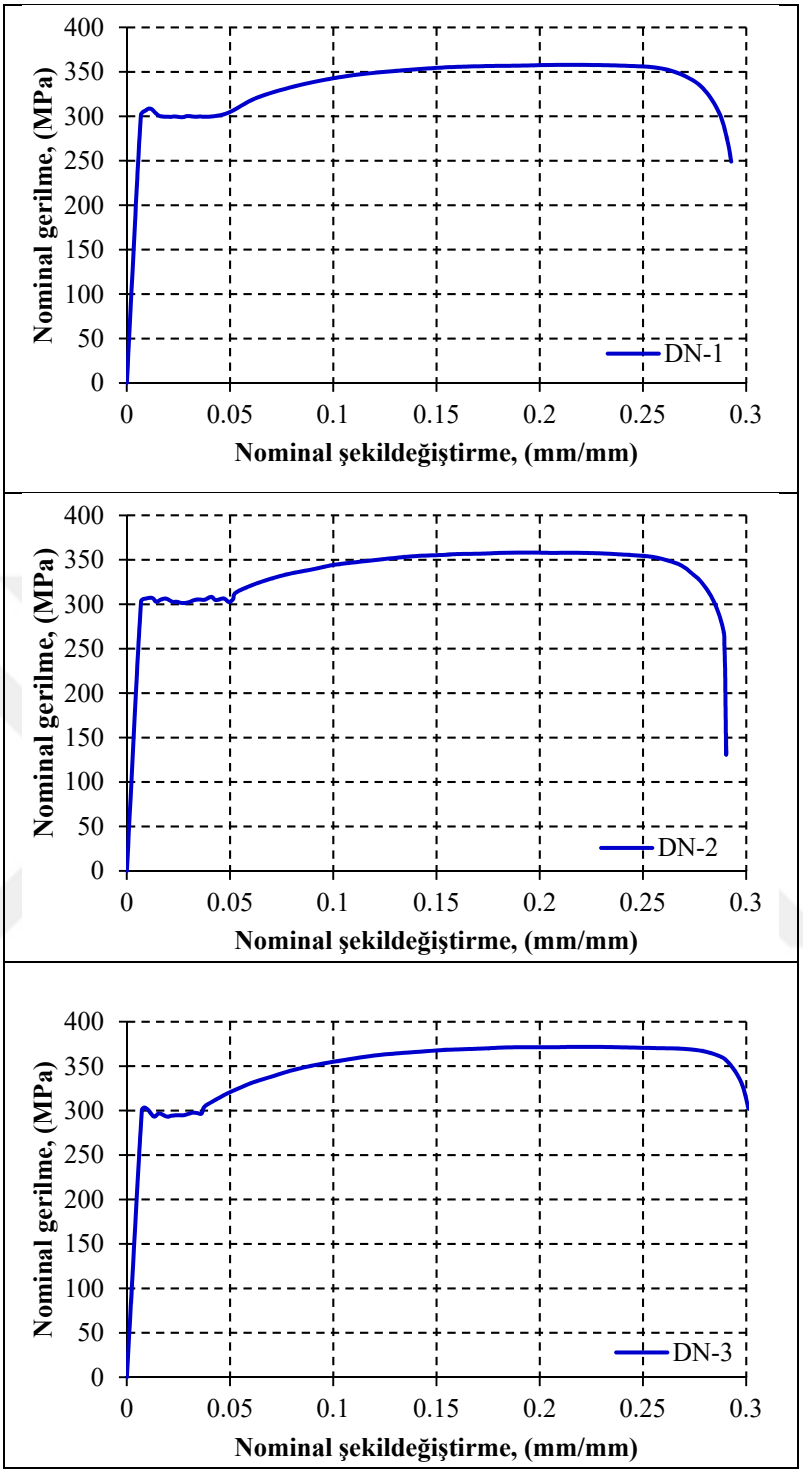
Çekme numunelerine örnek olarak, nominal kalınlığı 2.00 mm olan numenlerin çekme deneyleri sonucundaki görünüşleri Şekil 2.19'da, gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ise Şekil 2.20'de verilmiştir. Tüm çekme numunelerinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.2'de özetlenmiştir.



Şekil 2.19. Çekme deneyi sonrası çekme numunelerinin görünüşleri

Tablo 2.2. Çekme çubuklarının mekanik özellikleri

	Nominal kalınlık(mm)	Çekme numunesi	Numune kalınlığı (mm)	Elastisite Modülü (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Nihai nominal şekildeğiştirme (mm/mm)
Dikdörtgen kesitli çekme çubukları	1.50	DN-1	1.48	192826	301.076	357.82	0.292
		DN-2	1.50	-	303.029	358.1	0.29
		DN-3	1.49	-	301.41	371.63	0.3
	2.00	DN-1	2.00	198824	302.076	357.82	0.292
		DN-2	1.98	-	303.029	358.1	0.29
		DN-3	1.97	195618	298.021	371.63	0.3
	2.50	DN-1	2.48	-	302.51	360.42	0.313
		DN-2	2.50	192125	291.17	363.19	0.307
		DN-3	2.51	190587	313.107	361.87	0.287
	Ortalama			**193996**	**301.7**	**362.3**	**0.296**

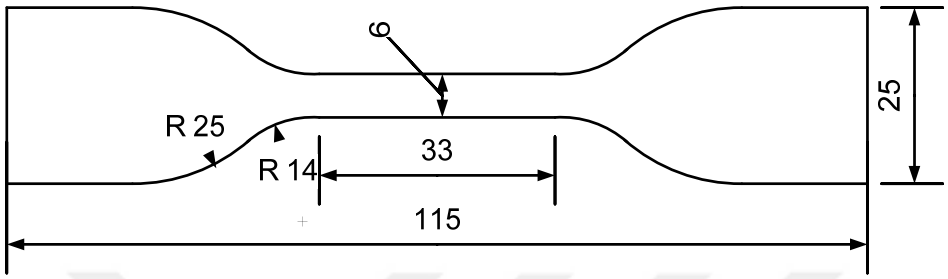


Şekil 2.20. Çekme numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

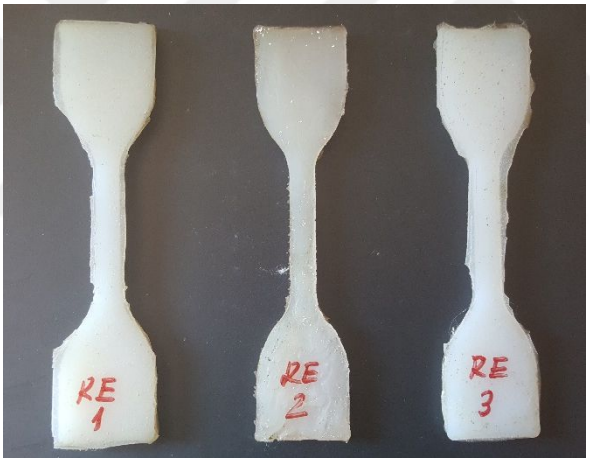
2.2.3. Poliüretan Elastomer Malzemenin Mekanik Özellikleri

Bu çalışma kapsamında, üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) tasarımında kullanılan poliüretan elastomer malzemenin mekanik özellikleri Karadeniz Teknik

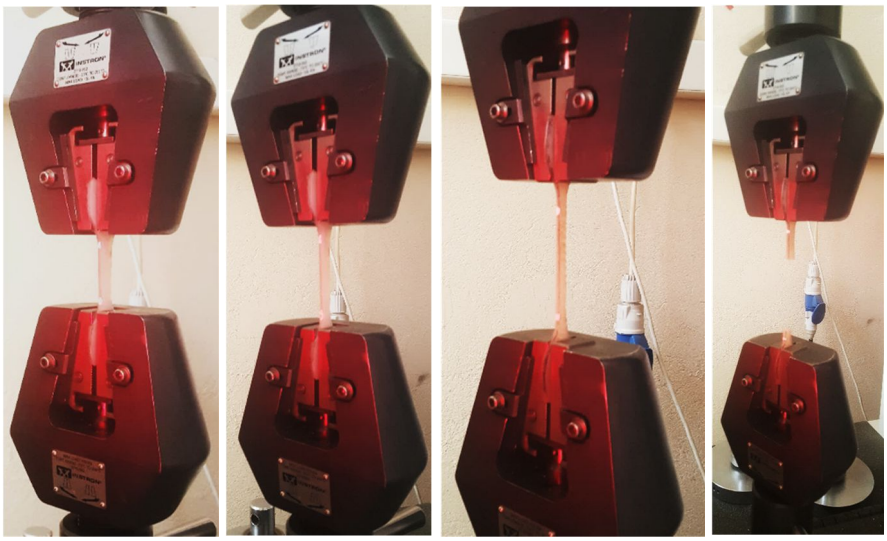
Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında, ASTM D412 standartlarına uygun olarak üretilen 3 adet test numunesi üzerinde, 20-25 °C sıcaklık değerleri arasındaki ortam koşullarında, eksenel çekme testleri yapılmıştır (Şekil 2.21-22). Çekme numunelerinin deneyler esnasındaki görünüşleri Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.21. 2.50 mm kalınlığında poliüretan elastomer malzemeden üretilen eksenel çekme testi numunesi (Ölçüler mm'dir)

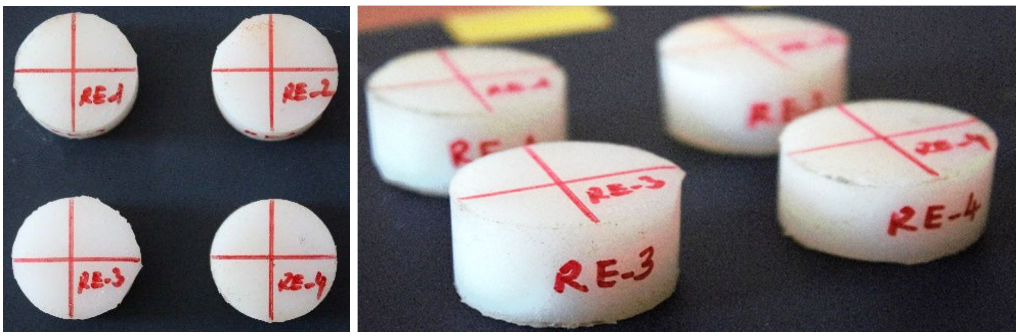


Şekil 2.22. Çekme deneyleri için üretilen numuneler



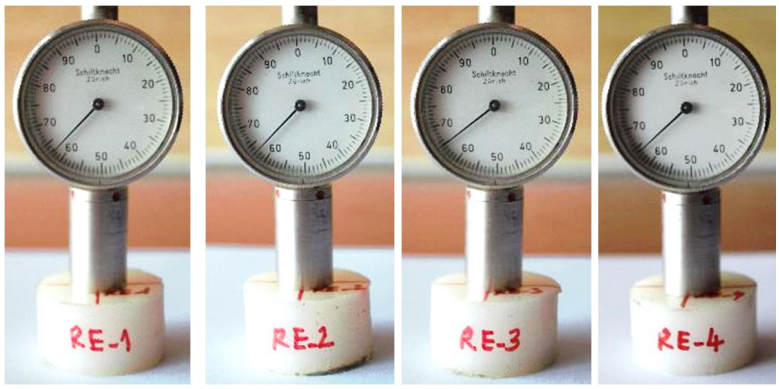
Şekil 2.23. Poliüretan elastomer malzemenin eksenel çekme altında mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Ayrıca, ASTM D395 standartlarına uygun 4 adet test numunesi üzerinde basınç testleri ve ASTM D2240 standartlarına uygun 4 adet test numunesi üzerinde ise sertlik testleri (Tip-A) yapılmıştır (Şekil 2.24).

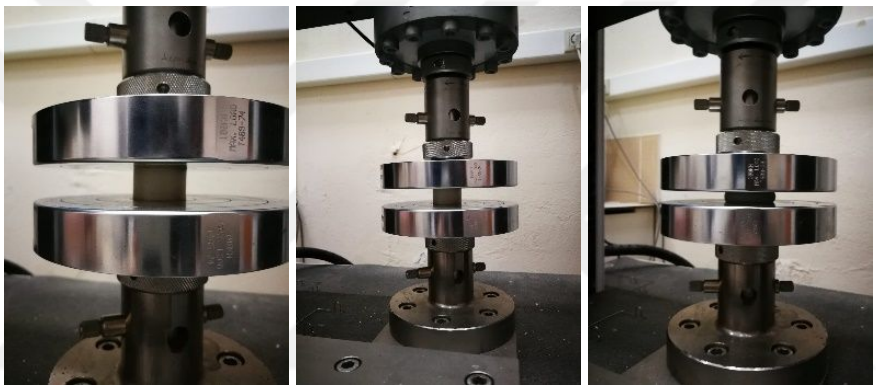


Şekil 2.24. Basınç dayanımının ve sertlik değerinin belirlenmesi için üretilen numuneler

Sertlik ve basınç dayanımı belirleme deneyleri esnasında numunelerinin görünüşleri Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.3'te özetlenmiş ve gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ise Şekil 2.27'de verilmiştir.



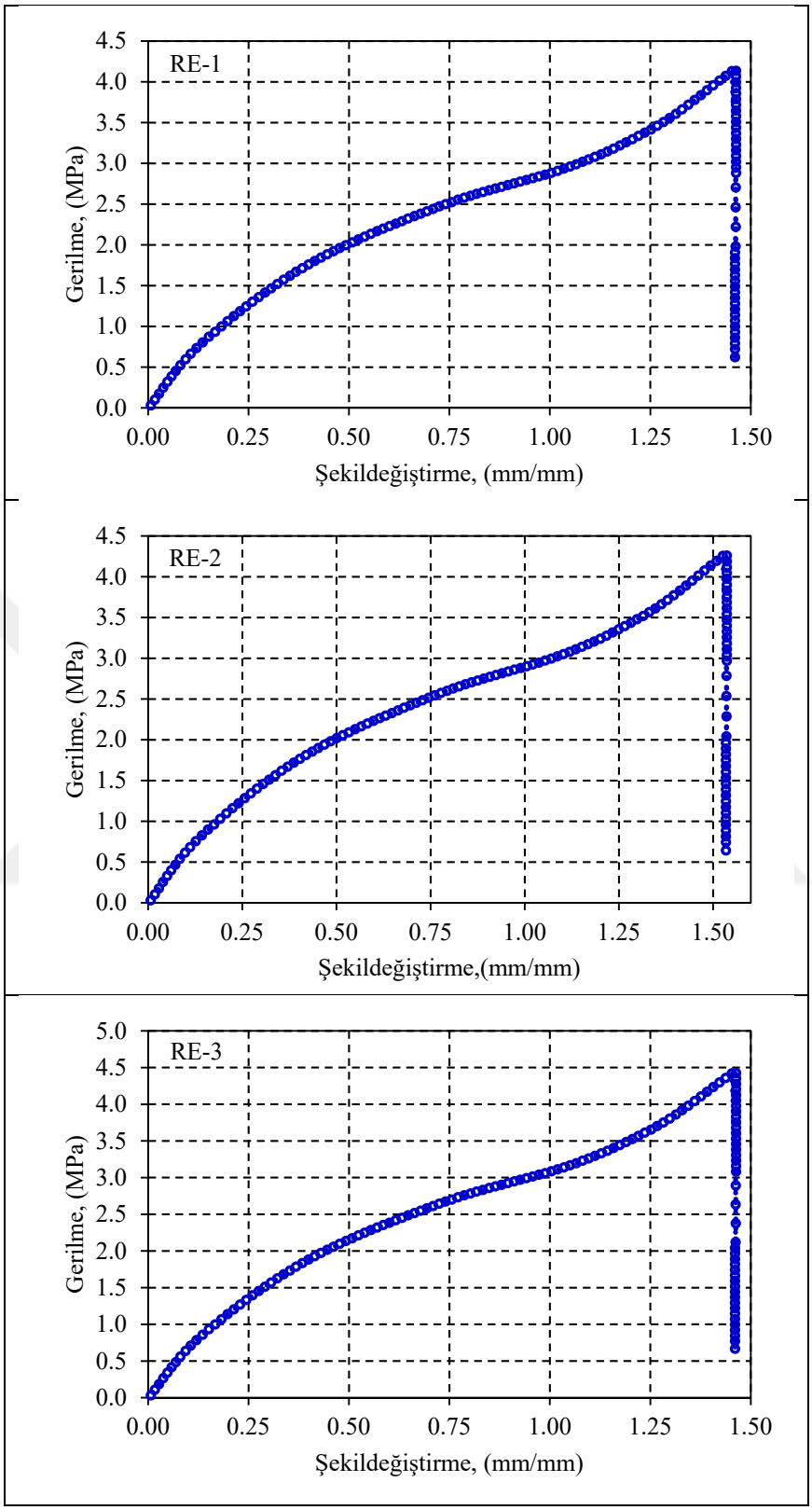
Şekil 2.25. Poliüretan elastomer malzemenin sertlik değerinin belirlenmesi



Şekil 2.26. Poliüretan elastomer malzemenin eksenel basınç altında mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Tablo 2.3. Poliüretan elastomer malzemenin mekanik özellikleri

Çekme numuneleri		Sertlik değeri (Tip-A Sertliği)	Basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Nihai nominal şekildeğiştirme (mm/mm)
Poliüretan elastomer test numunesi	RE-1	63	-	4.135	1.46
	RE-2	63	42.02	4.259	1.53
	RE-3	65	44.44	4.425	1.48
	RE-4	64	46.00	-	-
	Ortalama	**63.75**	**44.21**	**4.273**	**1.487**



Şekil 2.27. Çekme numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

2.2.4. Deney Elemanlarının Özellikleri

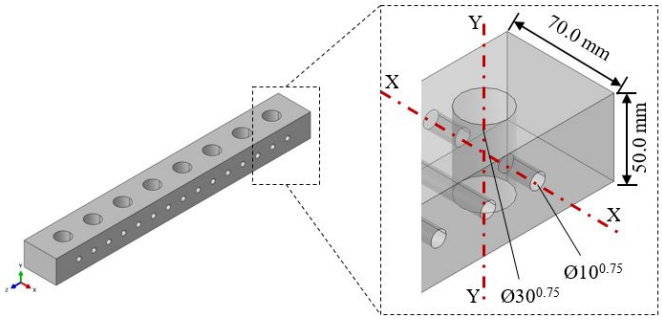
2.2.4.1. KSDE ve KDE Çelik Çubukların Kullanıldığı Sönümleyiciler

Çalışma kapsamında KSDE çelik çubukların kullanıldığı 3 adet ve KDE çelik çubukların kullanıldığı 3 adet olmak üzere 6 adet sönümleyici deney elemanı tasarlanmıştır (Tablo 2.4).

Tablo 2.4. KSDE ve KDE çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici tasarımları

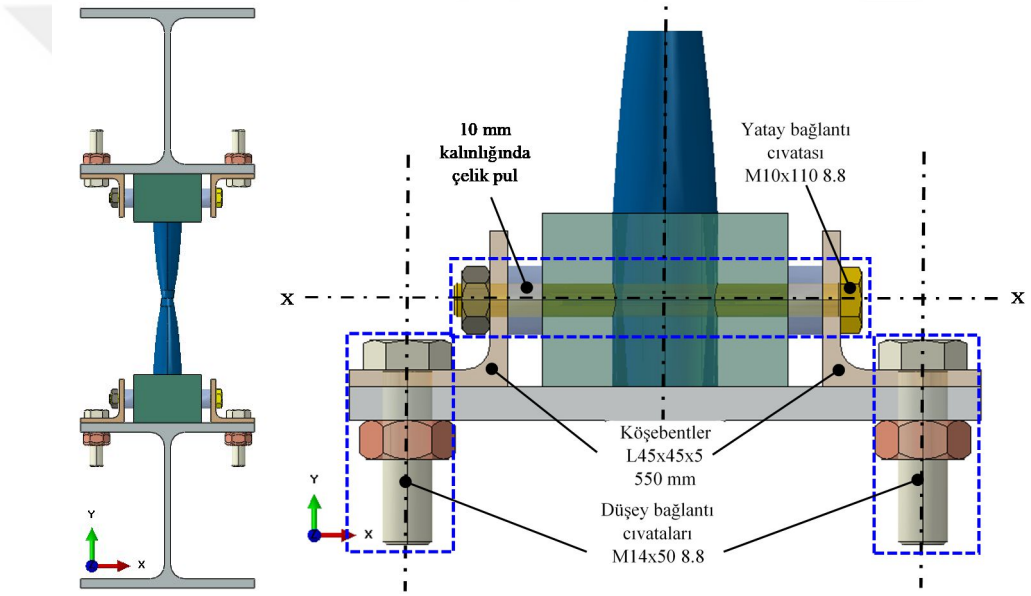
Sönümleyici tipi	Çelik çubuk tipi	Çubuğun net yüksekliği (mm)	Çubuğun tapan çapı (mm)	Çubuğun yükseklik ortası enkesit çapı(mm)
S-KSDE-1	**KSDE**	158	30	**12**
S-KSDE-2	**KSDE**	158	30	**14**
S-KSDE-3	**KSDE**	158	30	**16**
S-KDE-1	**KDE**	158	30	**12**
S-KDE-2	**KDE**	158	30	**14**
S-KDE-3	**KDE**	158	30	**16**

Bu sönümleyici tasarımları temel olarak 8 adet çelik çubuktan ve çelik çubukların mesnetlendiği dairesel yuvalı çelik bloklardan oluşmaktadır. Yatay yükleme etkisinde, şekildeğiştirmelerin kesit boyunca homojen olarak dağılmasını sağlayacak şekilde ön boyutlandırma yapılarak geometrisi ve yüzey formu belirlenen KSDE çelik çubuklar ve KSDE çelik çubuklara üretim kolaylığı açısından alternatifi olan KDE çelik çubuklar 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik bloklara merkezleri arasındaki mesafe 65.0 mm ve nominal çapı 30.0 mm olacak şekilde +0.75 mm toleranslı 50.0 mm derinliğinde açılan 8 adet dairesel yuvaya alıştırılmıştır (Şekil 2.28).



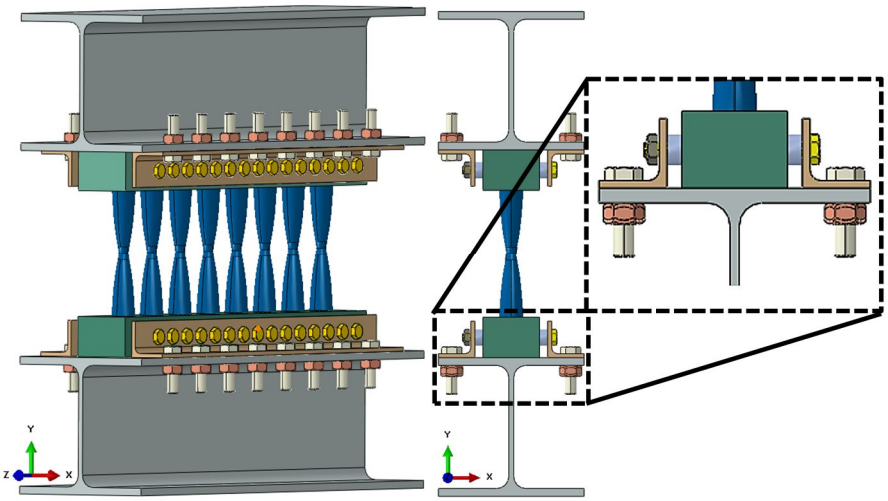
Şekil 2.28. Dairesel yuvalı çelik bloğun detaylı şematik görünümü

KSDE ve KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara bağlantısı, sönümleyici çelik çubukların yerleştiği dairesel yuvalara dik doğrultuda (x-x) açılan nominal çapı 10 mm olan +0.75 mm toleranslı 70 mm derinliğinde açılan deliklere geçirilen M10x110 8.8 kalitesinde cıvatalar ile sağlanmıştır (Şekil 2.29). Dairesel yuvalı çelik bloklar ise deney düzeneğine 4 adet L45x45x5 mm boyutlarındaki köşebentler ile M14x50 8.8 kalitesinde cıvatalar ile sağlanmıştır. Şekil 2.29'de görüldüğü gibi köşebentler ile çelik blokların arasına yerleştirilen ve (x-x) ekseninde bağlantıyı sağlayacak olan M10x110 8.8 kalitesinde cıvatalara 10 mm kalınlığında çelik pullar geçirilerek süreklilik sağlanmış ve bağlantılar kararlı hale getirilmiştir.

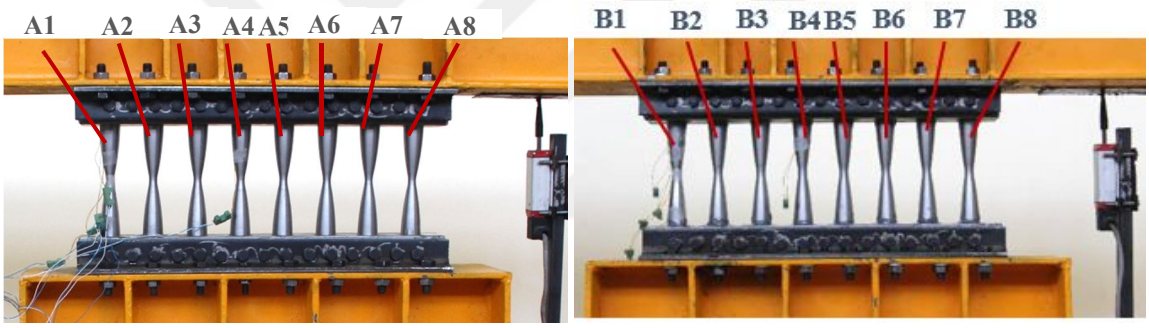


Şekil 2.29. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü

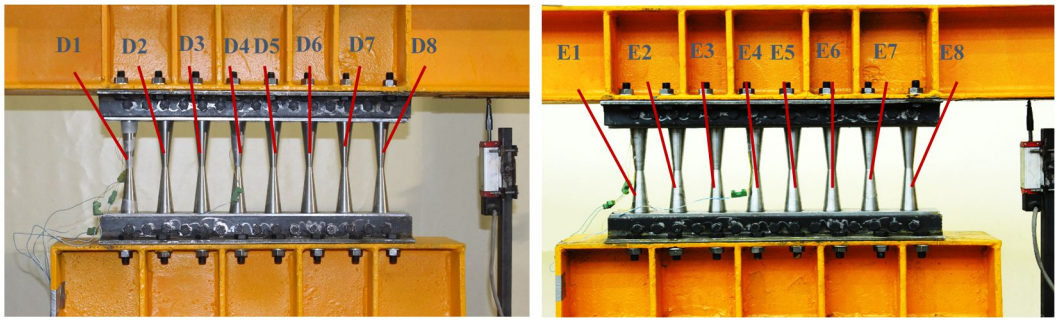
KSDE ve KDE çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici tasarımlarına örnek olarak S-KSDE-1 tasarımının bağlantı elemanları ile deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümü Şekil 2.30'da, KSDE ve KDE çelik çubuklar kullanılarak üretilen sönümleyicilerin deneye hazır halinin görünümleri Şekil 2.31 ve Şekil 2.32'de verilmektedir. KSDE ve KDE çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici tasarımlarına örnek olarak S-KSDE-1 deney elemanının montaja hazır halinin detaylı teknik çizimleri ise Şekil 2.33'de verilmektedir.



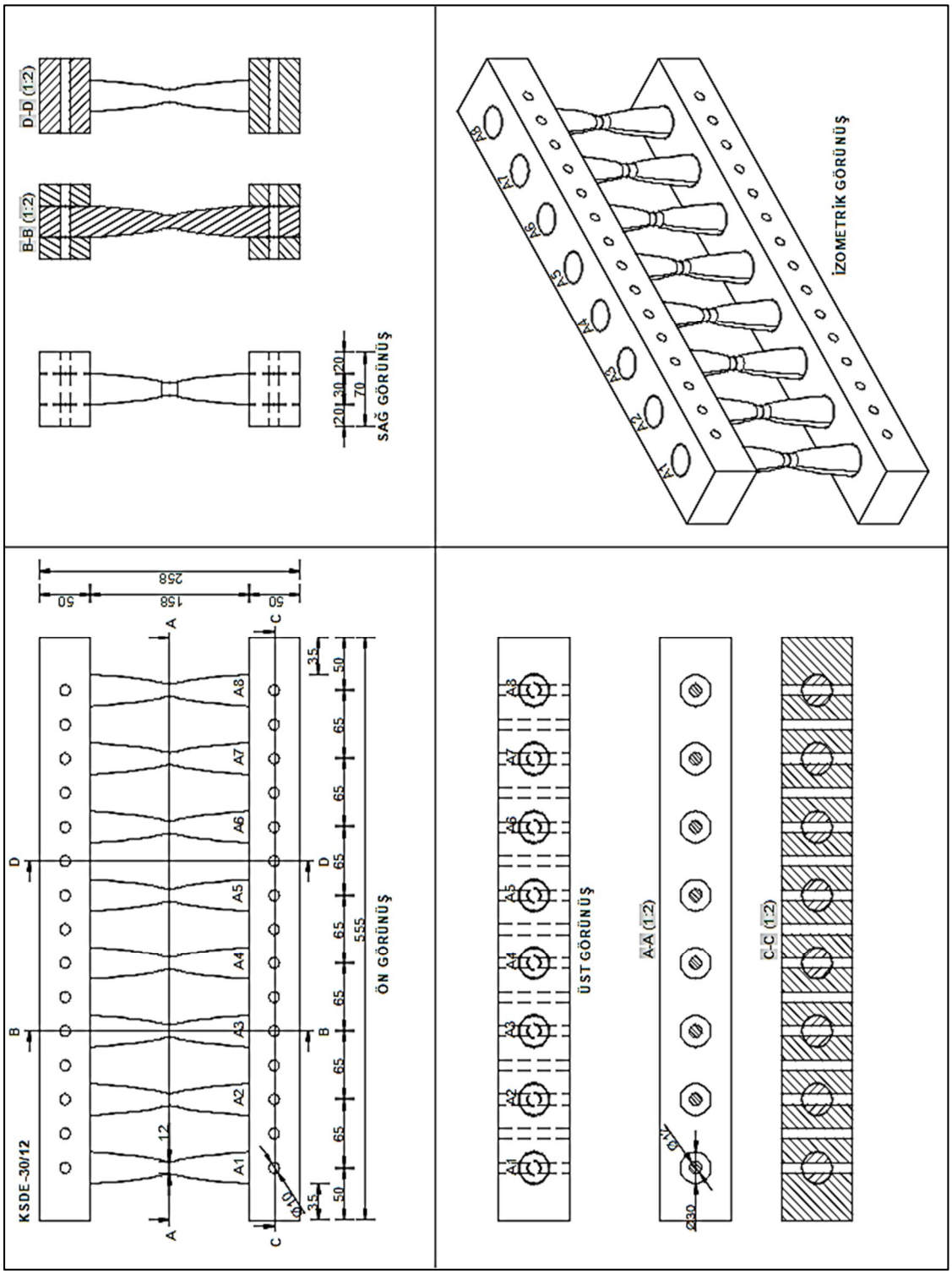
Şekil 2.30. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümleri



Şekil 2.31. KSDE çelik çubuklardan oluşan sönümleyici tasarımlarının deneysel çalışmaya hazır hali (S-KSDE-1, S-KSDE-2)



Şekil 2.32. KDE çelik çubuklardan oluşan sönümleyici tasarımlarının deneysel çalışmaya hazır hali (S-KDE-1, S-KDE-2)



Şekil 2.33. S-KSDE-1'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir)

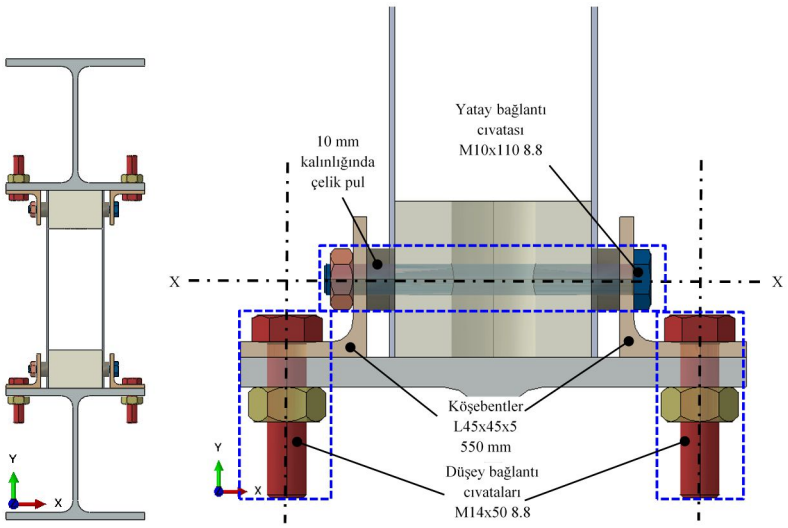
2.2.4.2. Çelik Plakaların (ÇP) Kullanıldığı Sönümleyiciler

Çalışma kapsamında, çelik plakaların kullanıldığı 3 adet sönümleyici deney elemanı tasarlanmıştır (Tablo 2.5). Bu sönümleyici tasarımları, 2 adet çelik plakanın ve çelik plakaların mesnetlendiği dairesel yuvalı çelik bloklardan oluşmaktadır. Çelik plakalar 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik blok ile L45x45x5 mm boyutlarındaki bağlantı köşebentleri arasına simetrik şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.34).

Tablo 2.5. Çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici tasarımları

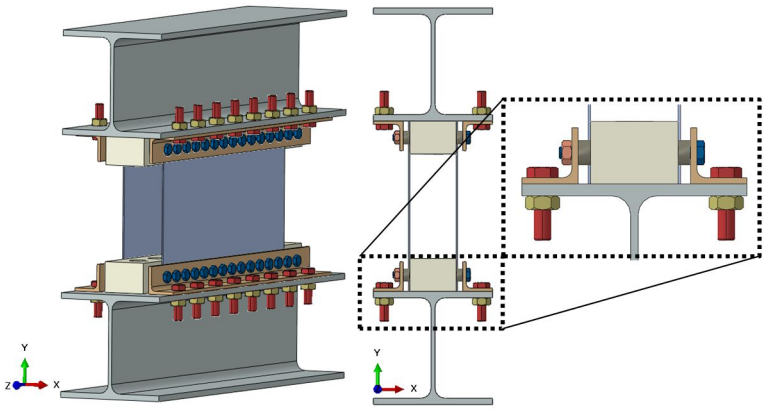
Sönümleyici tipi	Plakanın net yüksekliği (mm)	Plakanın genişliği (mm)	Plakanın nominal kalınlığı (mm)
S-ÇP-1	258	410	**1.50**
S-ÇP-2	258	410	**2.00**
S-ÇP-3	258	410	**2.50**

Şekil 2.34'de görüldüğü gibi köşebentler ile çelik blokların arasına yerleştirilen çelik plakaların bağlantısı, çelik bloklardaki dairesel yuvalara dik doğrultuda (x-x) açılan nominal çapı 10 mm olan +0.75 mm toleranslı 70 mm derinliğinde açılan deliklere geçirilen M10x110 8.8 kalitesinde cıvatalar ile sağlanmıştır. Parçalar arası sürekliliğin sağlanması ve deney elemanın kararlı hale getirilmesi amacıyla uygun kalınlıktaki çelik pullar (x-x) ekseninde bağlantıyı sağlayacak olan M10x110 8.8 kalitesinde cıvatalara geçirilmiştir (bk. Şekil 2.34).

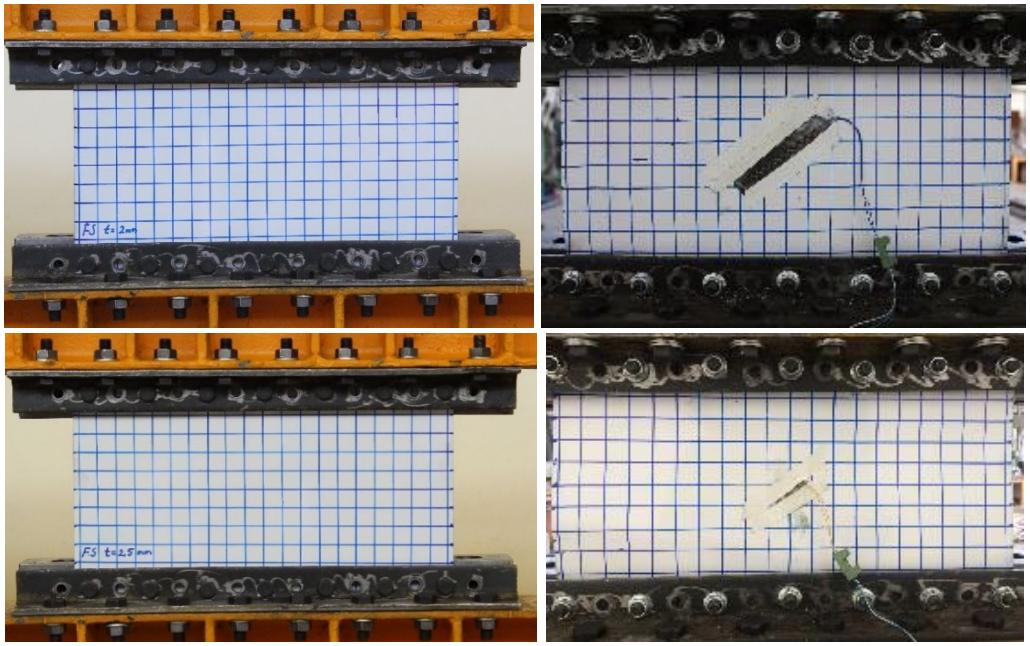


Şekil 2.34. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü

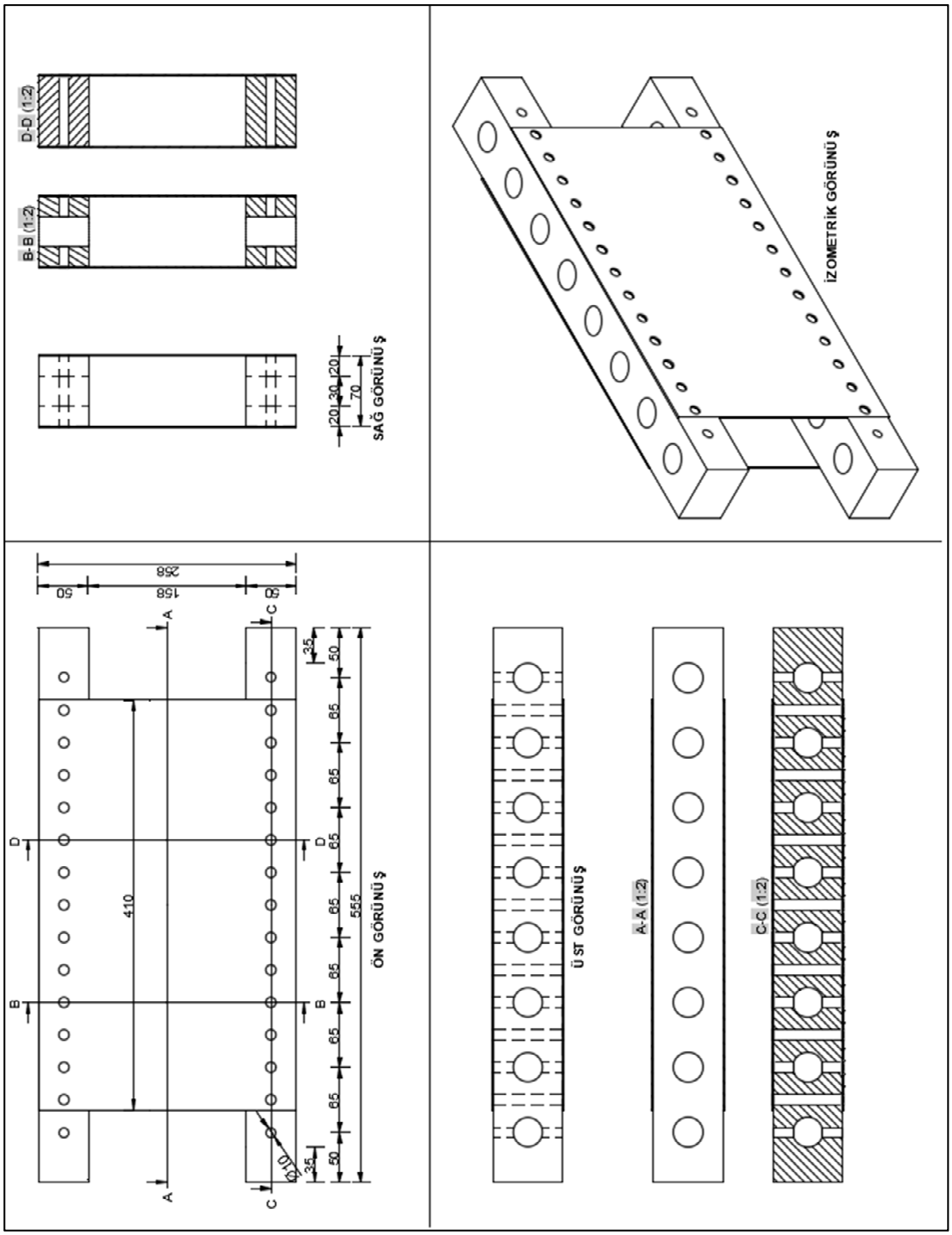
Çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici tasarımlarına örnek olarak S-ÇP-1 tasarımının bağlantı elemanları ile deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümü Şekil 2.35'de, çelik plakaların kullanılarak üretilen sönümleyicilerin deneye hazır halinin görünümleri Şekil 2.36'da verilmiştir. Çelik plakaların kullanıldığı sönümleyicilere örnek olarak S-ÇP-1 deney elemanının montaja hazır halinin detaylı teknik çizimleri ise Şekil 2.37'de verilmektedir.



Şekil 2.35. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümleri



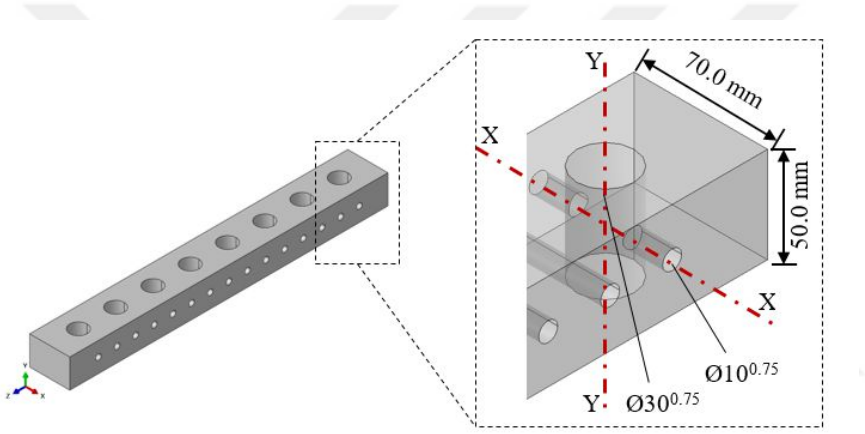
Şekil 2.36. Çelik plakalardan oluşan sönümleyici tasarımlarının deneysel çalışmaya hazır hali (S-ÇP-2, S-ÇP-3)



Şekil 2.37. S-ÇP-1'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir)

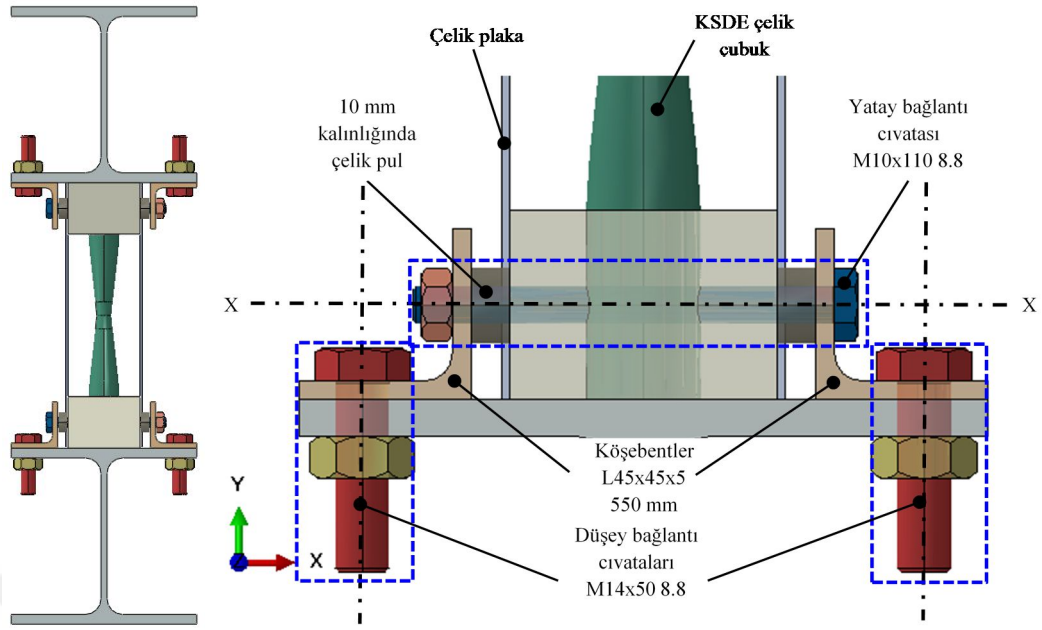
2.2.4.3. İki Bileşenli Enerji Sönümleyici (İBES)

Çalışma kapsamında, KSDE çelik çubukların ve çelik plakaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici deney elemanı tasarlanmıştır. Bu sönümleyici tasarımında 8 adet KSDE-30/16 çelik çubuk ve 2 adet 2.50 mm kalınlığında çelik plaka kullanılmıştır. Yatay yükleme etkisinde, şekildeğiştirmelerin kesit boyunca homojen olarak dağılmasını sağlayacak şekilde ön boyutlandırma yapılarak geometrisi ve yüzey formu belirlenen KSDE çelik çubuklar 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik bloklara merkezleri arasındaki mesafe 65.0 mm ve nominal çapı 30.0 mm olacak şekilde +0.75 mm toleranslı 50.0 mm derinliğinde açılan 8 adet dairesel yuvaya alıştırılmıştır (Şekil 2.38).



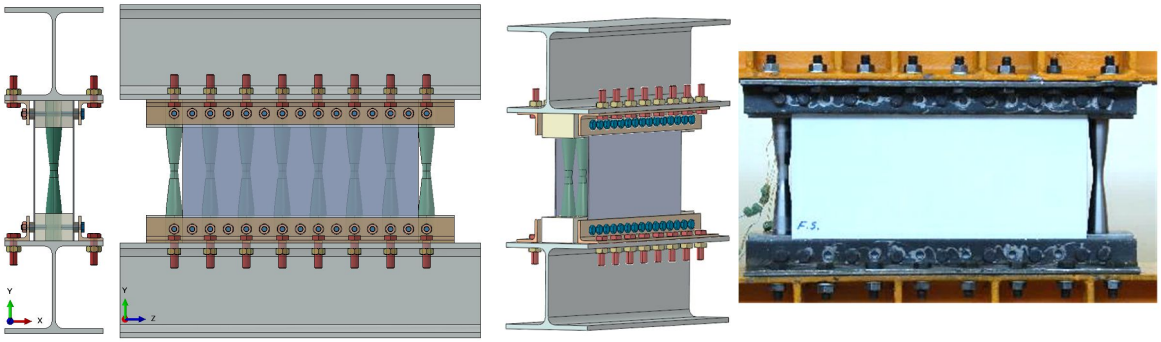
Şekil 2.38. Dairesel yuvalı çelik bloğun detaylı şematik görünümü

Çelik plakalar ise 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik blok ile L45x45x5 mm boyutlarındaki bağlantı köşebentleri arasına simetrik şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.39). KSDE çelik çubukların ve çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara bağlantısı, sönümleyici çelik çubukların yerleştiği dairesel yuvalara dik doğrultuda (x-x) açılan nominal çapı 10 mm olan +0.75 mm toleranslı 70 mm derinliğindeki deliklere geçirilen M10x110 8.8 kalitesinde cıvatalar ile sağlanmıştır. Dairesel yuvalı çelik bloklar ise deney düzeneğine 4 adet L45x45x5 mm boyutlarındaki köşebentler ve M14x50 8.8 kalitesinde cıvatalar ile sağlanmıştır (Şekil 2.39). Şekil 2.39'da görüldüğü gibi çelik plakalar ile bağlantı köşebentlerinin arasına 10 mm kalınlığında çelik pullar yerleştirilmiştir. Böylelikle parçalar arası süreklilik sağlanmış ve bağlantılar kararlı hale getirilmiştir.



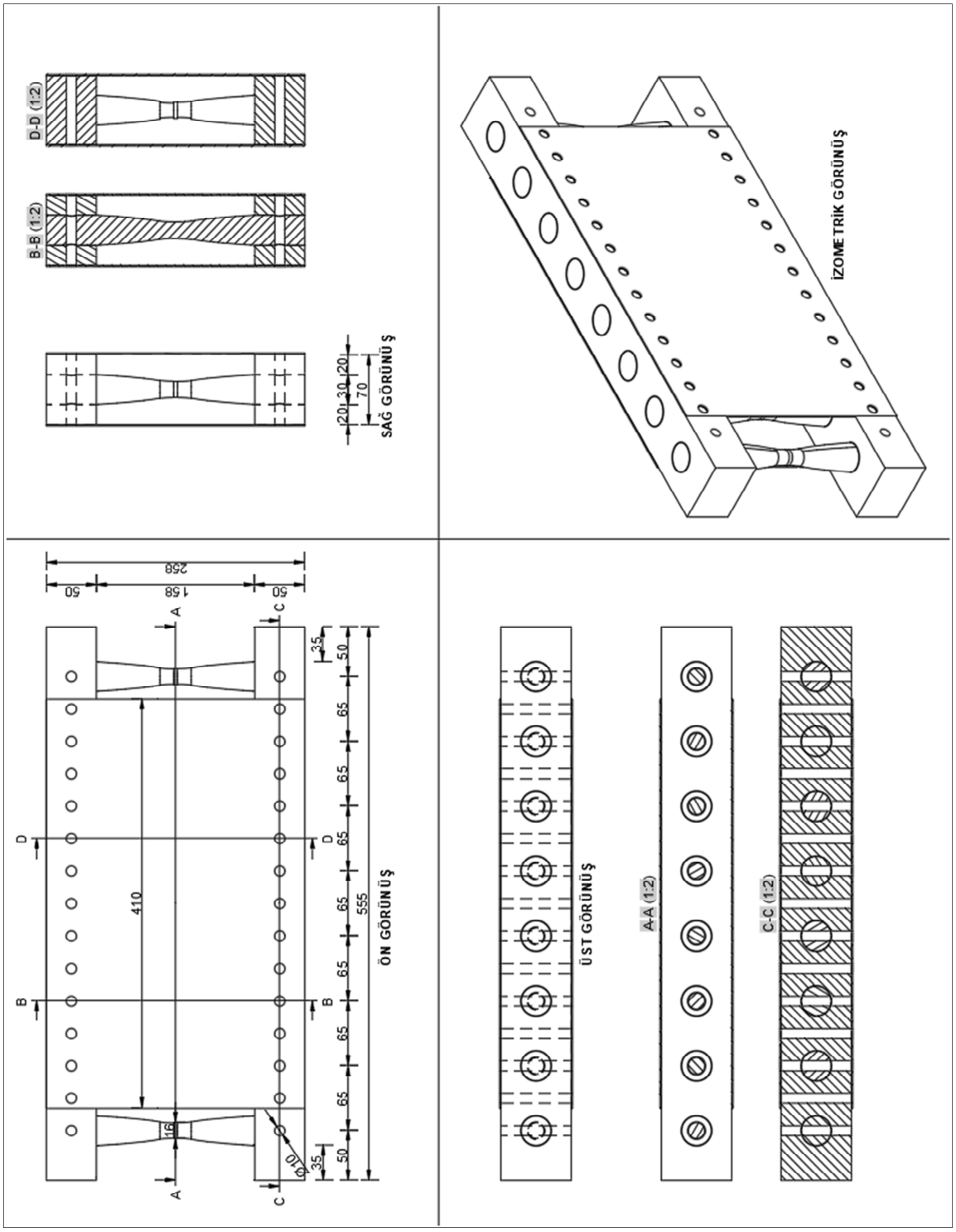
Şekil 2.39. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü

İBES deney elemanının bağlantı elemanları ile deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümü Şekil 2.40-(a)'da, deneye hazır halinin görünümleri Şekil 2.40-(b)'de verilmiştir. Tasarımın montaja hazır halinin detaylı teknik çizimleri ise Şekil 2.41'de verilmektedir.



(a) (b)

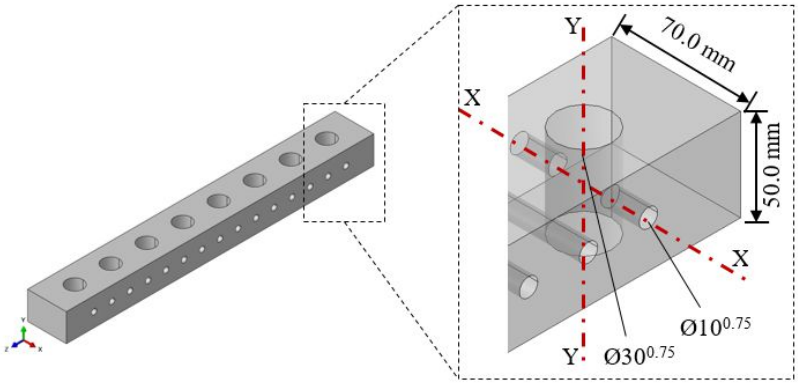
Şekil 2.40. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin görünümleri



Şekil 2.41. İBES'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir)

2.2.4.4. Üç Bileşenli Enerji Sönümleyici (ÜBES)

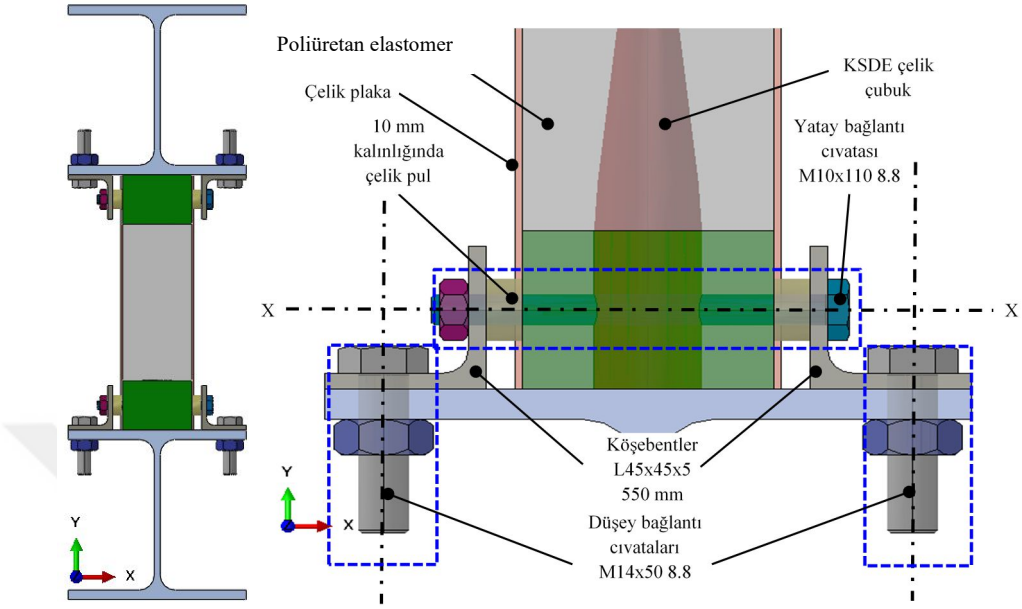
Çalışma kapsamında, KSDE çelik çubukların ve çelik plakaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici deney elemanı tasarlanmıştır. Bu sönümleyici tasarımında 8 adet KSDE-30/16 çelik çubuk ve 2 adet 2.50 mm kalınlığında çelik plaka kullanılmıştır. Yatay yükleme etkisinde, şekildeğiştirmelerin kesit boyunca homojen olarak dağılmasını sağlayacak şekilde ön boyutlandırma yapılarak geometrisi ve yüzey formu belirlenen KSDE çelik çubuklar 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik bloklara merkezleri arasındaki mesafe 65.0 mm ve nominal çapı 30.0 mm olacak şekilde +0.75 mm toleranslı 50.0 mm derinliğinde açılan 8 adet dairesel yuvaya alıştırılmıştır (Şekil 2.42).



Şekil 2.42. Dairesel yuvalı çelik bloğun detaylı şematik görünümü

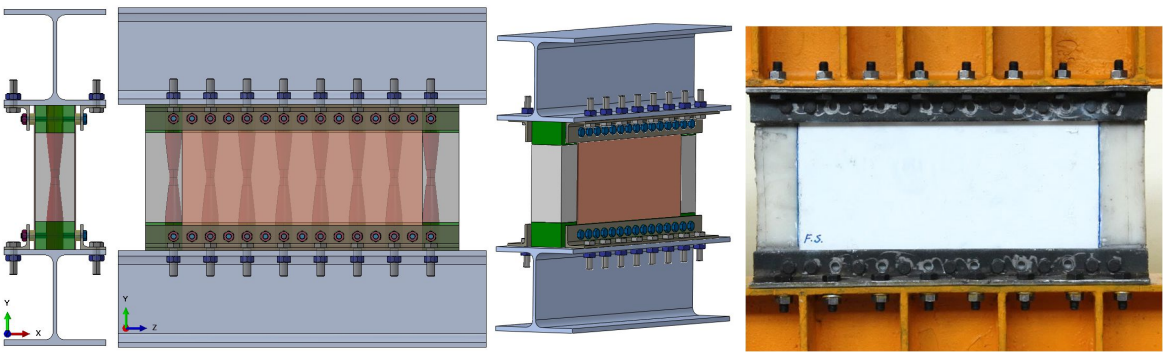
Çelik plakalar ise 50x70x550 mm boyutlarındaki çelik blok ile L45x45x5 mm boyutlarındaki bağlantı köşebentleri arasına simetrik şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.43). KSDE çelik çubukların ve çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara bağlantısı, sönümleyici çelik çubukların yerleştiği dairesel yuvalara dik doğrultuda (x-x) açılan nominal çapı 10 mm olan +0.75 mm toleranslı 70 mm derinliğindeki deliklere geçirilen M10x110 8.8 kalitesinde cıvatalar ile sağlanmıştır. Dairesel yuvalı çelik bloklar ise deney düzeneğine 4 adet L45x45x5 mm boyutlarındaki köşebentler ve M14x50 8.8 kalitesinde cıvatalar ile bağlanmıştır (Şekil 2.43). Şekil 2.43'te görüldüğü gibi çelik plakalar ile bağlantı köşebentlerinin arasına 10 mm kalınlığında çelik pullar yerleştirilmiştir. Böylelikle parçalar arası süreklilik sağlanmış ve bağlantılar kararlı hale getirilmiştir. Sönümleyici deney

elemanı montaja hazır hale getirildikten sonra çelik plakaların arasına sıvı olarak yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu oluşturulmuş ve çelik çubukların yüzeyi kaplanmıştır.



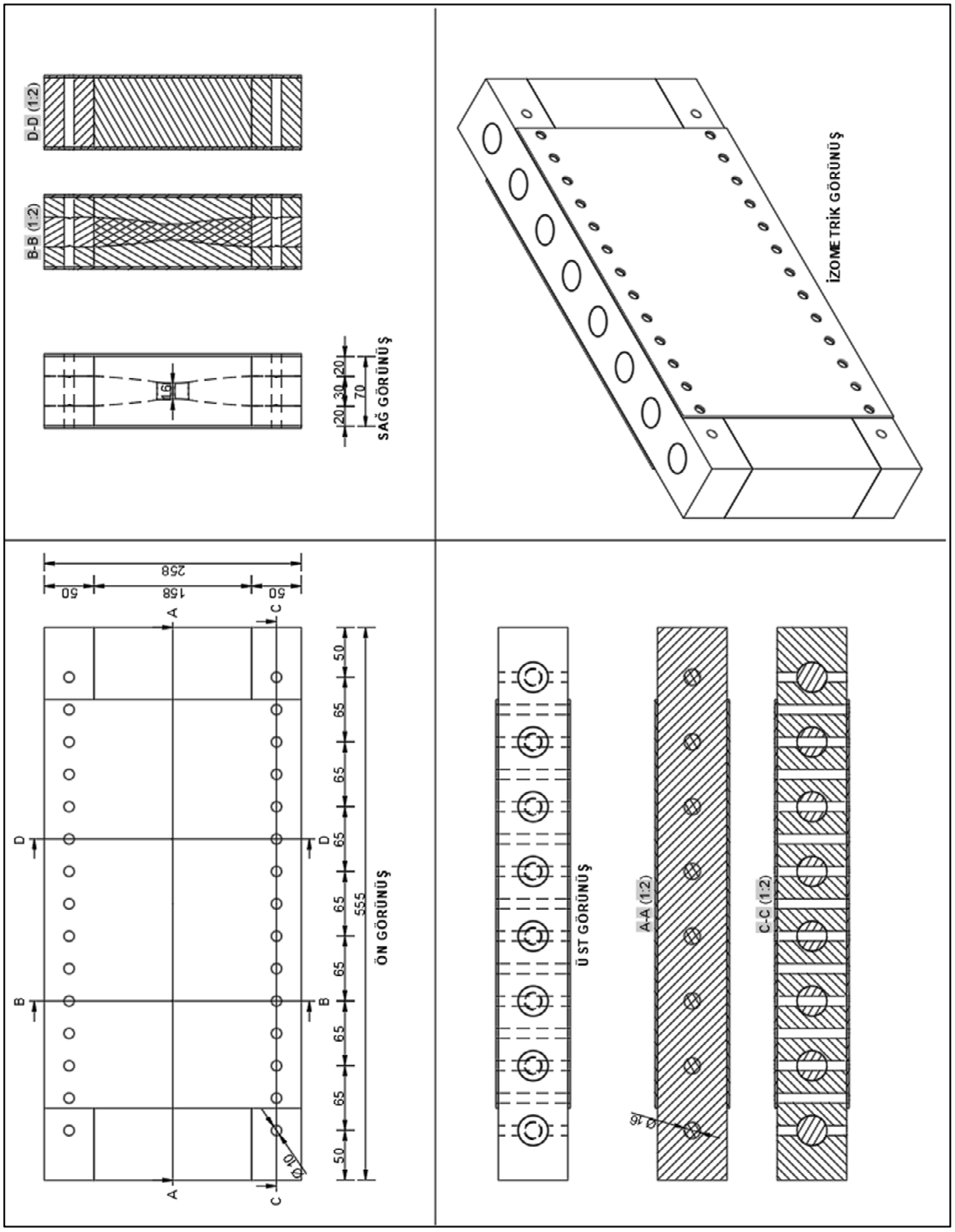
Şekil 2.43. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenme durumunun detaylı görünümü

ÜBES deney elemanının bağlantı elemanları ile deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin şematik görünümü Şekil 2.44-(a)'da, deneye hazır halinin görünümleri Şekil 2.44-(b)'de verilmiştir. Tasarımın montaja hazır halinin detaylı teknik çizimleri ise Şekil 2.45'de verilmektedir.



(a) (b)

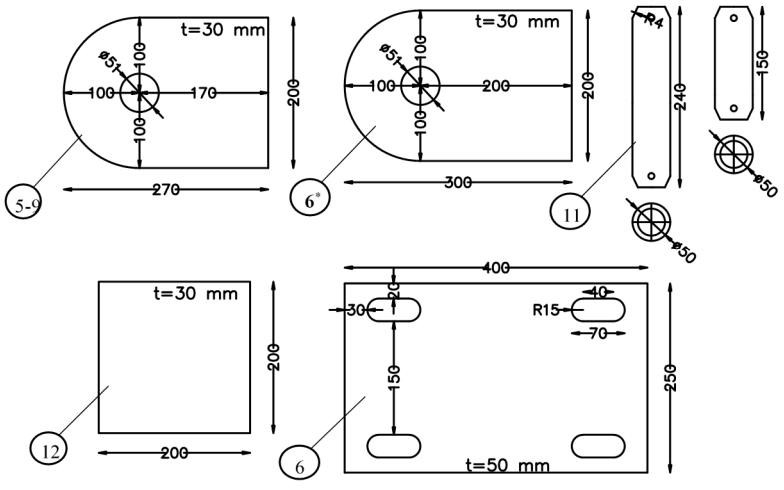
Şekil 2.44. Sönümleyici tasarımının deney düzeneğine mesnetlenmiş halinin görünümleri



Şekil 2.45. ÜBES'in detaylı teknik çizimi (Ölçüler mm'dir)

2.3. Deney Düzeneği

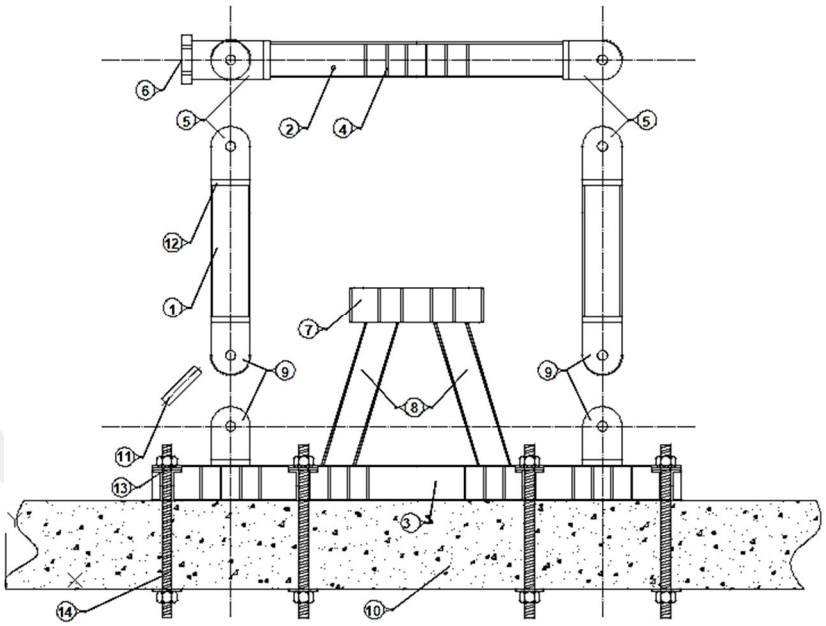
Önerilen sönümleyici tasarımlarının, çevrimsel yükleme altındaki davranışlarının ve hasar durumlarının elde edilmesi amacıyla yarı statik (quasi-static) yükleme altında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, yatay yük etkisindeki ters V çaprazlı bir çerçevenin davranışını temsil edecek şekilde dört mafsallı çerçeve olarak tasarlanmıştır. Bu tasarım ile deney elemanlarının yatay yükleme altında çift eğrilikli şekilde eğilme davranışı gösterecek şekilde moment etkisine maruz kalması sağlanmıştır. Deney düzeneği, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan rijit reaksiyon duvarı ve rijit döşemeden oluşan deney platformu üzerine kurularak deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Deney düzeneğinin rijit döşemeye bağlantısını sağlamak amacıyla 50 mm çaplı yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır. Düzeneğinin rijit döşemeye sabitlenmesi amacıyla HEA 200 profilinden üretilen rijit taban mesneti profili, her iki yanında 4 adet olmak üzere 8 çift sabitleme ayağı yapılarak 50 mm çaplı bulonlar ile bağlanmıştır. Tüm mafsal plakları ve mafsal-rijit kolon bağlantı plakaları 30 mm, yükleme plakası ise 50 mm kalınlığında yumuşak çelikten üretilmiştir. Tüm mafsal birleşimlerinde 50 mm kalınlığında çelik pimler kullanılmıştır (Şekil 2.46).



Şekil 2.46. Mafsal plakaları, mafsal pimleri ve bağlantı plakalarının geometrik özellikleri (Ölçüler mm'dir)

Deney düzeneğinde ana çerçeve sistemini oluşturan rijit yükleme kirişi ile rijit kolonlar ve alt bağlantı mesnet kirişi ise HEA180 profili ile oluşturulmuştur. Yükleme esnasında yerel

hasarların oluşmaması amacıyla, yükleme kirişi taban mesnet profili gövdesi ve alt bağlantı mesnet profili gövdesi berkitme levhaları ile güçlendirilmiştir. Şekil 2.47'de deney düzeneğinin demonte halinin şematik görünümü verilmektedir.

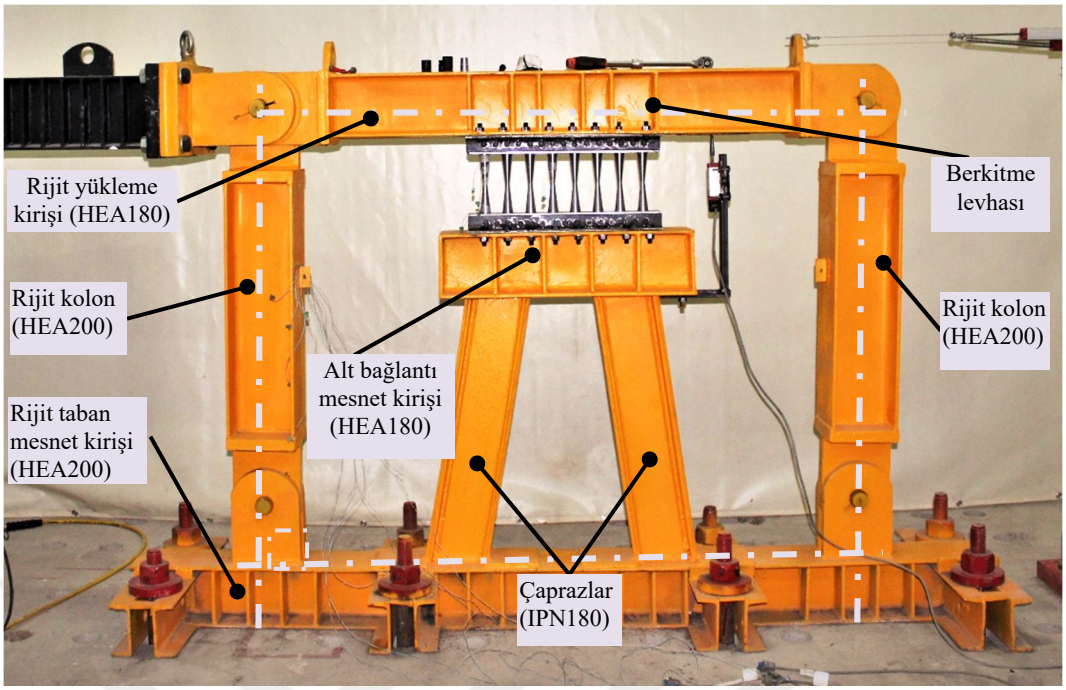


Şekil 2.47. Deney düzeneğinin demonte halinin şematik görünümü

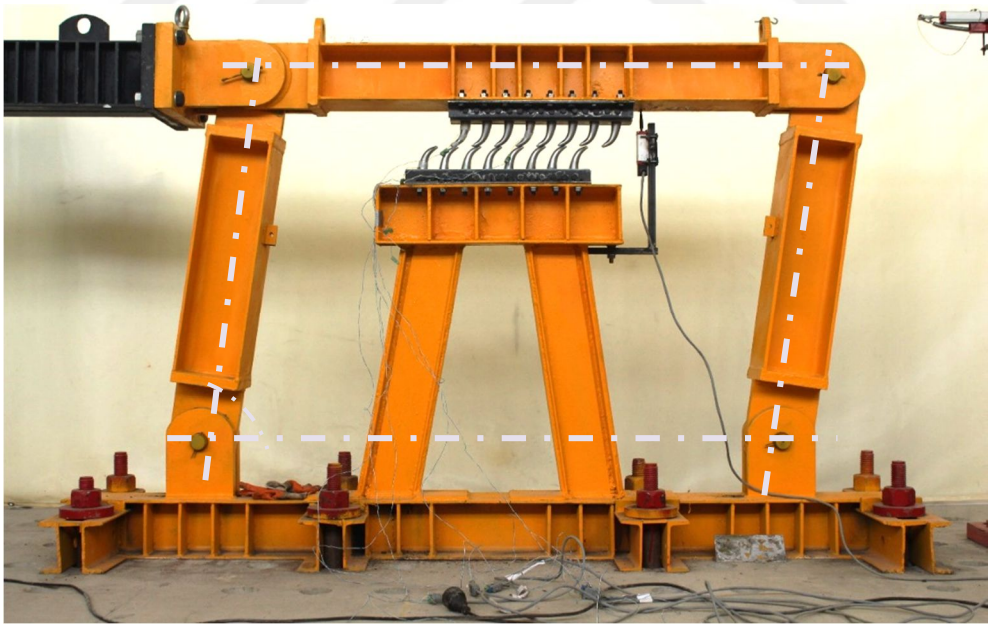
Deney düzeneğinin; sönümleyici tasarımlarının montajına hazır halinin görünümü Şekil 2.48'de, deney sonrası yatay ötelenme yapmış halinin görünümü Şekil 2.49'da verilmektedir. Ayrıca deney düzeneğindeki mafsallı birleşimlerin detaylı görünümleri ise Şekil 2.50'de verilmektedir. Deney düzeneğini oluşturan tüm parçaların listesi Tablo 2.6'da, deney düzeneğinin şematik görünümü ve ölçüleri ise Şekil 2.51'de verilmektedir.

Tablo 2.6. Deney düzeneğini oluşturan parçalar

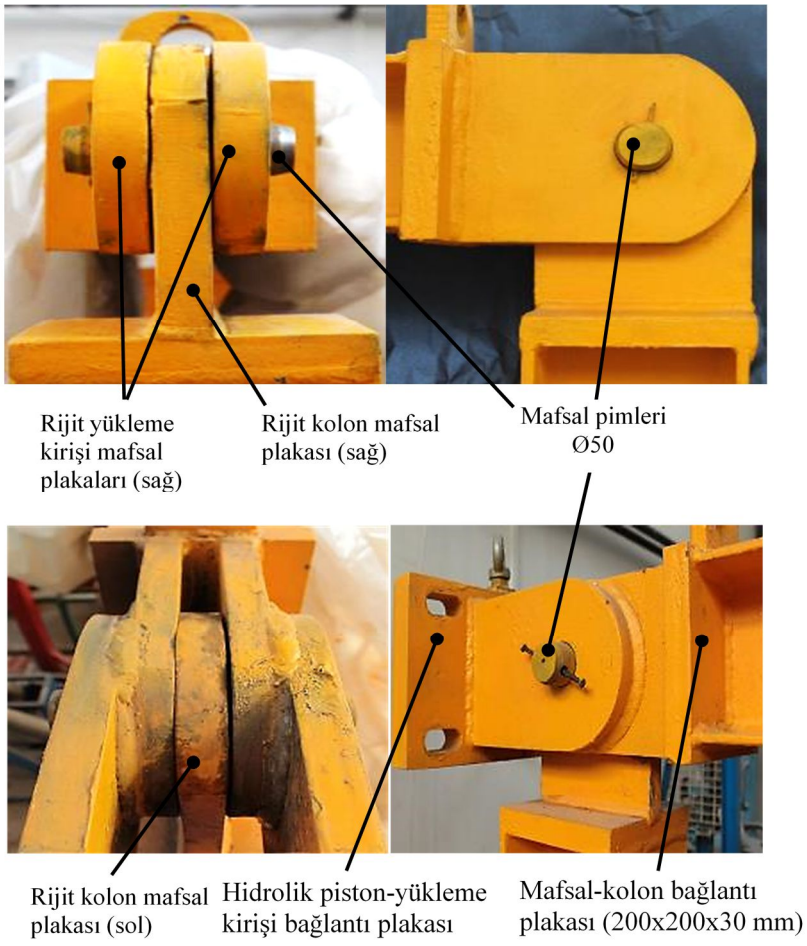
Parça numarası	**Açıklama**	**Parça numarası**	**Açıklama**
1	Rijit kolon(HEA200)	**8**	Çaprazlar (IPN180)
2	Rijit yükleme kirişi (HEA180)	**9**	Mafsal plakaları (alt)
3	Rijit taban mesnet kirişi (HEA200)	**10**	Rijit döşeme
4	Berkitme levhaları	**11**	Mafsal pimleri
5	Mafsal plakaları (üst)	**12**	Mafsal-kolon bağlantı plakaları
6 **6***	Hidrolik piston-yükleme kirişi bağlantı plakası Mafsal plakası	**13**	Rijit döşeme-taban mesnedi kirişi pabuçları
7	Alt bağlantı mesnet kirişi (HEA180)	**14**	Yüksek dayanımlı bağlantı bulonları



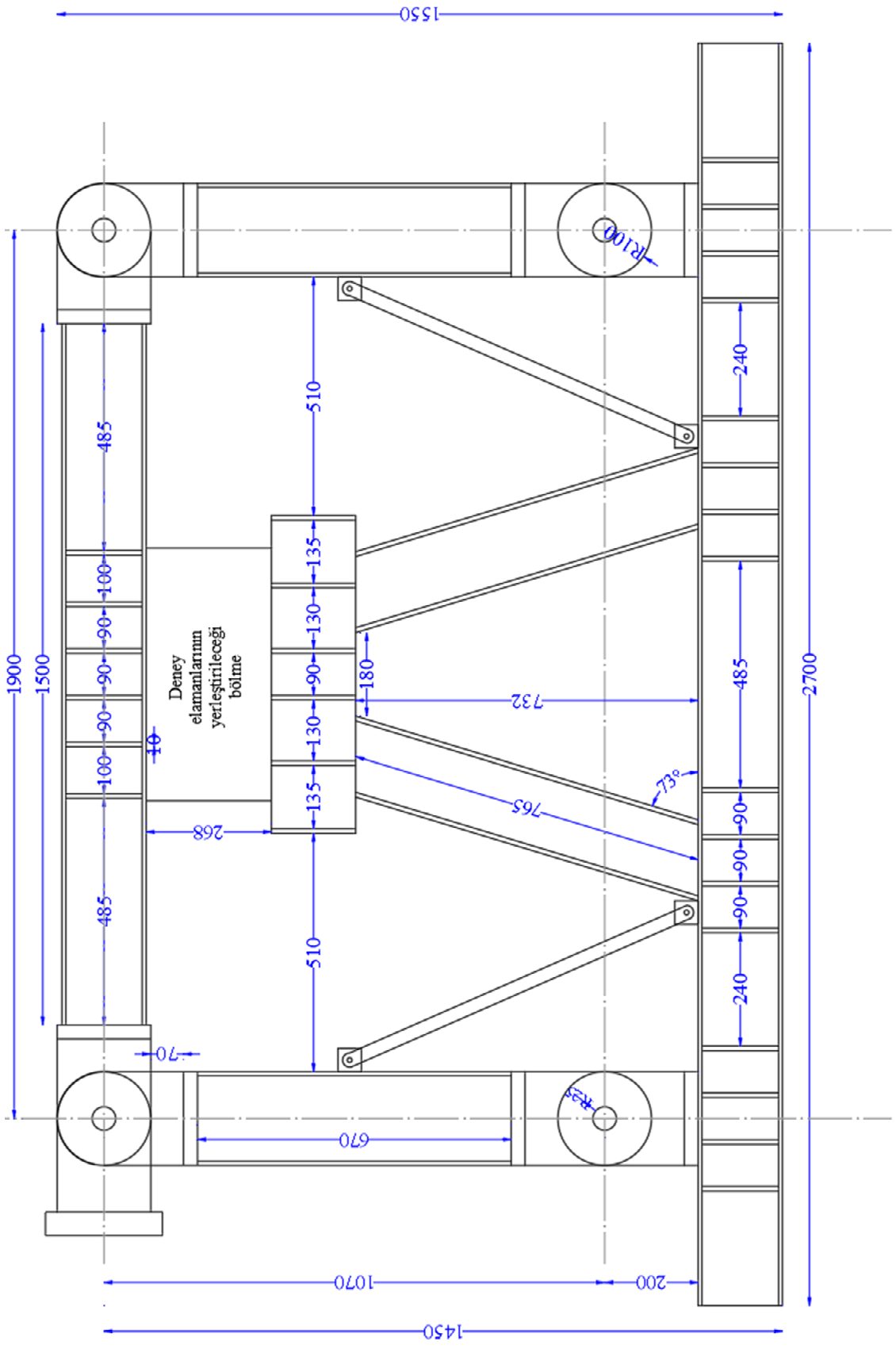
Şekil 2.48. Deney düzeneğinin sönümleyici tasarımlarının montajına hazır halinin görünümü



Şekil 2.49. Deney düzeneğinin deney sonrası yatay ötelenme yapmış halinin görünümü



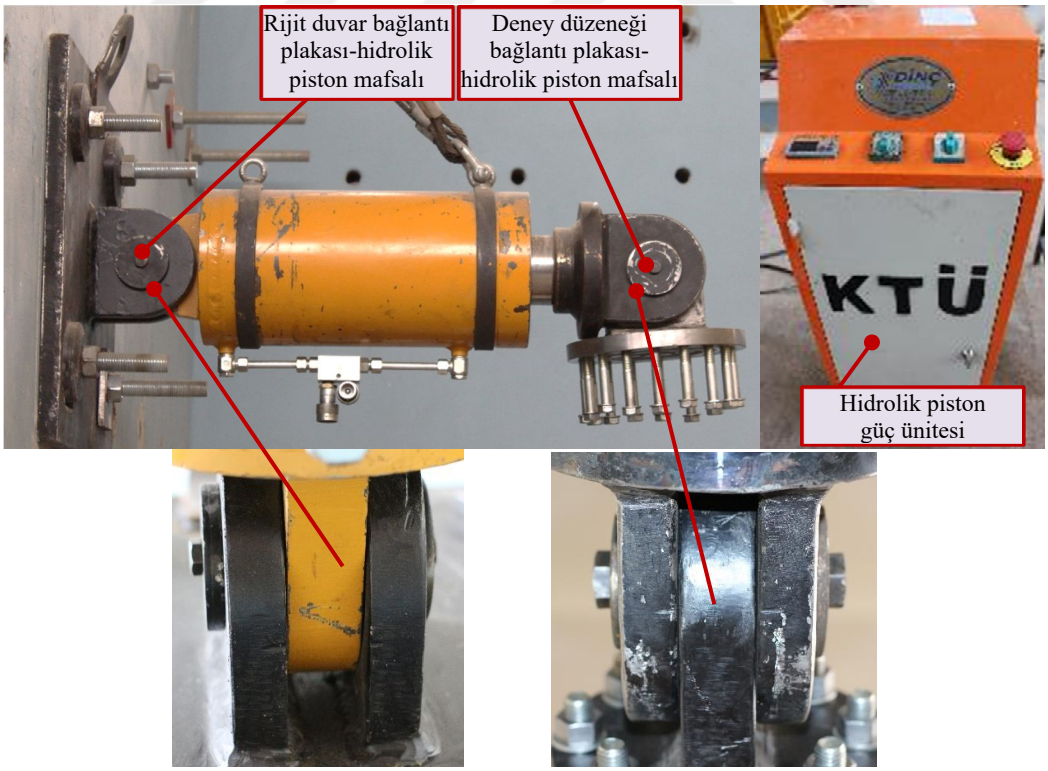
Şekil 2.50. Deney düzeneğindeki mafsallı birleşimlerin detaylı görünümleri



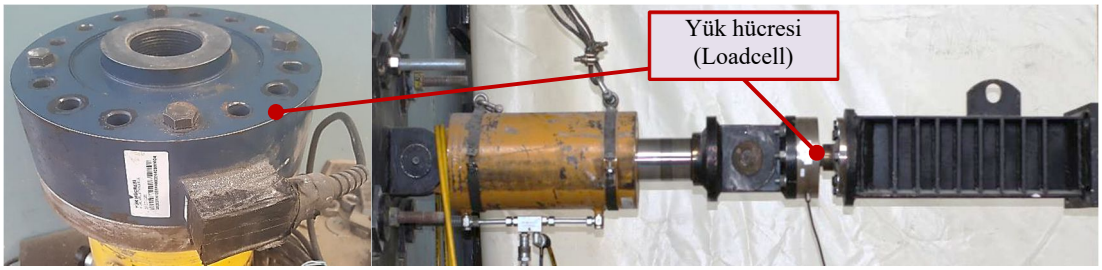
Şekil 2.51. Deney düzeneğinin şematik görünümü ve ölçüleri (Ölçüler mm'dir)

2.4. Ölçüm Sistemi, Kullanılan Aletler ve Cihazlar

Önerilen sönümleyici tasarımlarının çevrimsel yatay yüklemeler altındaki davranışlarının elde edilmesi amacıyla, tasarlanan deney düzeneği vasıtasıyla, sönümleyici tasarımlarına yarı statik çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Yerdeğiştirme kontrollü yapılan deneylerde, yükleme 1000 kN basma-700 kN çekme kapasiteli hidrolik piston ve hidrolik güç ünitesi ile uygulanmıştır (Şekil 2.52). Hidrolik pistonun, rijit duvar ile bağlantısını sağlayan plaka arasında ve deney düzeneğiyle yükleme kirişinin bağlantı plakası arasında olmak üzere iki adet mafsallı birleşim oluşturulmuştur (bk. Şekil 2.52). Bu mafsallar deney süresince uygulanan yatay yükün, yükleme kirişi ekseni içerisinde kalmasını sağlamaktadır. Böylelikle deney düzeneğine ve/veya sönümleyici tasarımlarına istenmeyen yüklerin etkimesi önlenmiştir. Deney elemanlarına uygulanan yerdeğiştirme miktarına bağlı olarak sönümleyici tasarımlarından elde edilen yatay yük miktarı, 1000 kN kapasiteli yük hücresi (loadcell) ile ölçülmüştür (Şekil 2.53).

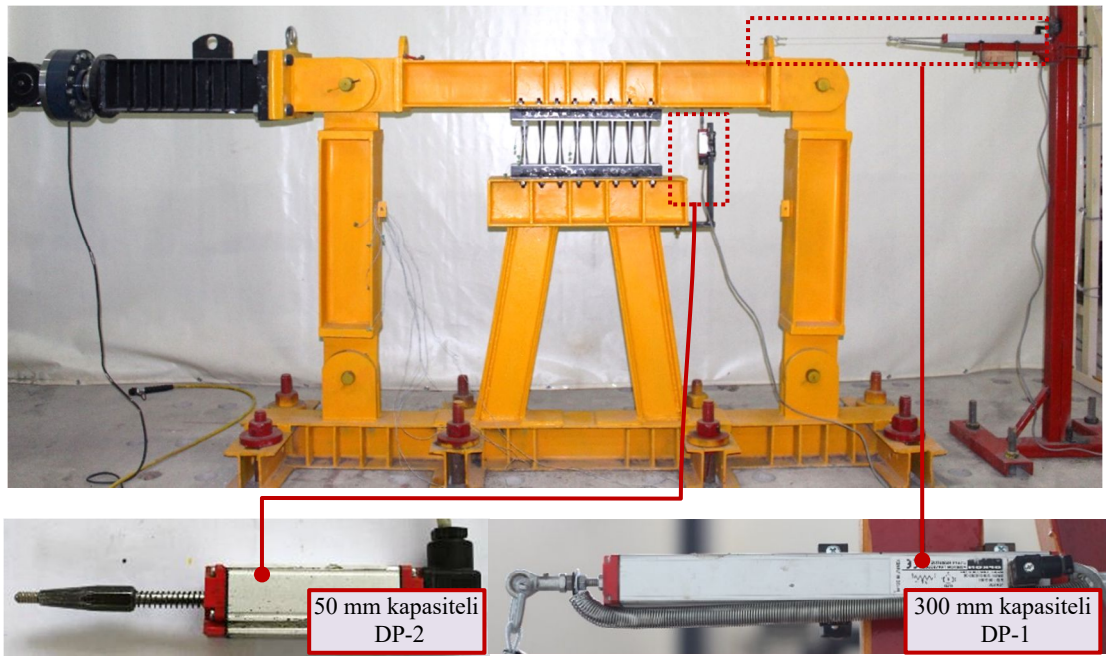


Şekil 2.52. Hidrolik piston ve hidrolik güç ünitesinin detaylı görünümleri

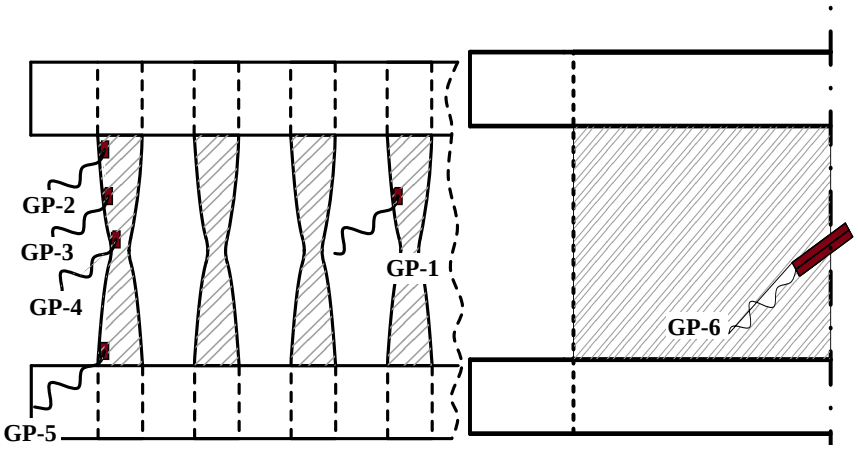


Şekil 2.53. Yük hücresinin görünümleri

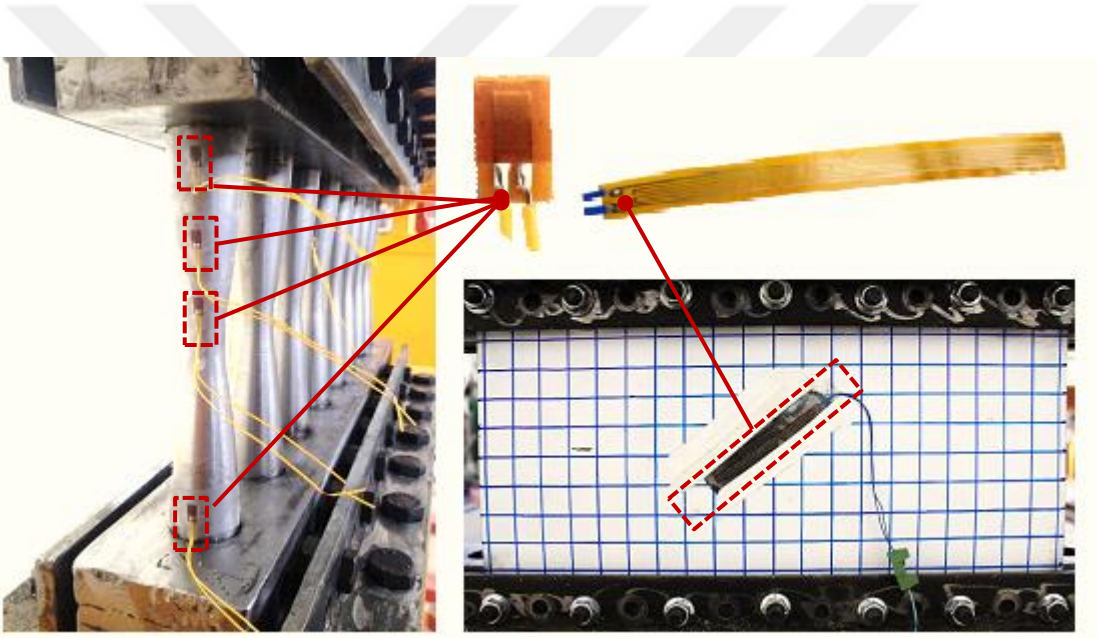
Yatay yüklemeden dolayı deney düzeneğinde dolayısıyla da deney elemanlarında meydana gelen yerdeğiştirmeler doğrusal potansiyometreler (DP) yardımıyla ölçülmüştür. Bu çalışma kapsamında 300 mm ve 50 mm kapasiteli iki adet DP kullanılmıştır. 300 mm kapasiteli DP-1, yükleme kirişine bağlı olup sistemin yatay yerdeğiştirmesini ölçmek için DP-2 ise alt bağlantı mesnet kirşine monte edilerek yükleme kirişinin yatay yerdeğiştirme değerine bağlı olarak yaptığı düşey doğrultudaki yerdeğiştirmesini ölçmek için kullanılmıştır. Deney süresince, deney elemanlarında oluşan şekildeğiştirmeler ise gerinim pulları (GP) yardımıyla elde edilmiştir. Sönümleyici tasarımlarında, KSDE ve KDE çelik çubuklara 5 adet, çelik plakalara ise 1 adet GP yapıştırılmıştır (Şekil 2.54, Şekil 2.55 ve Şekil 2.56).



Şekil 2.54. Doğrusal potansiyometrelerin (DP) görünümleri ve deney düzeneği içerisindeki konumları



Şekil 2.55. Deney elemanlarına yapıştırılan gerinim pullarının (GP) yerleşiminin şematik gösterimi



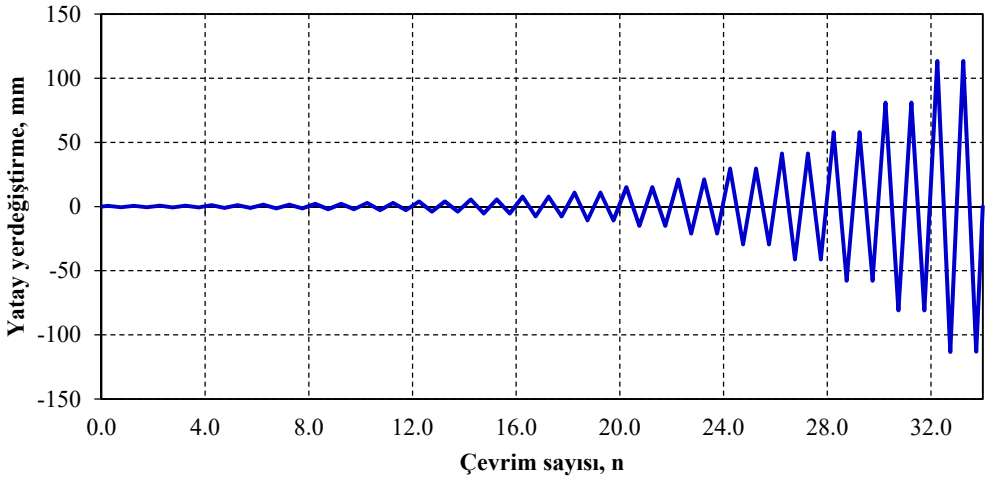
Şekil 2.56. Deney elemanlarına yapıştırılan gerinim pullarının (GP) görünümleri

Deneyler süresince, yük hücresi, gerinim pulları ve doğrusal potansiyometreler ile elde edilen veriler, toplam 16 kanallı veri toplama cihazı yardımıyla (Coda Ai8b) sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

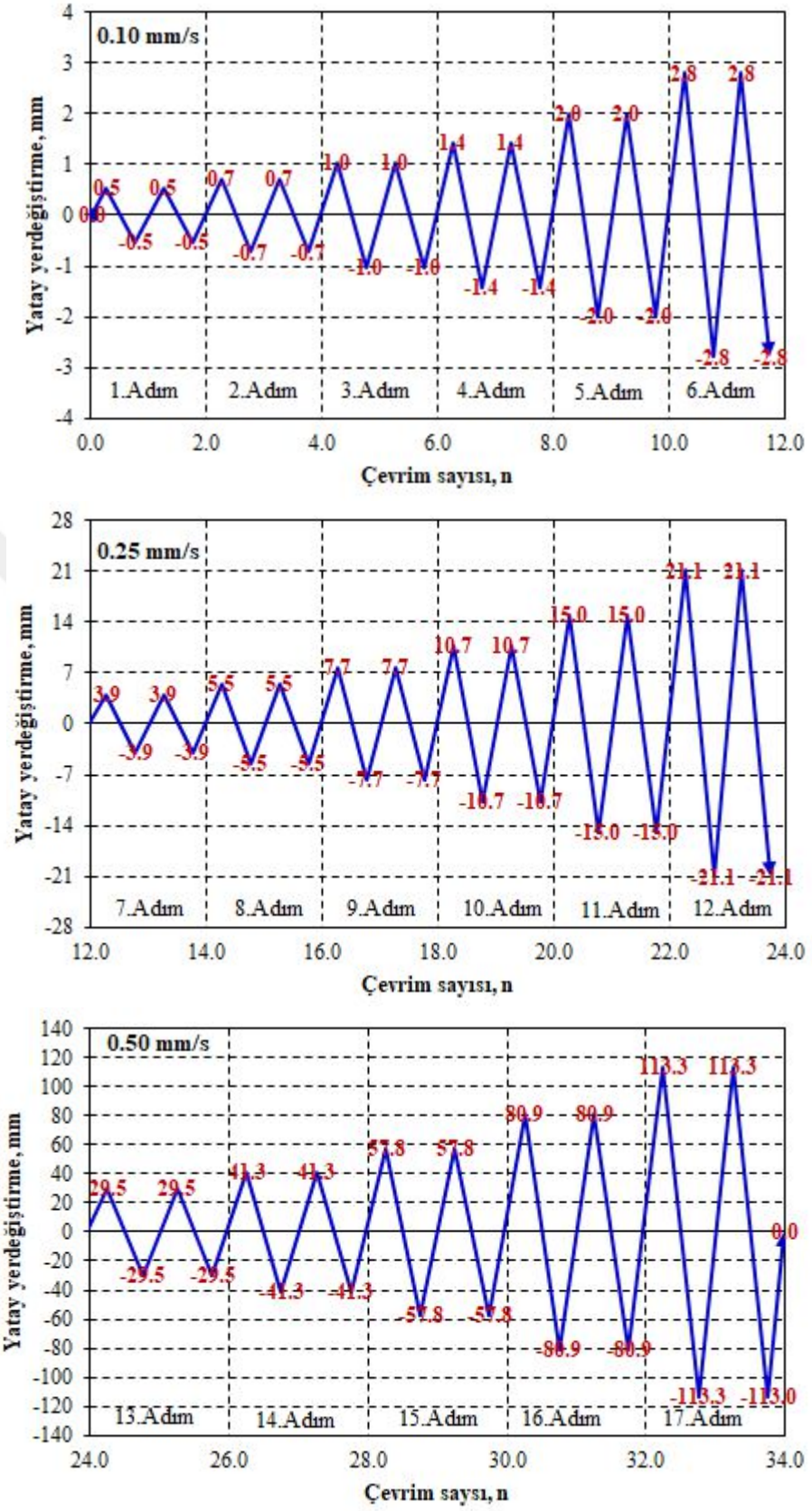
2.5. Deney Elemanlarına Uygulanan Yatay Yükleme Protokolü

Bu tez çalışması kapsamında üretilen sönümleyici tasarımlarının, çevrimsel yükleme altındaki davranışlarının ve hasar durumlarının elde edilmesi amacıyla yarı statik (quasi-

static) yükleme altında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan yükleme protokolü, FEMA 461'de belirtilen (yapısal ve yapısal olmayan bileşenlerin sismik performans özelliklerinin belirlenmesine yönelik test protokolleri) sınırlamalara uygun olarak oluşturulmuştur. FEMA 461'de önerilen yükleme protokolünde, her bir çevrimden bir çift, genliği (a_i) ve çevrim sayısı (N) olmak üzere, teste tabi tutulan deney elemanlarının yeterli miktarda kümülatif elastik ötesi şekildeğiştirme yapabilmesine imkan sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Sönümleyicilerin elastik sınırını ve akma anındaki yerdeğiştirme miktarının deneysel olarak açık bir şekilde gözlemlenebilmesi amacıyla yükleme protokolündeki başlangıç yerdeğiştirme adımının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, hem KSDE ve KDE çelik çubukların hem de daha narin olan çelik plakaların (ÇP) ayrı ayrı ve beraber kullanıldığı tasarımlarda aynı yükleme protokolü kullanılacağından başlangıç yerdeğiştirme değeri elastik bölgede yükleme oluşturacak şekilde ön sayısal analizler sonucunda 0.50 mm olarak belirlenmiştir. Ardışık yerdeğiştirme adımları arasındaki genlik artışlarının oranı 1.40 ($a_{i+1} = 1.4a_i$) olup adım 1-17 adımları arasında sabittir. Deney süresince yükleme hızı ise yükleme protokolü üç eşit kısma ayrılarak yaklaşık olarak sırasıyla 0.1 mm/sn, 0.5 mm/sn ve 1.0 mm/sn hızlarında deney elemanlarına uygulanmıştır. Yükleme protokolü Şekil 2.57'de, yükleme protokolünün yükleme hızına göre ayrıntılı gösterimi ise Şekil 2.58'de verilmiştir.



Şekil 2.57.Yükleme protokolü



Şekil 2.58. Yüklem protokolünün, yükleme hızına göre ayrıntılı gösterimi

2.6. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi

2.6.1. Dayanım Zarfı Eğrilerinin Elde Edilmesi

Çevrimsel bir eğri grubunda, her bir döngüyü oluşturan verilerin, inceleme konusu temel alınarak belirlenen veri serisinin maksimum değerlerini ve bu değerlere karşı gelen verilerin oluşturduğu veri çiftlerinin düzlemde birleştirilerek oluşturulan eğriye veya eğri ailesine zarf eğrisi denilmektedir. Özellikle, birden çok farklı çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin kıyaslanmasının gerektiği durumlarda, zarf eğrilerinin kullanımı sonuçların irdelenmesi açısından kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada, sönümleyici tasarımlarına uygulanan çevrimsel yatay yükleme neticesinde elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrilerinden, her bir tasarımın dayanım zarfı eğrileri elde edilmiştir.

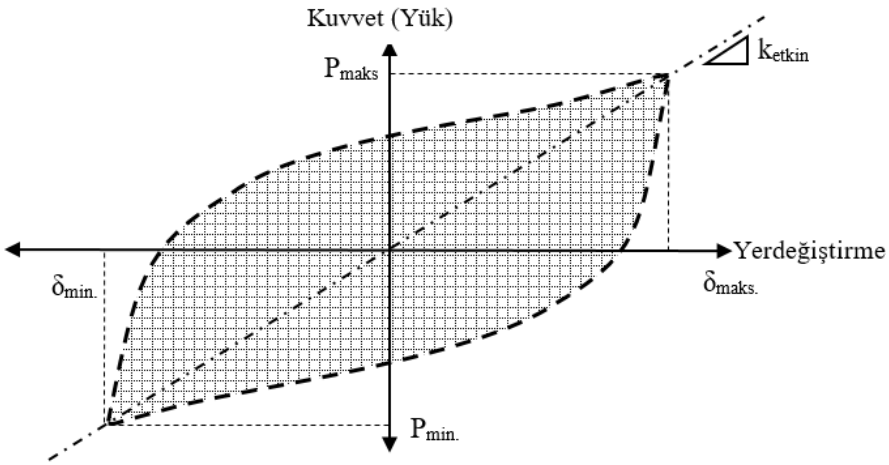
2.6.2. Rijitlik Değişimlerinin Hesaplanması

Çevrimsel yükleme etkisindeki bir yapı sisteminin ve/veya elemanın sahip olduğu rijitliği, göreceli olarak büyük yerdeğiştirme adımlarında elastik ötesi şekildeğiştirmelerin ve hasarların oluşması ile azalmaktadır. Rijitlikteki bu değişim, yapının çevrimsel yüklemeler altındaki davranışının kavranabilmesi açısından önemli bir parametredir. Şekil 2.59'da görüldüğü gibi, rijitlik değişimi, k_{etkin}, her bir çevrimde itme ve çekme yüklemeleri altında elde edilen maksimum ($P_{maks,i}$) ve minimum ($P_{min,i}$) yük değerlerinin, bu değerlere karşılık gelen yerdeğiştirme değerlerine oranlanması ile elde edilmektedir (Denklem 2.6 ve 2.7).

$$k_{etkin}^{itme}(i) = \frac{P_{maks,i}}{\delta_{maks,i}} \tag{2.6}$$

$$k_{etkin}^{çekme}(i) = \frac{P_{\min,i}}{\delta_{\min,i}} \tag{2.7}$$

Bu çalışmada, sönümleyici tasarımlarına uygulanan çevrimsel yatay yükleme neticesinde elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme eğrilerinden, her bir tasarımın rijitlik değişimi-yatay yerdeğiştirme ilişkisini gösteren eğriler elde edilmiştir.



Şekil 2.59. Her bir çevrim için etkin rijitlik değerlerinin elde edilmesi

2.6.3. Kümülatif Enerji Tüketme Kapasitelerinin Hesaplanması

Ardışık olarak çevrimsel yükleme etkisindeki sistemlerin veya elemanların, nihai yük taşıma kapasitesine ulaşıncaya kadar her bir çevrim sonucunda oluşan kapalı yük-yerdeğiştirme eğrilerin altındaki alanların ,(E_D) kümülatif olarak toplanması ile kümülatif enerji tüketme kapasiteleri elde edilmektedir (Şekil 2.60). Kümülatif enerji tüketme kapasitesi, farklı sistemlerin ve/veya elemanların aynı çevrimsel yükleme etkisindeki toplam enerji tüketme kapasitelerinin dolayısıyla da sönümleyici olarak etkinliklerinin kıyaslanabilmesi açısından önemli bir parametredir. Bu çalışmada, sönümleyici tasarımlarına uygulanan çevrimsel yatay yükleme neticesinde elde edilen çevrimsel yatay yük-yerdeğiştirme eğrilerinden, her bir tasarımın kümülatif enerji tüketme kapasiteleri ile yatay yerdeğiştirmeler arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler elde edilmiştir.

2.6.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranlarının Hesaplanması

Dinamik yüklemeler altındaki bir sistemde sönüm ile sistemdeki enerji zamanla tüketilir. Enerjinin azalmasıyla sistemdeki genlikler sürekli azalırken, zorlanmış bir titreşimde ise azalan enerji dış etkiler tarafından dengelenir (Celep, 2011). En genel tanımıyla bir sistemde sönüm, sistemi oluşturan elemanlarda meydana gelen elastik ötesi

şekildeğiştirmeler ile oluşmaktadır. Çevrimsel yüklemeye maruz bir sistemde, tek bir çevrimde tüketilen enerji miktarı E_D'dir (Şekil 2.60).

Eşdeğer viskoz sönüm oranı ise çevrimsel yüklemeye maruz bir sistemde her bir çevrimde söz konusu sistemin verdiği tepkinin, o çevrimde sönümden dolayı tüketilen enerji ile olan ilişkisi hakkında bilgi vermesi açısından önemli bir parametredir.

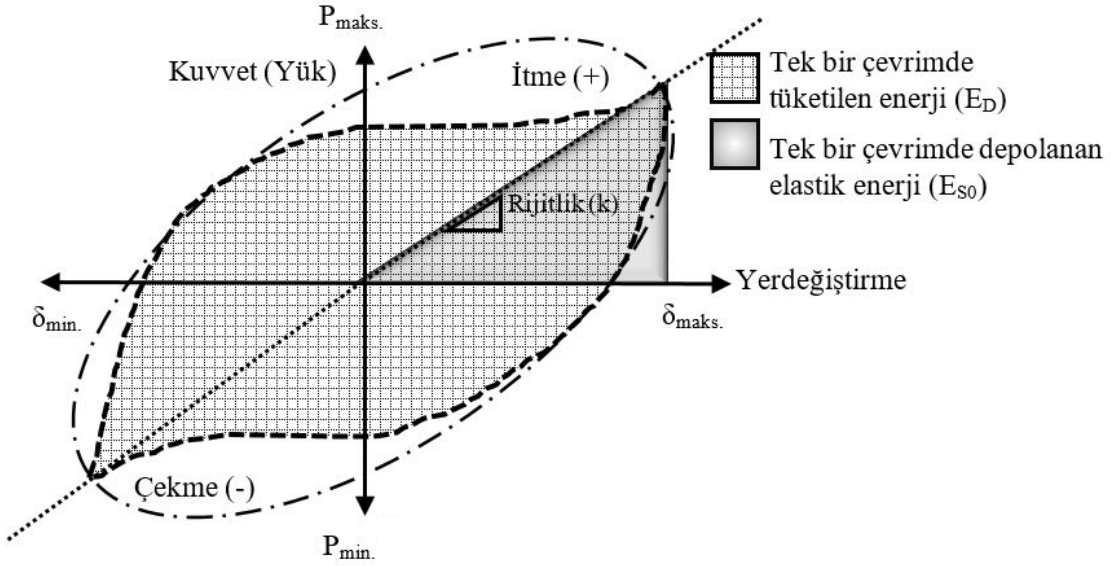
Bir çevrimsel hareket, ideal basit harmonik harekete indirgendiğinde sistemin sönümle tüketeceği enerji E_D', eliptik bir eğrinin altında kalan alan ile hesaplanmaktadır. Sistemde sönüm azaldığında ise çevrimsel yüklemeden dolayı oluşan eğri, elastik davranışı temsil eden eğriye yaklaşır (bk. Şekil 2.60). Bu durum, sistemde depolanan elastik enerjinin (E_{S0}) maksimum olduğu hâldir (Denk. 2.8). Eşdeğer viskoz sönüm oranı, elastik şekildeğiştirmelerden dolayı depolanan enerji (E_{S0}) ve tek bir çevrimde sönümle tüketilen enerji E_D' ile ifade edilirse Denklem (2.9) ile elde edilir. Nihai durumda eşdeğer viskoz sönüm oranı, sönümün sistemin davranışına en etkili olduğu rezonans durumu ($\bar{\omega}/\omega \approx 1$) dikkate alınması durumunda Denklem (2.10) yardımı ile hesaplanmaktadır (Celep, 2011).

Bu çalışmada, sönümleyici tasarımlarına uygulanan çevrimsel yatay yükleme neticesinde elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrilerinden, her bir tasarımın eşdeğer viskoz sönüm oranı ile yatay yerdeğiştirmeler arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler elde edilmiştir.

$$E_{S0} = k\frac{\delta_{maks}^{\,2}}{2} \tag{2.8}$$

$$E_D' = 2\pi\xi\frac{\bar{\omega}}{\omega}k\delta^2 \tag{2.9}$$

$$\xi_{eşdeğer} = \frac{1}{4\pi}\frac{\bar{\omega}}{\omega}\frac{E_D}{E_{S0}} \approx \frac{1}{4\pi}\frac{E_D}{E_{S0}} = \frac{1}{2\pi}\frac{E_D}{k\delta^2} \tag{2.10}$$



Şekil 2.60. Bir çevrimde tüketilen enerji ve depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi

2.7. Sayısal Çalışmalar

Bilgisayar ve yazılım teknolojilerinin gelişmesiyle çözülmesi-hesaplanması zor ve zaman alıcı mühendislik problemlerinin farklı yükleme ve sınır koşulları altında çözümlenmesine olanak sağlayan ilerlemeler meydana gelmektedir. Bunlardan en önemlilerinden biri ise malzemelerin mekanik özelliklerinin ve sınır koşullarının yazılım dilleri yardımıyla matematiksel olarak sayısallaştırılmasını sağlayan sayısal yöntemlerin geliştirilmesidir. Sayısal yöntemlerin geliştirilmesi, deneysel çalışmalarda kullanılması düşünülen deney düzeneklerinin ve elemanlarının davranışları hakkında ön bilgi vermesi ve doğrulama çalışmalarının gerçekleştirilmesi bakımından önemlidir. Ayrıca tasarımcı ve/veya mühendis tarafından ön görülemeyen ek gerilmelerin farkına varılması, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler yardımıyla problemlerin farklı sınır koşullarında ve boyutlarda ve/veya farklı malzemelerle çözümlenebilmesine imkân sağlaması bakımından önemlidir. Bu bölümde, sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla yapılan sayısal çalışmaların aşamaları açıklanmaktadır. Bu çalışma kapsamında sonlu eleman analizleri Abaqus 2017 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

2.7.1. Çeliğin Mekanik Özelliklerinin Tanımlanması

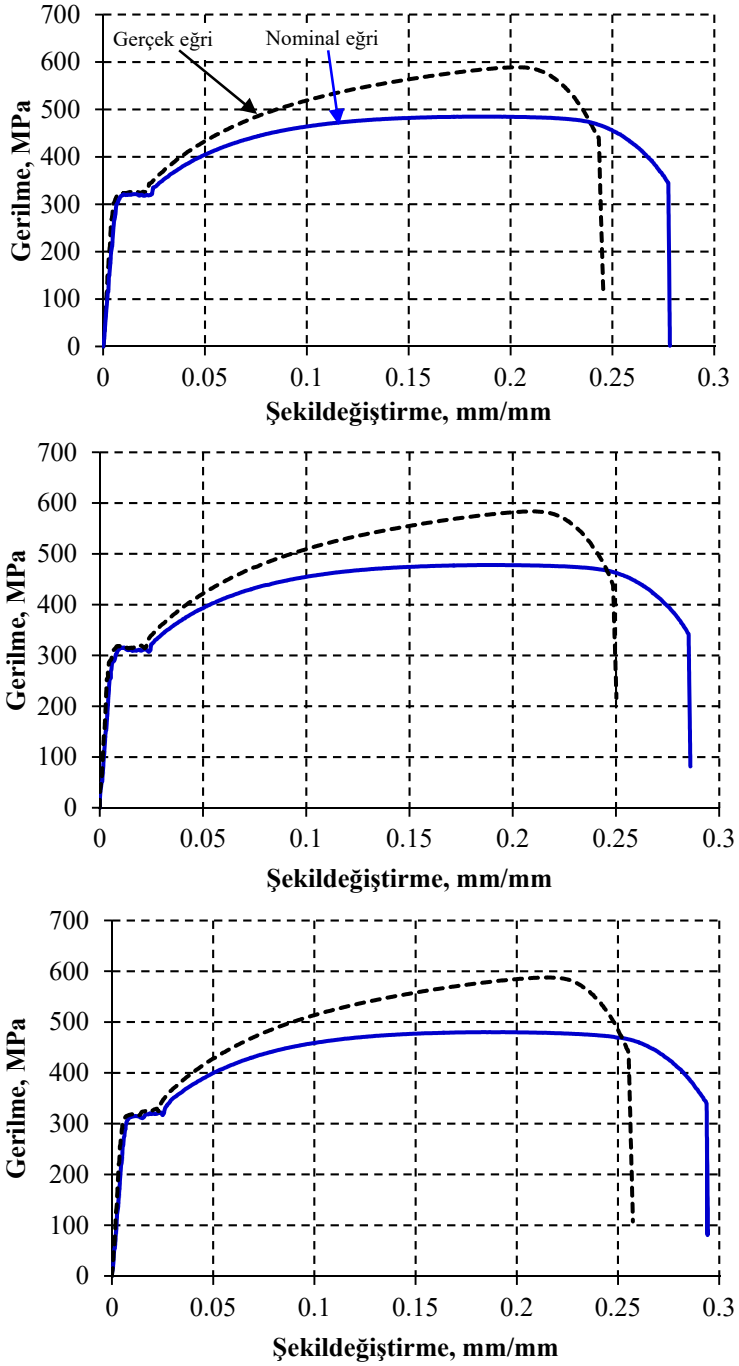
2.7.1.1. Çeliğin Eksenel Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi

Çelik gibi sünek malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi belirlenirken, elemanın ilk boyu l_0 ve enkesit alanı A_0 dikkate alındığında nominal gerilme σ_{nom} ve nominal şekildeğiştirme ε_{nom} değerleri elde edilmektedir. Gerçekte elemanın yükleme sırasında ilk boyu ve enkesit alanı değişmektedir. Bu değişimleri dikkate alındığında nominal gerilme σ_{nom} ve nominal şekildeğiştirme ε_{nom} değerleri, gerçek gerilme σ_{true} ve gerçek şekildeğiştirme ε_{true} değerlerine dönüşmektedir. Sonlu eleman yöntemi ile çözüm yapan yazılımlarda malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi tanımlanırken σ_{true} - ε_{true} verileri kullanılmaktadır. Nominal gerilme-şekildeğiştirme değerleri yardımıyla gerçek gerilme-şekildeğiştirme değerleri elde edilebilmektedir (Denk 2.11;13). Bu çalışmada kullanılan ABAQUS yazılımında ise malzemenin elastik özellikleriyle beraber elastik ötesi davranış gösterdiği bölgeyi tanımlamak için gerçek gerilme σ_{true} ve plastik şekildeğiştirme ε_{pl} değerleri kullanılmaktadır. Plastik şekildeğiştirme değerleri, ε_{pl} ise gerçek gerilme, σ_{true} gerçek şekildeğiştirme ε_{true} ve elastisite modülü, *E,* yardımı ile hesaplanmaktadır (Denk. 2.13). Şekil 2.61 ve Şekil 2.62'de çekme deneylerinden elde edilen nominal gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin dönüşümünün yapılması ile elde edilen gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrileri verilmiştir.

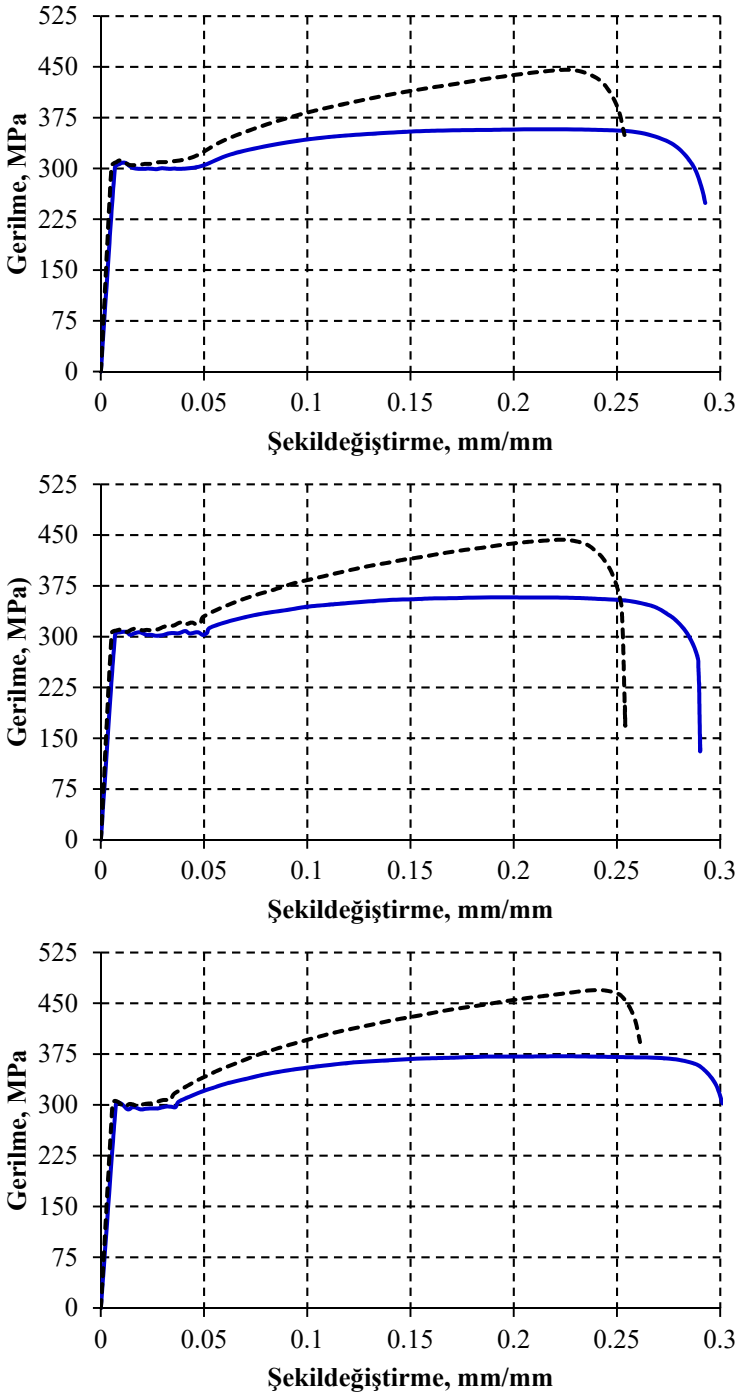
$$\sigma_{true} = \sigma_{true}(1+\varepsilon_{nom}) \tag{2.11}$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1+\varepsilon_{nom}) \tag{2.12}$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \tag{2.13}$$



Şekil 2.61. Dairesel kesitli çekme numunelerine ait nominal ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 2.62. Dikdörtgen kesitli çekme numunelerine ait nominal ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (nominal kalınlığı 2.00 mm olan numuneler)

2.7.1.2. Çeliğin Pekleşme Özellikleri

Metallerin plastik davranışlarının tanımlanabilmesi için üç ana parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar; akma durumunu tanımlayan akma fonksiyonu, plastik

şekildeğiştirmelerin yayılmasını/gelişmesini tanımlayan akma kuralı ve akma sonrası metalin davranışını tanımlayan pekleşme kuralıdır. Bu çalışmada, üretilen sönümleyicilerin ana elemanlarını modellemek için Mises akma fonksiyonu kullanılmıştır (Denk. 2.14).

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(S-a):(S-a)} - (\sigma_{yo} + R) = 0 \tag{2.14}$$

Burada S ve a sırasıyla deviatorik gerilme tensörü ve geri gerilme parametresidir (backstress). Diğer önemli parametre olan pekleşme kuralları ise iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; izotropik ve kinematik pekleşme olarak tanımlanmaktadır. Literatürde önerilen birçok model izotropik ve kinematik pekleşme modellerinin farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır (Jia ve Kuwamura, 2013). İzotropik pekleşme, skaler bir değişken olan R ile gerçekleştirilir. R'nin değeri eşdeğer plastik şekildeğiştirmenin (ε_{eq}) bir fonksiyonu olarak tanımlamaktadır. Kinematik pekleşme ise geri gerilmeyi temsil eden, a, değişkeni ile kontrol edilmektedir. Söz konusu, a , plastik şekildeğiştirmenin doğrusal bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Denk 2.15).

$$da = \frac{2}{3} C_o d\varepsilon_p \tag{2.15}$$

Burada C_o bir malzeme parametresi olup, Mises akma fonksiyonu ile beraber değerlendirildiğinde, Denklem (2.16) elde edilmektedir.

$$da = C_o \frac{1}{\sigma_{yo}} (S-a) d\varepsilon_{eq} \tag{2.16}$$

Bu doğrusal kinematik pekleşme modeli Armstrong and Frederick (1966) tarafından, bir gevşeme terimi ekleyerek (γ) geliştirilmiştir (Denk. 2.17).

$$da = \frac{2}{3} C_o d\varepsilon_p - \gamma . a . d\varepsilon_{eq} \tag{2.17}$$

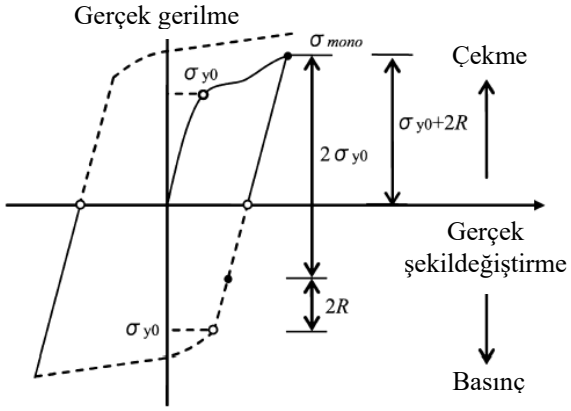
Tek bir geri gerilme durumu için önerilen bu model farklı şekildeğiştirme seviyelerinde ve hızlarında, malzemenin şekildeğiştirme davranışı tam olarak yansıtılamamaktadır (Jia ve Kuwamura, 2013). Chaboche (1986) tarafından, farklı geri gerilme durumlarında, farklı şekildeğiştirme ve hızlarında pekleşme davranışı yansıtabilecek bir pekleşme kuralı önerilmiştir. Burada, a, her bir geri gerilme durumu için ayrı ayrı hesaplanabilmekte ve süperpoze edilebilmektedir (Denk. 2.18).

$$a = \sum_{i}^{n} a_i; \quad da = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon_p - \gamma . a_i . d\varepsilon_{eq} \tag{2.18}$$

Lemaitre ve Chaboche (1990) tarafından önerilen, kinematik ve izotropik pekleşme kurallarının birleştirilerek bir birleşik pekleşme modeli (combined hardening model) önerilmiştir. Bu pekleşme modelinde, izotropik pekleşme Denklem (2.19) ifade edilmektedir.

$$dR = b(Q_\infty - R)d\varepsilon_{eq} \tag{2.19}$$

Burada dR, akma yüzeyin boyutunu belirlemektedir. İzotropik pekleşme modelinde R'nin başlangıç değeri sıfır kabul edilmektedir. Q_∞ parametresi ise akma yüzeyinin boyutundaki maksimum değişimi ifade etmektedir. Eşitlikteki σ_{yo} ise plastik şekildeğiştirmenin sıfır olduğu durumdaki akma yüzeyi boyutunu ifade etmektedir. Q_∞ ve b ise izotropik pekleşme parametreleri olup çevrimsel deneyler yardımı ile elde edilmektedir (ABAQUS, 2016). Jia ve Kuwamura (2013) tarafından yapılan çalışmada, eksenel çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme verileri yardımıyla da Q_∞ ve b izotropik pekleşme parametrelerinin elde edilebileceği belirtilmektedir (Şekil 2.63).



Şekil 2.63. İzotropik pekleşme parametrelerinin kalibrasyonu (Jia ve Kuwamura, 2013)

Eksenel gerilme durumunda akma yüzeyinin boyutu Denklem (2.21) ile tanımlanmaktadır. Kinematik pekleşme ise Denklem (2.22) ile tanımlanmaktadır.

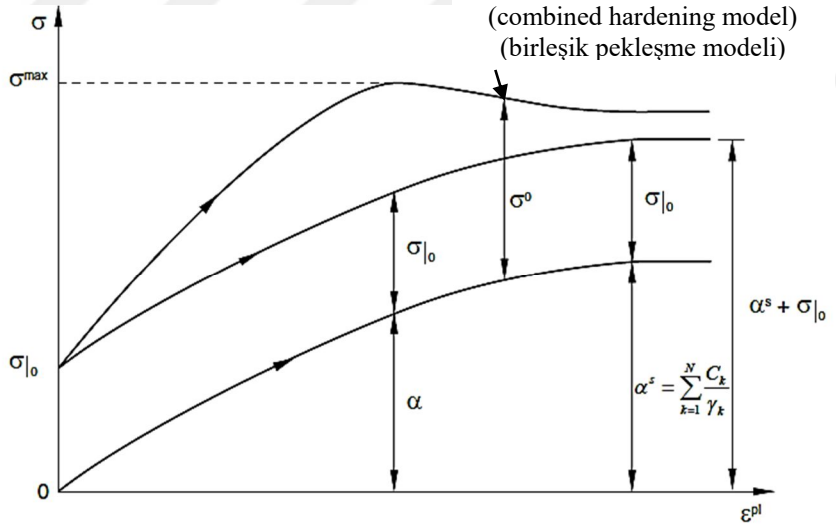
$$\sigma_y = \sigma_{yo} + R = \sigma_{yo} + Q_\infty (1 - e^{-b.\varepsilon_{eq}}) \tag{2.21}$$

$$a = \sum_i^n a_i; \quad a = C_i \frac{1}{\sigma_{yo}} (S - a) d\varepsilon_{eq} + \gamma_i . a_i . \varepsilon_{eq} \tag{2.22}$$

Eksenel gerilme durumunda başlangıç geri gerilme değeri sıfır kabul edildiğinde Denklem (2.22), Denklem (2.23)'e indirgenebilmektedir.

$$a_i = \frac{C_i}{\gamma_i} (1 - e^{-\gamma_i \varepsilon_{pl}}) \tag{2.23}$$

Denklem (2.23)'deki C_i ve γ_i kinematik pekleşme parametreleri olup gerçek gerilme-şekildeğiştirme verileri yardımıyla kalibre edilebilmektedir. Yukarıda detaylı olarak anlatılan izotropik ve kinematik pekleşme durumlarının birleştirilmiş hali olan birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) şematik gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 2.64'de verilmektedir.



Şekil 2.64. Tek eksenli gerilme durumunda birleşik pekleşme modelinin gösterimi (ABAQUS, 2016)

Bu çalışma kapsamında, yukarıdaki bağıntılarla hesaplanan, çeliğin çevrimsel yükleme etkisindeki pekleşme özeliğini tanımlamak için kullanılan parametreler Tablo 2.7'de verilmektedir.

Tablo 2.7. Pekleşme parametreleri

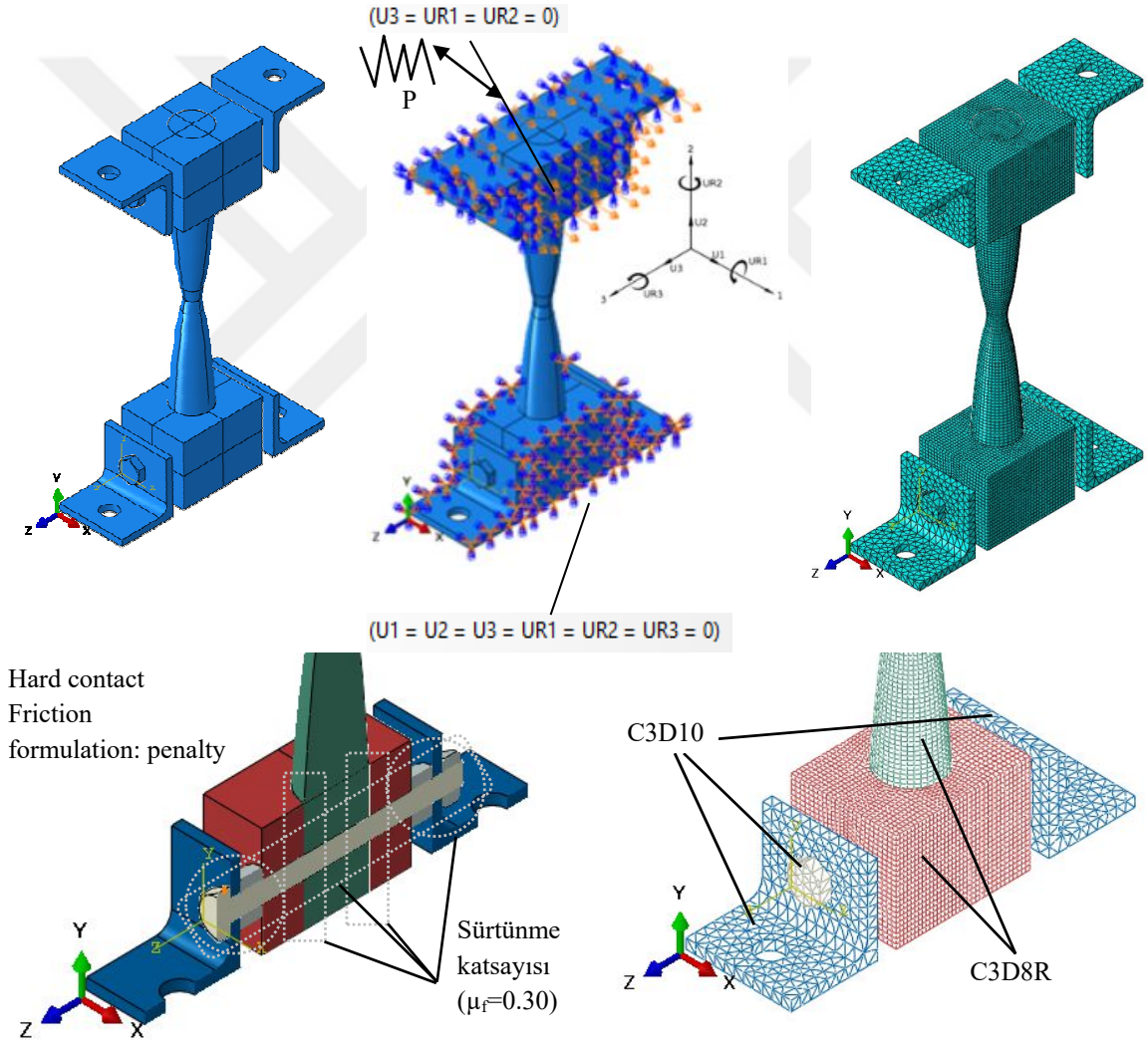
Parametre	KSDE ve KDE çubukların üretiminde kullanılan çelik için	ÇP'lerin üretiminde kullanılan çelik için
σ_{yo}, (MPa)	314.51	301.70
C_1, (MPa)	26.9	7550
C_2, (MPa)	2616.15	15960
C_3, (MPa)	26.9	4500
γ_1	0	250
γ_2	10.7	400
γ_3	0	200
Q_∞, (MPa)	100	-295
b	5.8	4.7
E, (MPa)	186300	194000

2.7.2. Sınır Koşulları ve Yapılan Kabuller

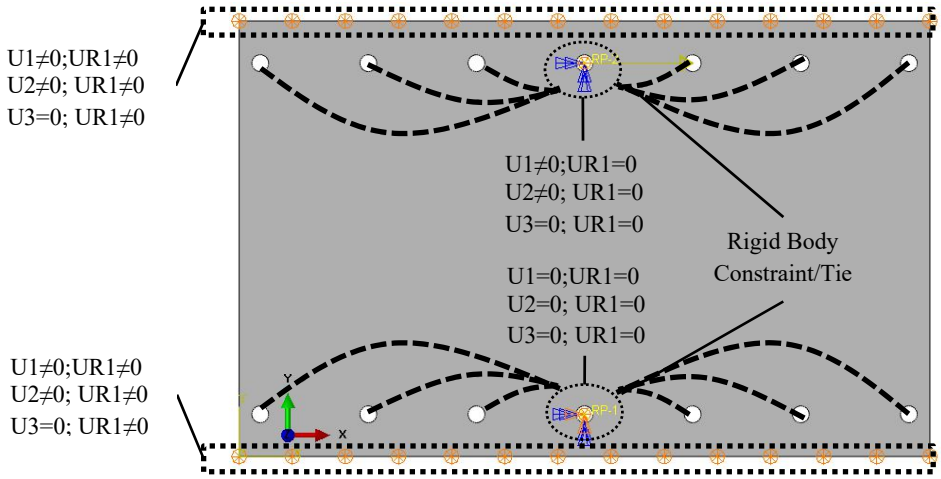
Bir mühendislik probleminin çözümü için gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde, elde edilen sonuçların doğruluğu, modelleme aşamasında söz konusu problemin sınır koşullarının ve yüklemelerin gerçeğe en uygun olarak yansıtılabilmesine bağlıdır. Bu çalışma kapsamında sadece KSDE ve KDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının sayısal modelleri oluşturulurken, çözüm kolaylığı olması ve analiz süresinin azaltılması amacıyla söz konusu deney elemanlarının tamamının modellenmesi yerine tek bir çelik çubuğun modeli dikkate alınmıştır. Şekil 2.65'de sadece çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının sayısal modellerine örnek olarak S-KSDE-1 deney elemanı için oluşturulan modelin görünümü ve özellikleri verilmiştir.

Oluşturulan modellerde birbirine temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı (μ_f) 0.30 olarak seçilmiştir. Sönümleyici elemanların ana parçası olan ve sönümlemeyi geçekleştirilen çelik çubukların ve dairesel yuvalı çelik blokların sonlu eleman ağı, üç boyutlu, sekiz düğüm noktalı, geometrik mertebesi lineer olan ve tek azaltılmış integrasyon noktalı C3D8R sonlu elemanı ile oluşturulmuştur. Bu sonlu eleman tipi, özellikle malzemelerin elastik ötesi davranışlarının modellenmesi durumunda, hem analiz süresini azaltması aynı zamanda göreceli olarak doğru sonuçlar vermesi bakımından tercih edilmiştir. Bağlantı elemanlarının (cıvatalar, köşebentler, pullar) sonlu eleman ağı oluşturulurken ise üç boyutlu, dört adet integrasyon noktası olan toplam on düğüm noktalı, geometrik mertebesi

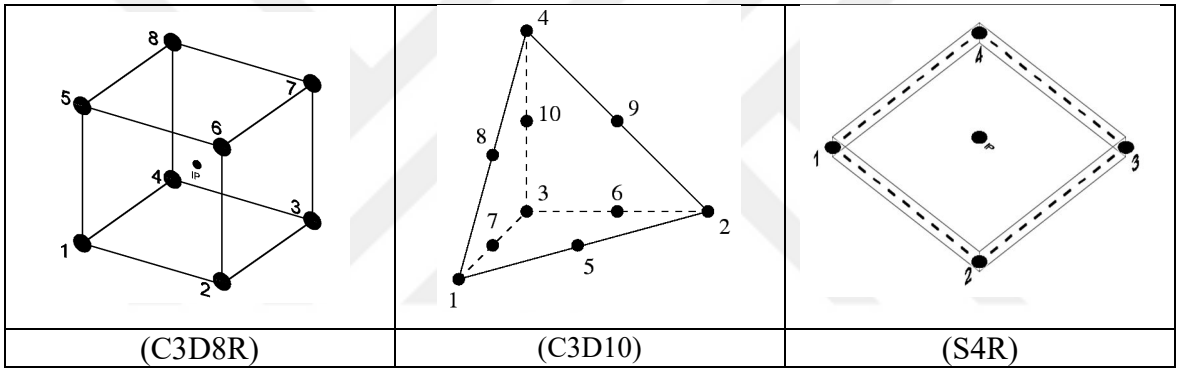
ikinci dereceden olan C3D10 sonlu elemanı kullanılmıştır. Bu sonlu eleman tipi özellikle düzgün olmayan geometrik formların sonlu elemanlara ayrılmasında kolaylık sağladığından tercih edilmiştir. Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarının sayısal modelleri oluşturulurken ise sadece çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının sayısal modellerine benzer olarak aynı sınır ve yükleme koşulları tanımlanmıştır (Şekil 2.66). Çelik plakların sonlu eleman ağı ise dört düğüm noktalı, geometrik mertebesi lineer olan ve azaltılmış integrasyon noktalı S4R kabuk sonlu elemanı ile oluşturulmuştur. Şekil 2.67'de sayısal modellemelerde kullanılan sonlu elemanların şematik görünümleri verilmiştir.



Şekil 2.65. Sadece çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının sayısal modellerine örnek olarak S-KSDE-1 elemanının görünümü ve özellikleri



Şekil 2.66. Çelik plakaların sonlu eleman analizlerinde dikkate alınan sınır koşulları



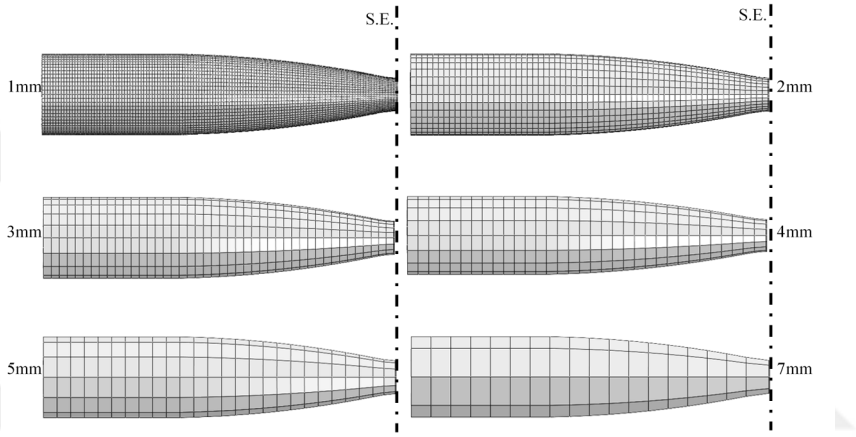
Şekil 2.67. Sayısal modellemelerde kullanılan sonlu elemanların şematik görünümleri

2.7.3.Yakınsama Çalışmaları

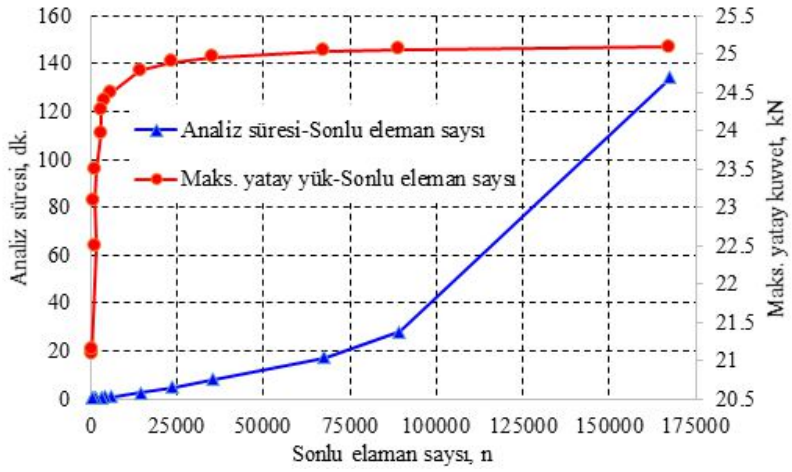
2.7.3.1. KSDE ve KDE Çelik Çubuklar İçin Yakınsama Çalışması

Sonlu eleman modelleri oluşturulurken en önemli parametrelerden biri de sonlu eleman tipinin ve boyutunun belirlenmesidir. Yaklaşık bir çözüm sunan sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar; çözüm yöntemine, tanımlanan sınır koşullarına, sonlu eleman tipine ve boyutlarına göre değişebilmektedir. Özellikle malzemelerin elastik ötesi davranışlarının incelendiği durumlarda bu parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi daha önemli olmaktadır. Genel olarak seçilen sonlu eleman tipinin serbestlik derecesinin artmasıyla, doğru sonuca yakınsaklık artmaktadır. Buna ek olarak, serbestlik derecesinin artması analiz süresini yüksek oranda arttırabilmektedir. Bu nedenle optimum yakınsaklık-

analiz süresi ilişkisinin belirlenebilmesi için bir yakınsama çalışmasının (convergence study) yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, tek bir KSDE-30/12 çelik çubuğun, farklı sonlu eleman boyutlarına ayrılarak (Şekil 2.68), statik itme yüklemesi altındaki sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir sonlu eleman boyutu için statik itme analizleri tekrarlanmış ve 30.0 mm yerdeğiştirmeye karşılık gelen maksimum yük değerleri dikkate alınarak yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Yakınsama çalışması sonucunda, çelik çubukların sonlu eleman analizlerinde kullanılacak optimum sonlu eleman ağı boyutu 1.50 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2.69).



Şekil 2.68. KSDE-30/12 çelik çubuğun, farklı sayıda sonlu elemana bölünmüş hali (C3D8R)



Şekil 2.69. Yakınsama çalışması (KSDE ve KDE çelik çubuklar)

2.7.3.2. Çelik Plakalar İçin Yakınsama Çalışması

Çelik yapı elemanlarında, üretim aşamasındaki kalite kontrol eksiklikleri, hata toleranslarının büyüklüğü, taşıma-iletim vb. nedenlerden dolayı kusurlar oluşabilmektedir. Bu kusurlar, malzeme kusurları ve geometrik kusurlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Malzeme kusurları, malzemenin elastik ötesi davranışına etki eden ana faktörlerden biridir. Genel olarak, haddelenmiş çelik bir elemanın soğutma işleminin yeterince homojen olarak yapılamaması sonucunda artık gerilmeler (residual stresses) oluşabilmektedir (Geschwindner vd., 1994). Bu gerilmeler elemanın kritik burkulma yükünü ve yorulma dayanımı azaltmaktadır. Geometrik kusurlar ise malzeme kusurlarına neden olan homojen olmayan soğutma işlemi sonucunda oluşabilmektedir. Aynı zamanda taşıma-iletim sırasında ve montaj aşamasında elemanda oluşan geometrik değişimler de geometrik kusurlara neden olmaktadır. Burkulma gibi yapı elemanlarında ani geometrik değişimlere ve dayanım azalmalarına neden olan durumlarda yapının ve/veya yapı elemanının mekanik davranışları üzerinde söz konusu kusurlar etkili olmaktadır. Özellikle, ince cidarlı ve kalınlığı göreceli olarak az olan; sac, kabuk vb. yapı elemanları burkulma esnasında söz konusu kusurlara karşı diğer yapı elemanlarına kıyasla daha hassas davranmaktadır. Yapı elemanlarında elastik ötesi burkulma davranışlarının tahmin edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde söz konusu kusurların tanımlanması, daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi bakımından önemlidir. Sonlu eleman modelleri oluşturulurken kusurların tanımlanması için yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; mevcut kusurların bir periyodik dalga olarak (sinüs dalgası) tanımlanması (Aktas, 2004) ve kusursuz olduğu varsayılan yapı elemanın ve/veya sistemin elde edilen burkulma mod şekillerinin farklı tekniklerle ölçeklendirilerek geometrik kusur olarak tanımlanmasıdır (Thomas ve Earls, 2003).

Bu çalışma kapsamında, sönümleyici tasarımlarında kullanılan çelik plakaların elastik ötesi çevrimsel yükleme altındaki burkulma davranışlarının sayısal olarak elde edilmesi amacıyla geçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde ikinci yöntem kullanılmıştır. Elastik ötesi burkulma analizlerinin aşamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1.Adım; Elemanın elastik bölgedeki malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanarak birim yükleme altında söz konusu elemanının kusursuz geometrisi dikkate alınarak elastik burkulma analizi gerçekleştirilmiş ve ilk 10 mod için özdeğerler ve (mod şekilleri) özdeğer vektörleri elde edilmiştir.

2.Adım; Elastik burkulma analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri ölçeklendirilerek çelik plakalara geometrik kusur olarak tanımlanmıştır.

Genellikle düşük özdeğerlere sahip burkulma mod şekillerinin, elemanın ve/veya yapının göçmesine sebep olabilecek kritik kusurlarla benzeştiği varsayılmaktadır (ABAQUS, 2016). Dolayısıyla, farklı oranlarda ölçeklendirilen birden çok mod şeklinin süperpozisyonu gerçek davranışa en yakın sonuçlar elde edilmesine yardım etmektedir (Denk. 2.23).

$$\Delta_{xi} = \sum_{i=1}^{M} \omega_i \phi_i \tag{2.23}$$

Burada, ϕ_i , i. Mod için mod şeklini, ω_i ise i. mod için ölçek değerini ifade etmektedir.

Literatürde farklı çelik yapı elemanları için geometrik kusurların büyüklüklerinin tanımlanması amacıyla farklı modeller önerilmiştir (bkz. Asharf vd., 2006).

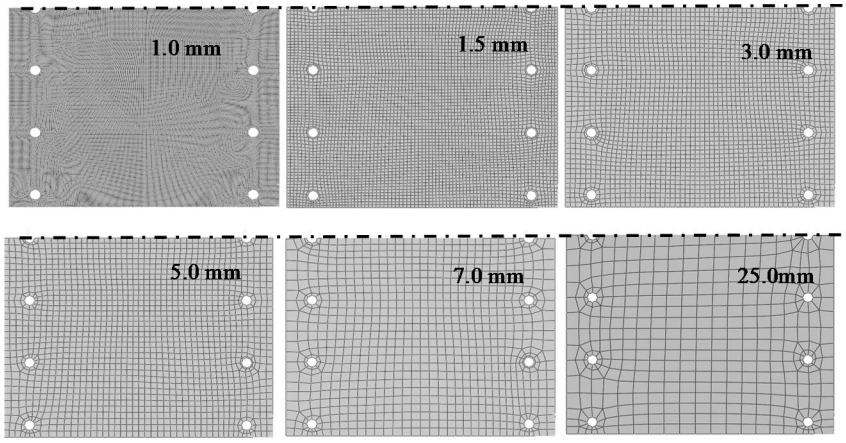
Denklem (2.24)'den de görüleceği gibi çelik plakaların kritik elastik burkulma dayanımını (σ_{cr}) etkileyen en önemli geometrik parametrelerden biri narinlik oranıdır (β) (Denklem (2.25)).

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 E}{12\beta(1-\nu^2)} \tag{2.24}$$

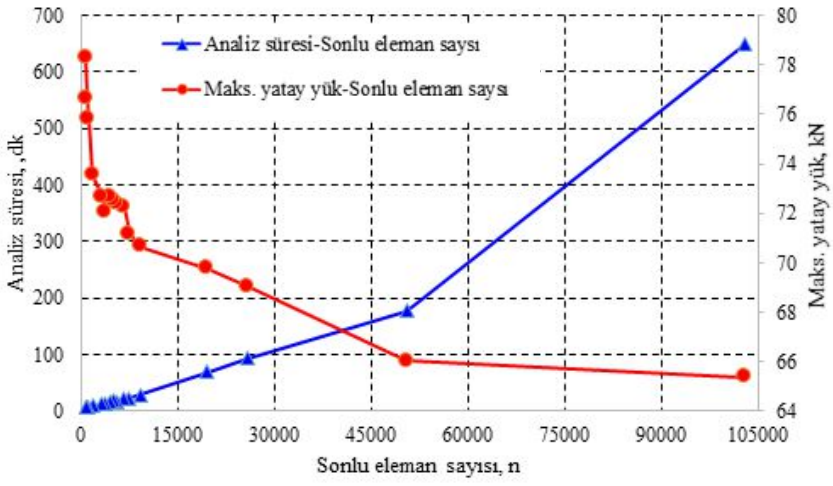
$$\beta = \frac{h_p}{t} \tag{2.25}$$

Burada, k_s , plaka burkulma katsayısını, E , elastisite modülünü, ν , poisson oranını, β ise narinlik oranını ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında tüm çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici tasarımlarında, plaka yükseklikleri (h) sabit olduğundan, sonlu eleman analizlerinde tanımlanan geometrik kusur büyüklükleri, plaka kalınlığı (t) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Genel olarak seçilen sonlu eleman tipinin serbestlik derecesinin artmasıyla, doğru sonuca yakınsaklık artmaktadır. Buna ek olarak, serbestlik derecesinin artması analiz süresini yüksek oranda arttırabilmektedir. Dolayısıyla optimum yakınsaklık-analiz süresi ilişkisinin belirlenebilmesi için bir yakınsama çalışmasının yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, tek bir 1.50 mm (t=1.50 mm) kalınlığındaki çelik plaka, farklı sonlu eleman boyutlarına ayrılarak (Şekil 2.70), statik itme yüklemesi altındaki sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde sönümleyici tasarımlarında kullanılan çelik plakaların sınır koşulları, deney koşullarını yansıtacak şekilde KSDE ve

KDE çelik çubukların sınır koşullarına benzer olarak tanımlanmıştır. Yakınsama çalışmasında, elastik ötesi burkulma davranışının elde edilmesi amacıyla çelik plakalara tanımlanan geometrik kusurlar ise 1. ve 2. mod şekilleri dikkate alınarak çelik plaka kalınlığının (t=1.50 mm), %1.0'i olacak şekilde 0.015 olarak tanımlanmıştır. Her bir sonlu eleman boyutu için statik itme analizleri tekrarlanmış ve 30.0 mm yerdeğiştirmeye karşılık gelen maksimum yük değerleri dikkate alınarak yakınsama çalışması gerçekleştirilmiş ve optimum sonlu eleman boyutu 1.50 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2.71).



Şekil 2.70. Çelik plakaların farklı sayıda sonlu elemana bölünmüş hali (S4R)



Şekil 2.71. Yakınsama çalışması (çelik plakalar)

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında, kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubuklardan oluşan üç adet sönümleyici, konik şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubuklardan oluşan üç adet sönümleyici ve çelik plakalardan (ÇP) oluşan üç adet sönümleyici tasarlanmıştır. Ayrıca, KSDE çelik çubuklar ile çelik levhaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) ve iki bileşenli enerji sönümleyici tasarımındaki çelik çubukların yüzeyinin tasarımda kullanılan çelik plakaların arasına poliüretan elastomer dolgu dökülmesi ile kaplanarak üretilen üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) olmak üzere toplam 11 adet sönümleyici üretilmiştir. Deneyler süresince, deney düzeneğine mesnetlenen deney elemanlarına FEMA 461'de belirtilen sınırlamalara uygun olarak oluşturulan çevrimsel yükleme protokolü uygulanmıştır. Yük hücresi, doğrusal potansiyometreler (DP) ve gerinim pulları (GP) yardımıyla yatay yük (F), yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, veri toplama cihazı ile sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Bu başlık altında, deney elemanlarının çevrimsel yatay yükleme etkisindeki davranışlarının elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal çalışmalardan da elde edilen bulgular ile bu bulgular ışığında yapılan irdelemeler verilmektedir.

3.2. Deney Elemanlarının Çevrimsel Yükleme Etkisindeki Davranışları

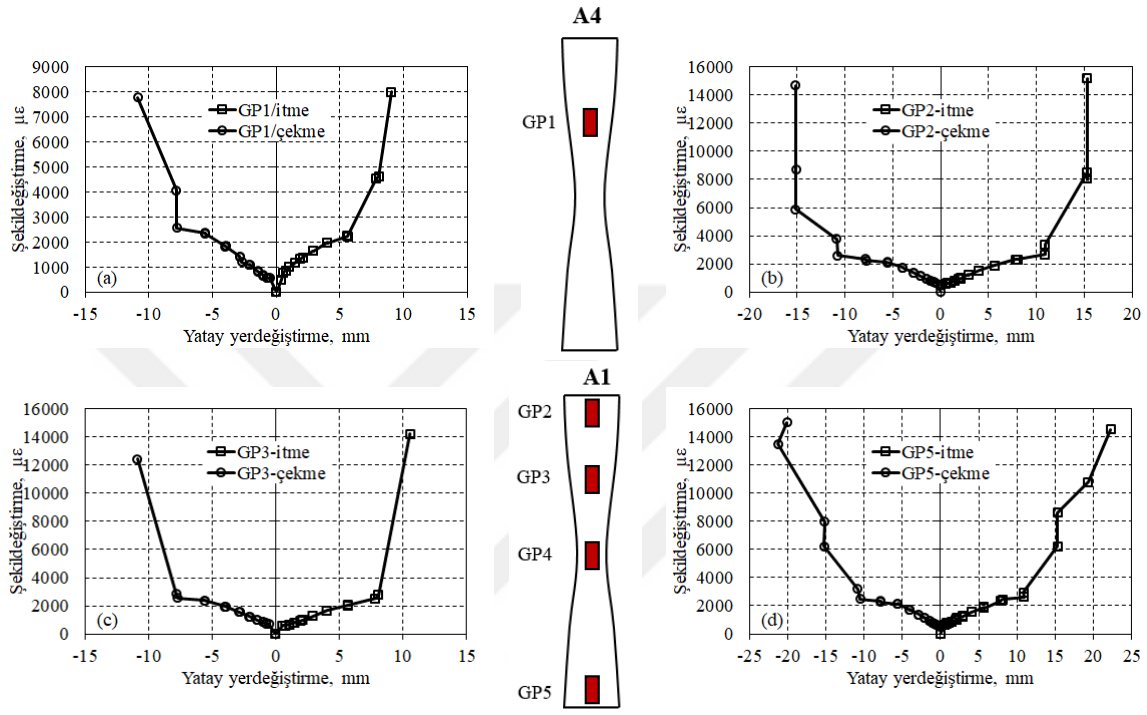
3.2.1. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-1)

Kum saati şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 12 mm olan çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-KSDE-1) görümleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirme değerlerini elde etmek amacıyla A1 ve A4 numaralı çelik çubuklara gerinim pulları (GP) yapıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde de verildiği gibi çubuk boyunca

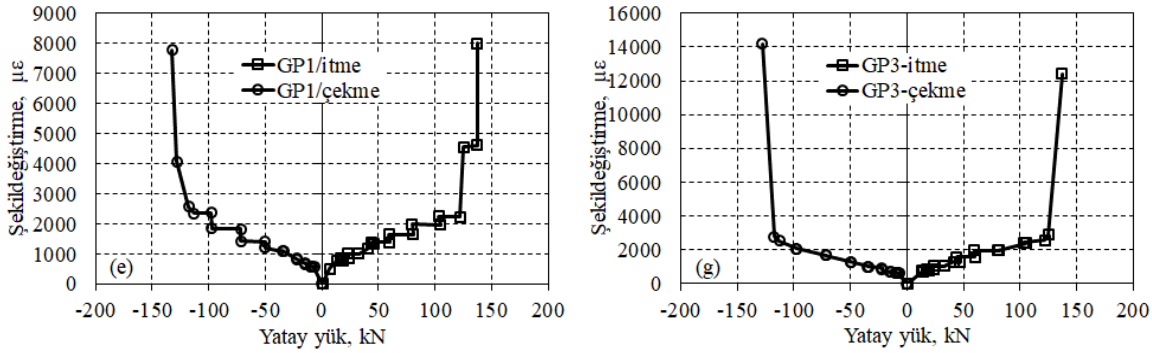
şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için A1 numaralı çubuğa dört adet (GP2, GP3, GP4, GP5), çubuklar arasında yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için ise A4 numaralı çubuğa bir adet (GP3'ün karşılığı) GP yapıştırılmıştır (GP1). A1 numaralı çubuğun yükseklik ortasına yapıştırılan GP'den anlamlı sonuç alınamamıştır. A1 çubuğuna yapıştırılan GP3 ve A4 numaralı çubuğa yapıştırılan GP1'den benzer sonuçlar alınmıştır. A1 numaralı çubuğun alt ve üst mesnet bölgelerine yakın olacak şekilde yapıştırılan GP2 ve GP5'den de benzer şekildeğiştirme ölçümleri alınmıştır. Yapıştırılan GP'ler yardımıyla elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.2'de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000 με (10^{-6} mm/mm) değerinde şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi yataylaşmaya başlamıştır. Çelik çubuklarda oluşan 2000 με şekildeğiştirme değeri A1 numaralı çubukta çekmede 3.90 mm, A4 numaralı çubukta ise itmede 4.02 mm yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (Şekil 3.2-(a, c)).Yedinci yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler 2747 με'na, yerdeğiştirmeler ise itmede 5.50 mm'ye ulaştığında akma yükü 103.20 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.3).

Şekil 3.1. S-KSDE-1 deney elemanının görünümleri

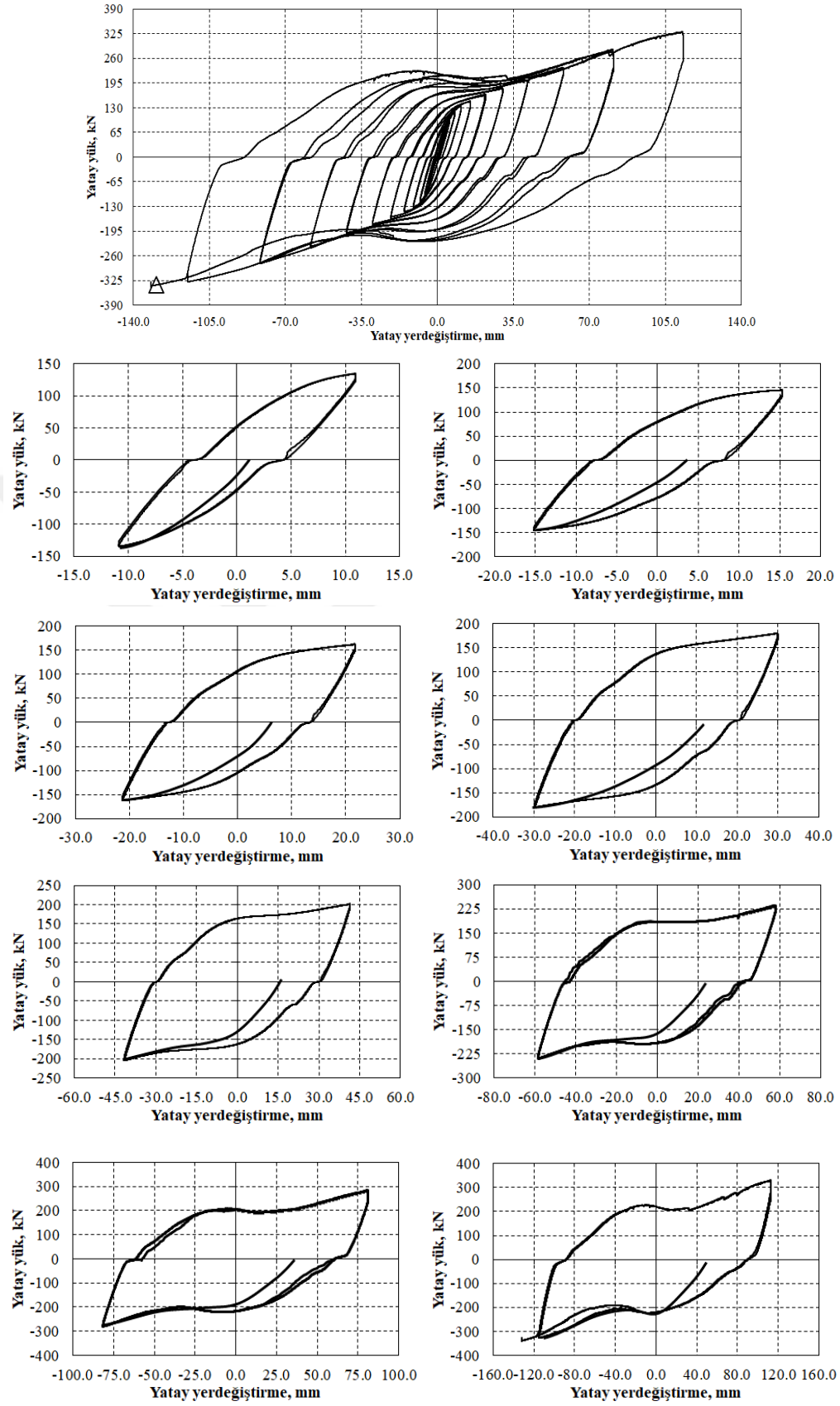
S-KSDE-1 deney elemanının çevrimsel yükleme etkisinde, yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.



Şekil 3.2. A1 ve A4 numaralı çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri

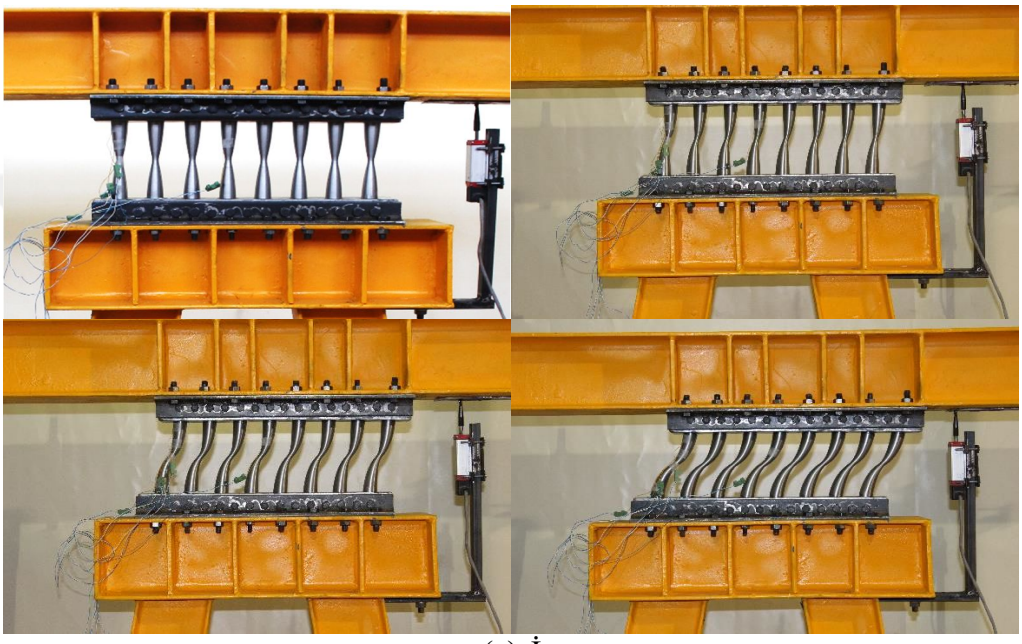


Şekil 3.3. A1 ve A4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük eğrileri



Şekil 3.4. S-KSDE-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, deney elemanının akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (5.50 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanımı da artmıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımına (≈80.9 mm) kadar KSDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.5). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 238.8 kN, çekmede ise 236.8 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 131.4 artmıştır.



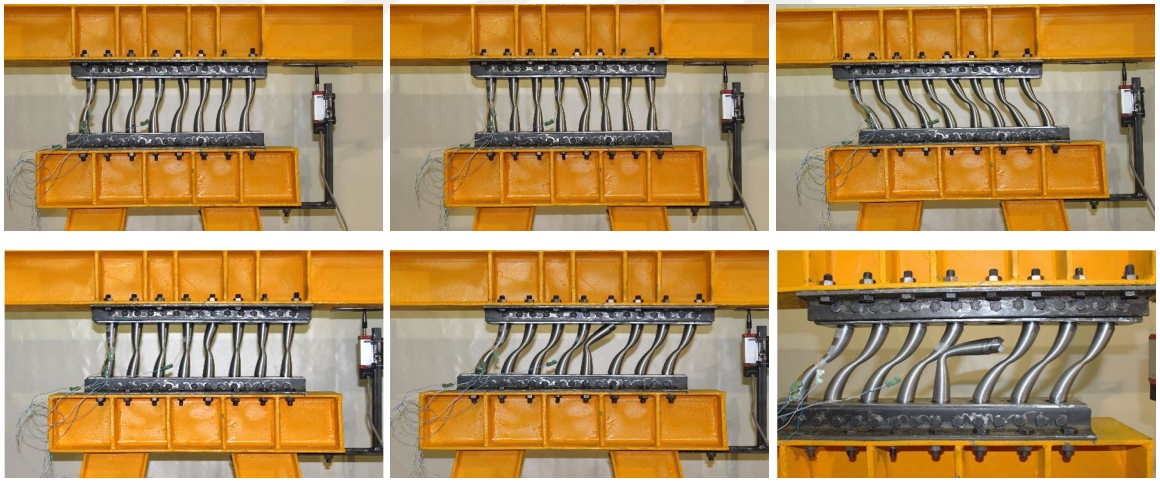
(a) İtme

(b) Çekme

Şekil 3.5. S-KSDE-1 elemanının deney anından görünümleri

On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise çelik çubukların mesnetlendiği bölgelerde oluşan hasarlar gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 3.6). Ancak yük taşıma kapasitesinde önemli oranda bir düşüş olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 286.56 kN, çekmede ise 277.85 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 177.7 artmıştır.

On yedinci yerdeğiştirme adımına (≈113 mm) gelindiğinde, KSDE çelik çubukların mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Ayrıca, A5 numaralı KSDE çelik çubuğun mesnetlendiği üst bloktan ayrıldığı gözlemlenmiştir (bk. Şekil 3.6). Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanının dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 332.77 kN ve 326.29 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 222.46 artmıştır.

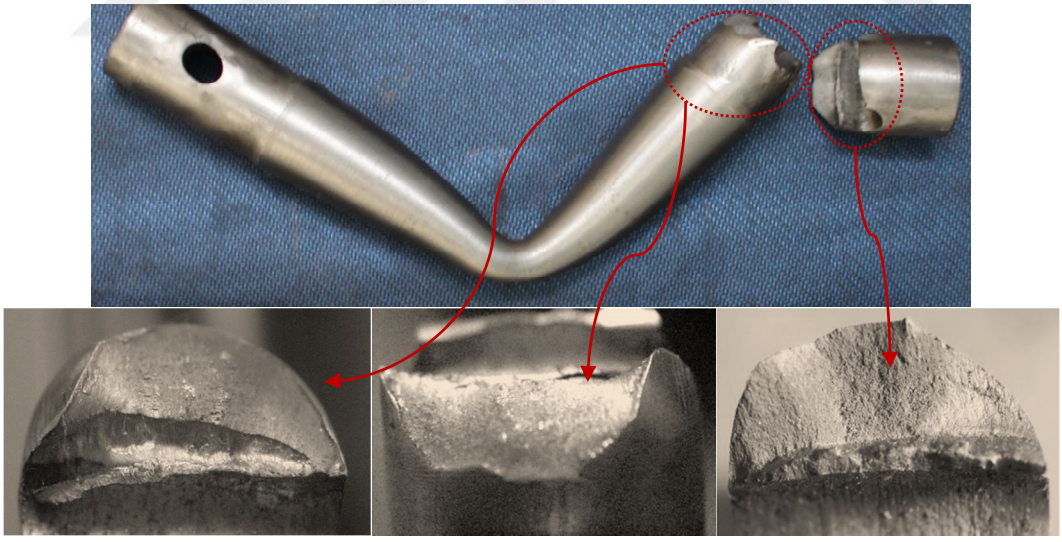


Şekil 3.6. S-KSDE-1 elemanının deney anından görünümleri (hasar oluşumları)

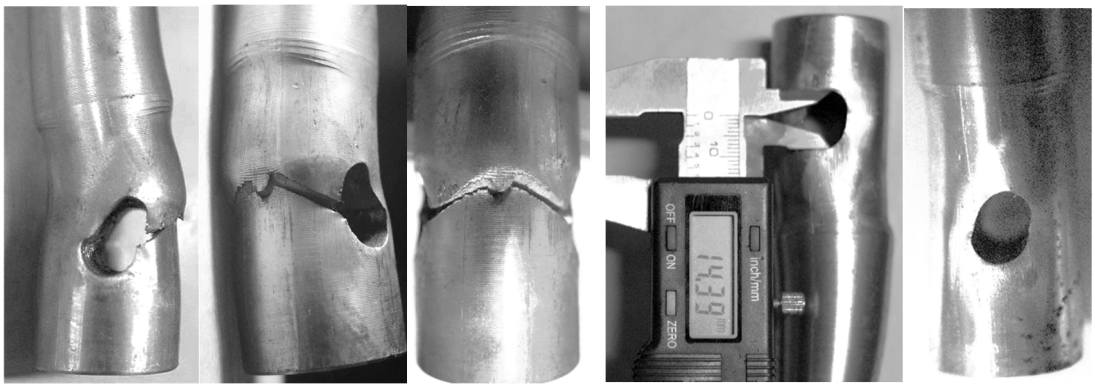
Yükleme protokolünün tamamlanmasının ardından, deney elemanına yük taşıma kapasitesini kaybedene kadar statik itme yüklemesi uygulanmıştır. Çekmede 131.8 mm yerdeğiştirme değerine ulaşıldığında, yatay yük değeri 341.6 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanın yük taşıma kapasitesi, akma yüküne göre % 231 arttığı görülmüştür. A1, A2, A6 ve A7 numaralı çelik çubuklar mesnetlendikleri üst bloktan, A5 ise alt bloktan ayrılmıştır (Şekil 3.7). Bu durumda deney sonlandırılmıştır. Şekil 3.8.'de benzer göçme durumuna sahip çelik çubukların hasar durumlarına örnek olarak A5 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri verilmiştir. Şekil 3.9'da ise çubukların

mesnet bölgelerindeki hasarların oluşumuna örnek olarak A6 ve A8 numaralı çelik çubukların hasar durumları verilmiştir. Ayrıca KSDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarların yanı sıra A2, A5 ve A7 numaralı çelik çubukların yükseklik ortasına yakın bölgelerde eğilme etkisiyle çekme gerilmelerinden dolayı çatlamalar meydana gelmiştir (Şekil 3.10). Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında ciddi bir hasar oluşmamıştır. Şekil 3.11'de deneyin son aşamalarına ait bir görünüm verilmiştir.

Şekil 3.7.KSDE çelik çubuklarda oluşan hasarlar

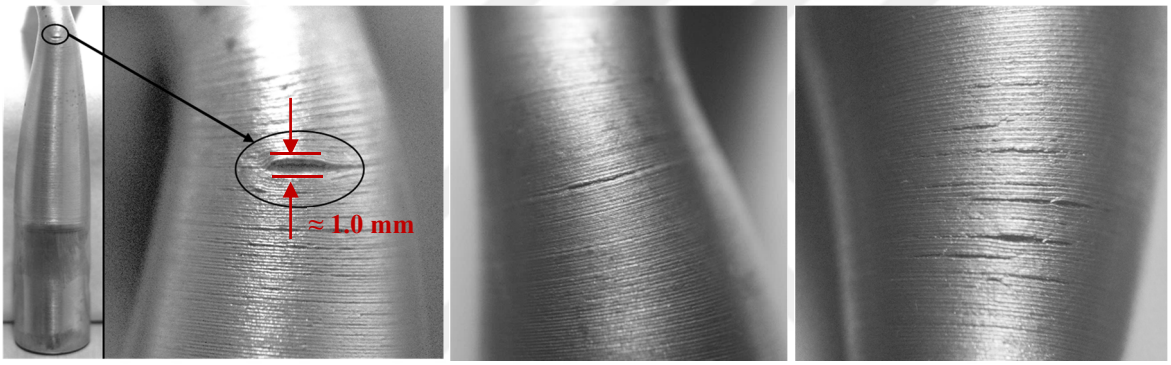


Şekil 3.8. A5 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri

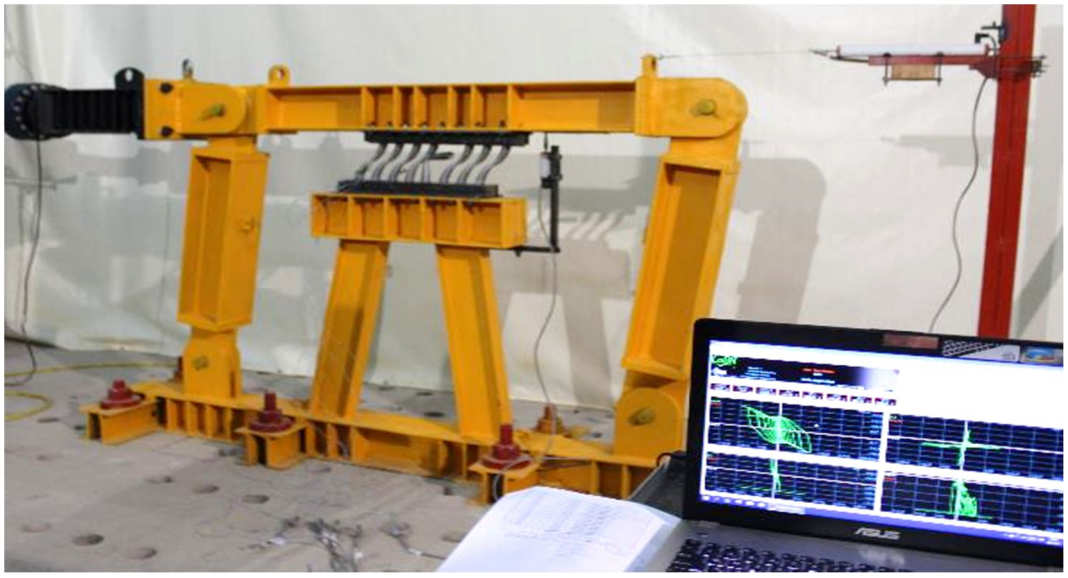


(a) A6 numaralı çubuk (b) A8 numaralı çubuk

Şekil 3.9. A6 ve A8 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar



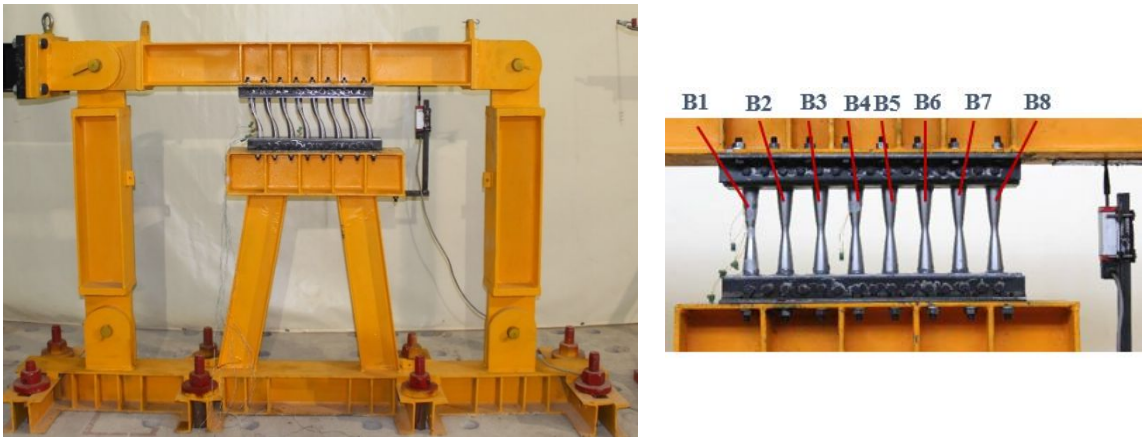
Şekil 3.10. A2, A5 ve A7 numaralı çelik çubukların yükseklik ortasına yakın bölgelerdeki çatlamalar



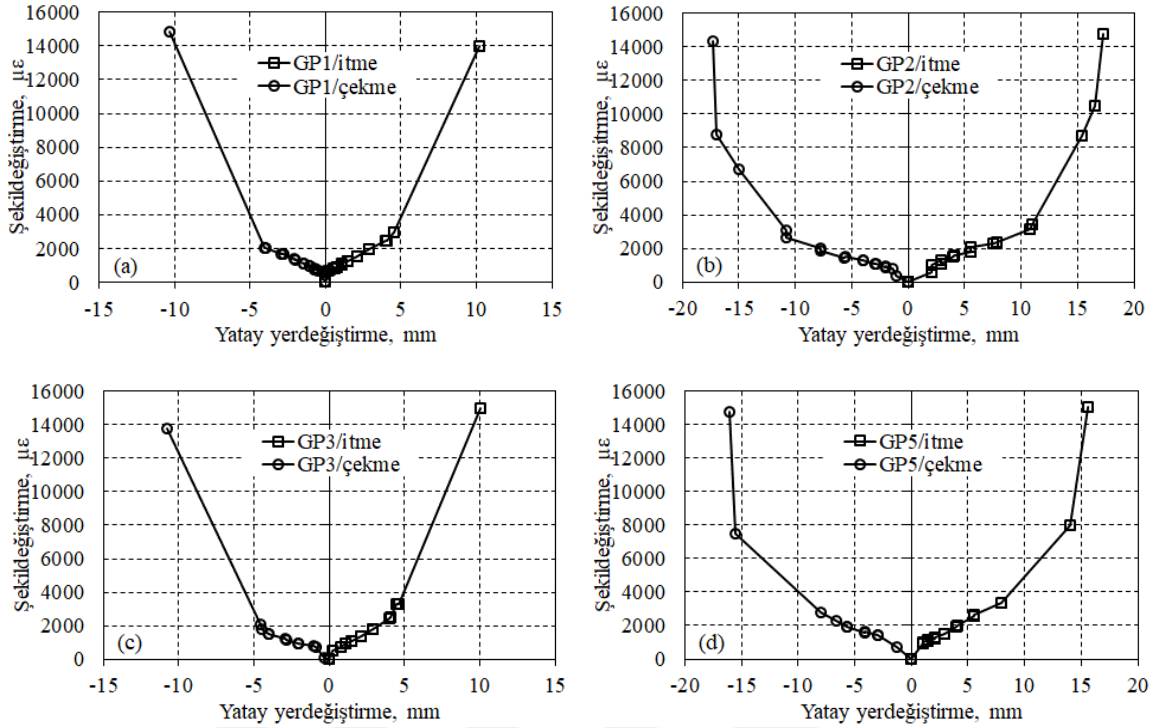
Şekil 3.11. Deneyin son aşamasına ait bir görünüm

3.2.2. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-2)

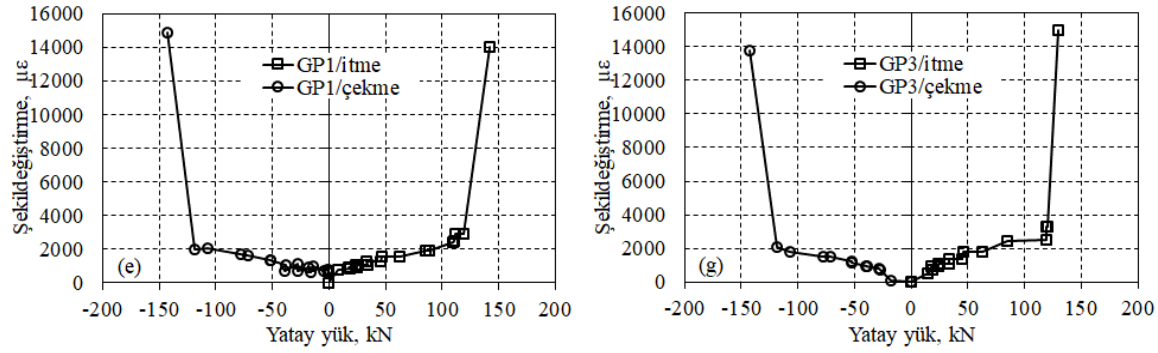
Kum saati şekilli dairesel enkesitli, yüksek ortası çapı 14 mm olan çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-KSDE-2) görümleri Şekil 3.12'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirme değerlerini elde etmek amacıyla B1 ve B4 numaralı çelik çubuklara gerinim pulları (GP) yapıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde de verildiği gibi çubuk boyunca şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için B1 numaralı çubuğa dört adet (GP2, GP3, GP4, GP5), çubuklar arasında yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için ise B4 numaralı çubuğa bir adet (GP3'ün karşılığı) GP yapıştırılmıştır (GP1). B1 numaralı çubuğun yükseklik ortasına yapıştırılan GP'den anlamlı sonuç alınamamıştır. B1 çubuğuna yapıştırılan GP3 ve B4 numaralı çubuğa yapıştırılan GP1'den benzer sonuçlar alınmıştır. B1 numaralı çubuğun alt ve üst mesnet bölgelerine yakın olacak şekilde yapıştırılan GP2 ve GP5'den de benzer şekildeğiştirme ölçümleri alınmıştır. Yapıştırılan GP'ler yardımıyla elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.13'te görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000 με (10^{-6} mm/mm) değerinde şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi yataylaşmaya başlamıştır. Çelik çubuklarda oluşan 2000 με şekildeğiştirme değeri A1 numaralı çubukta çekmede 2.92 mm, A4 numaralı çubukta ise itmede 2.89 mm yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.13-(a, c)).Yedinci yerdeğiştirme adımından sonra şekildeğiştirmeler 2941 με'a, yerdeğiştirmeler ise itmede 4.57 mm'ye ulaştığında akma yükü 119.10 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.12. S-KSDE-2 deney elemanının görünümleri

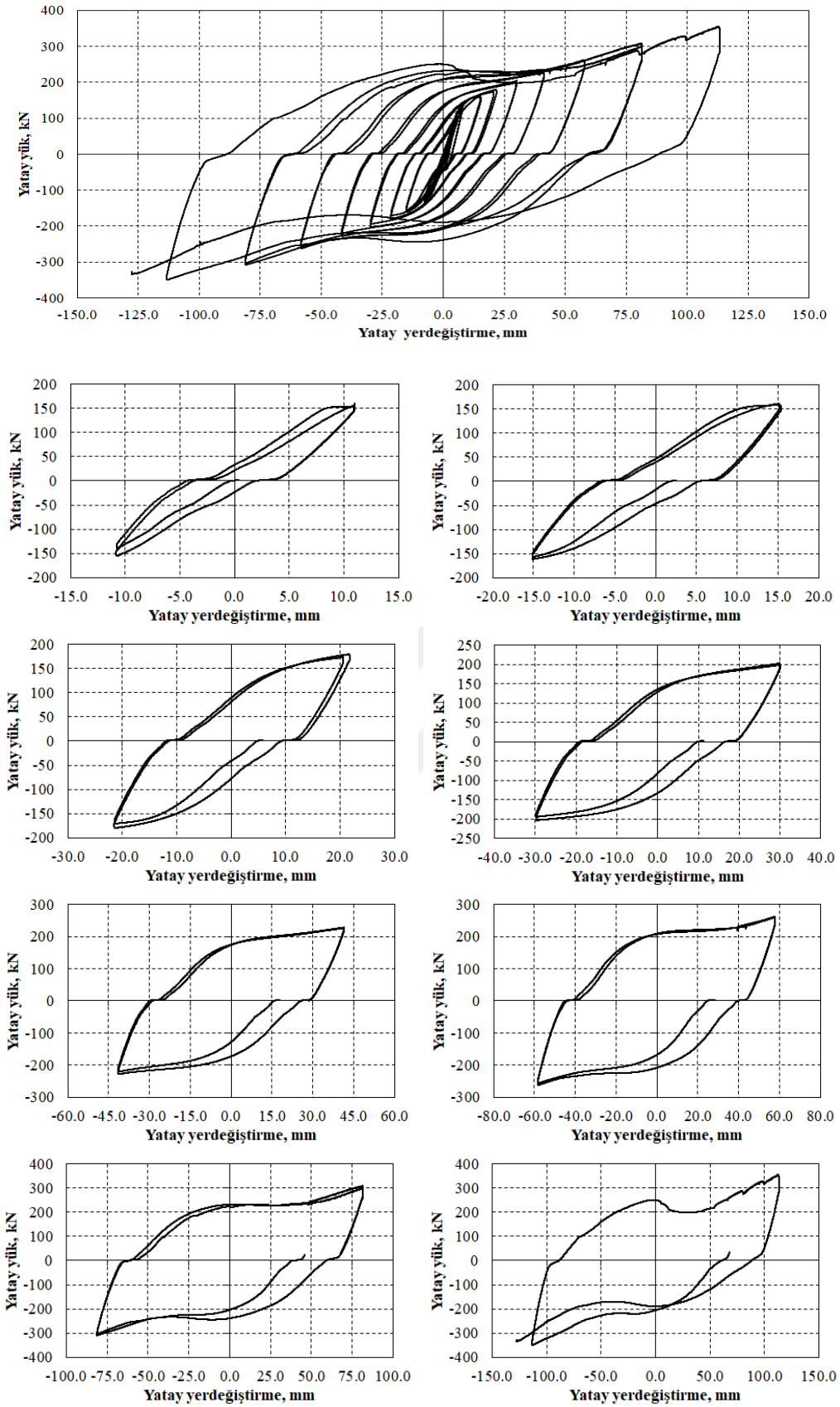


Şekil 3.13. B1 ve B4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri



Şekil 3.14. B1 ve B4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri

S-KSDE-2 deney elemanının çevrimsel yükleme etkisinde, yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.16'da verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.



Şekil 3.15. S-KSDE-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.15'te görüldüğü gibi deney elemanı akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (4.57 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanımı da artmıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımına (≈80.9 mm) kadar KSDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.16). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 262.14 kN, çekmede ise 262.63 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 120.51 artmıştır.

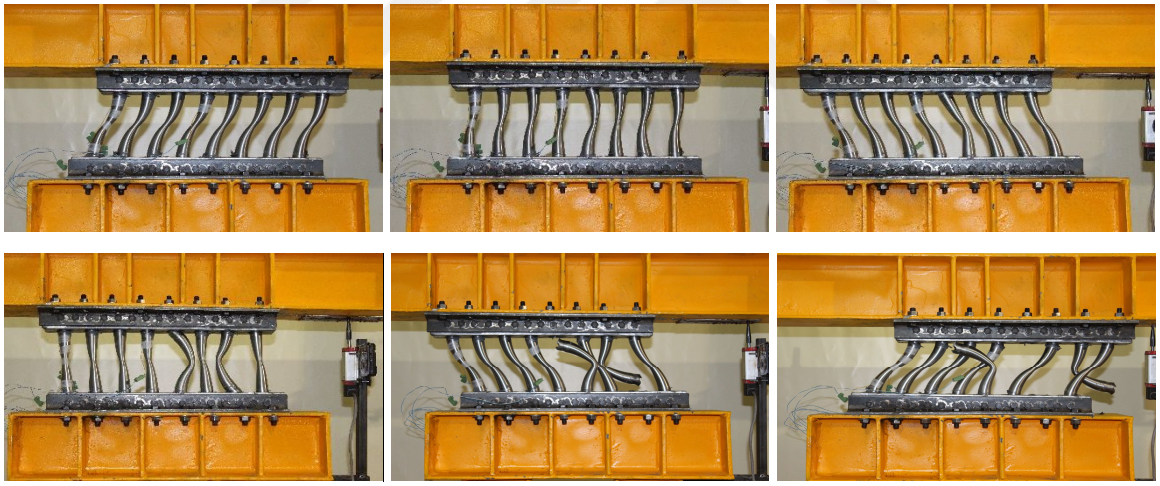
(a) İtme

(b) Çekme

Şekil 3.16. S-KSDE-2 elemanının deney anından görünümleri

On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 3.17). Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 308.21 kN, çekmede ise 308.44 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 158.9 artmıştır.

On yedinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈113 mm), KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Ayrıca, B5 ve B7 numaralı KSDE çelik çubukların mesnetlendiği dairesel yuvalı çelik bloklardan ayrıldığı gözlemlenmiştir (bk. Şekil 3.17). Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanın dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 355.60 kN ve 349.92 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 198.57 artmıştır.

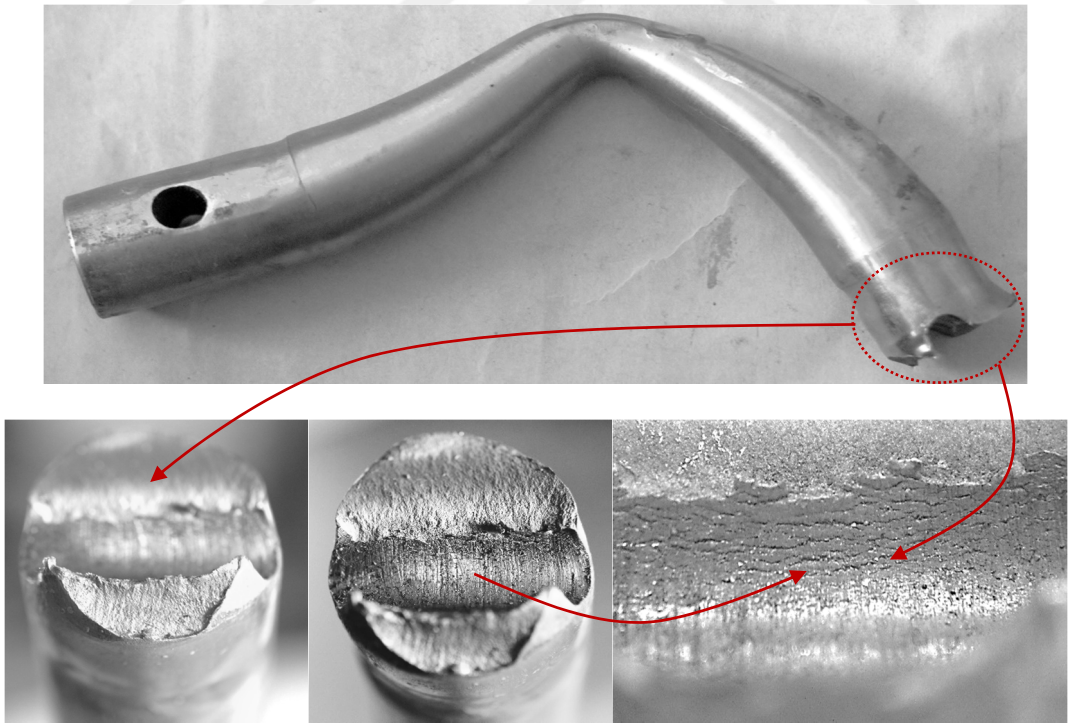


Şekil 3.17. S-KSDE-2 elemanının deney anından görünümleri (hasar oluşumları)

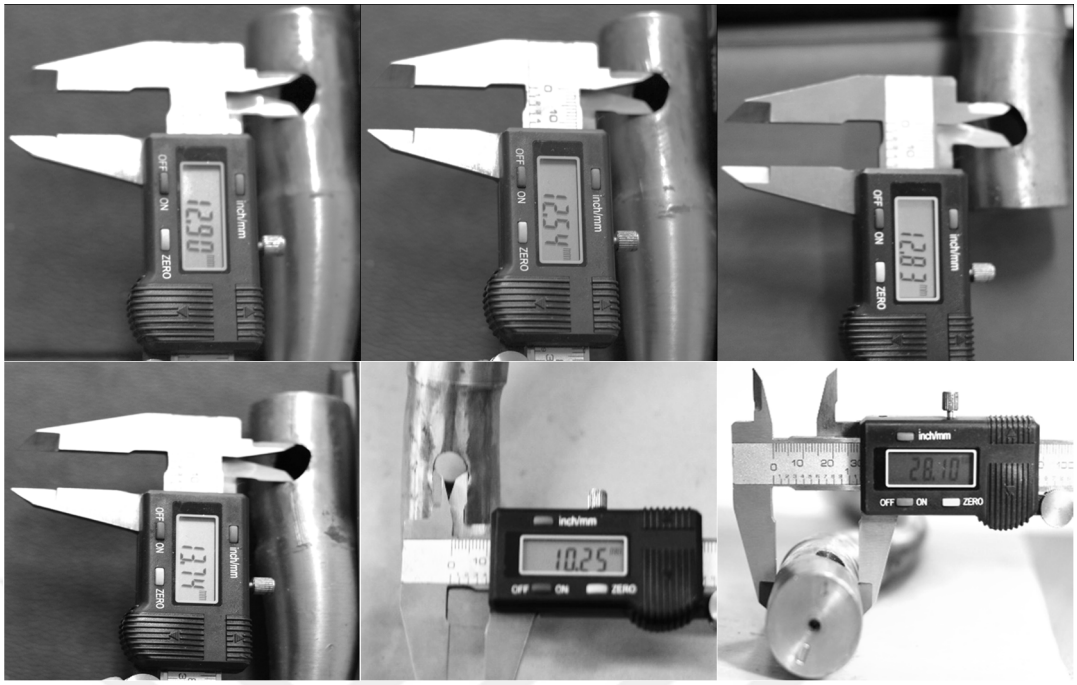
Yükleme protokolünün tamamlanmasının ardından, deney elemanı yük taşıma kapasitesini kaybedene kadar statik itme yüklemesi uygulanmıştır. Çekmede 127.52 mm yerdeğiştirme değerine ulaşıldığında, yatay yük değeri 333.03 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanından elde edilen yatay yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre 22.57 kN azalmıştır. B1, B2 ve B7 numaralı KSDE çelik çubuklar mesnetlendikleri dairesel yuvalı alt çelik bloktan, B5 ise dairesel yuvalı alt çelik bloktan ayrılmıştır (Şekil 3.18). Bu durumda deney sonlandırılmıştır. Şekil 3.19'da benzer göçme durumuna sahip

çelik çubukların hasar durumlarına örnek olarak B5 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri verilmiştir. Şekil 3.20'de ise çubukların mesnet bölgelerindeki hasarların oluşumuna örnek olarak B3, B4, B6 ve B8 numaralı çelik çubukların cıvata yuvalarında oluşan hasarların detaylı görünümleri verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır.

Şekil 3.18. KSDE çelik çubuklarda oluşan hasarlar



Şekil 3.19. B5 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri

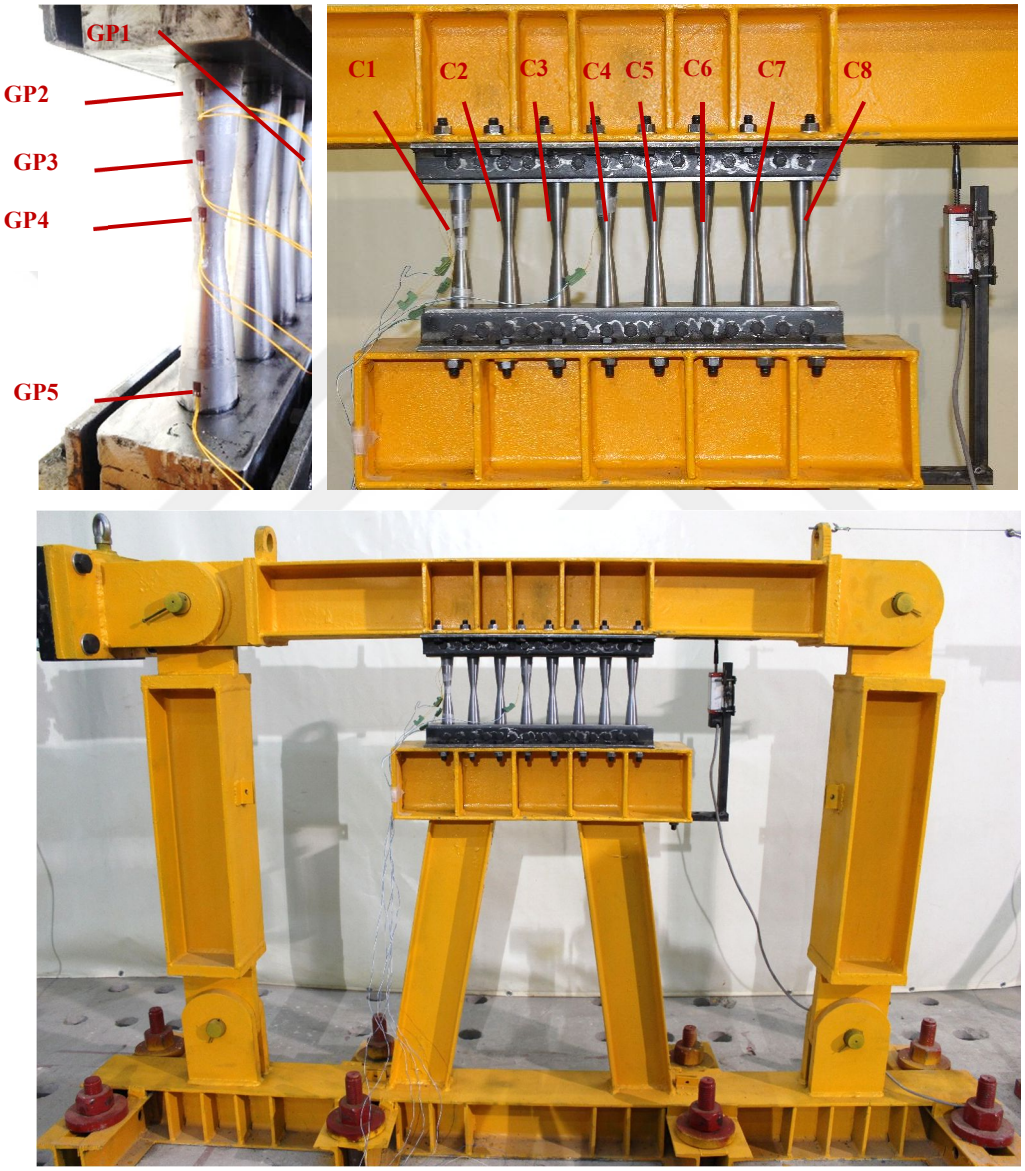


Şekil 3.20. B3, B4, B6 ve B8 numaralı çelik çubukların mesnet bölegelerinde oluşan hasarlar

3.2.3. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-3)

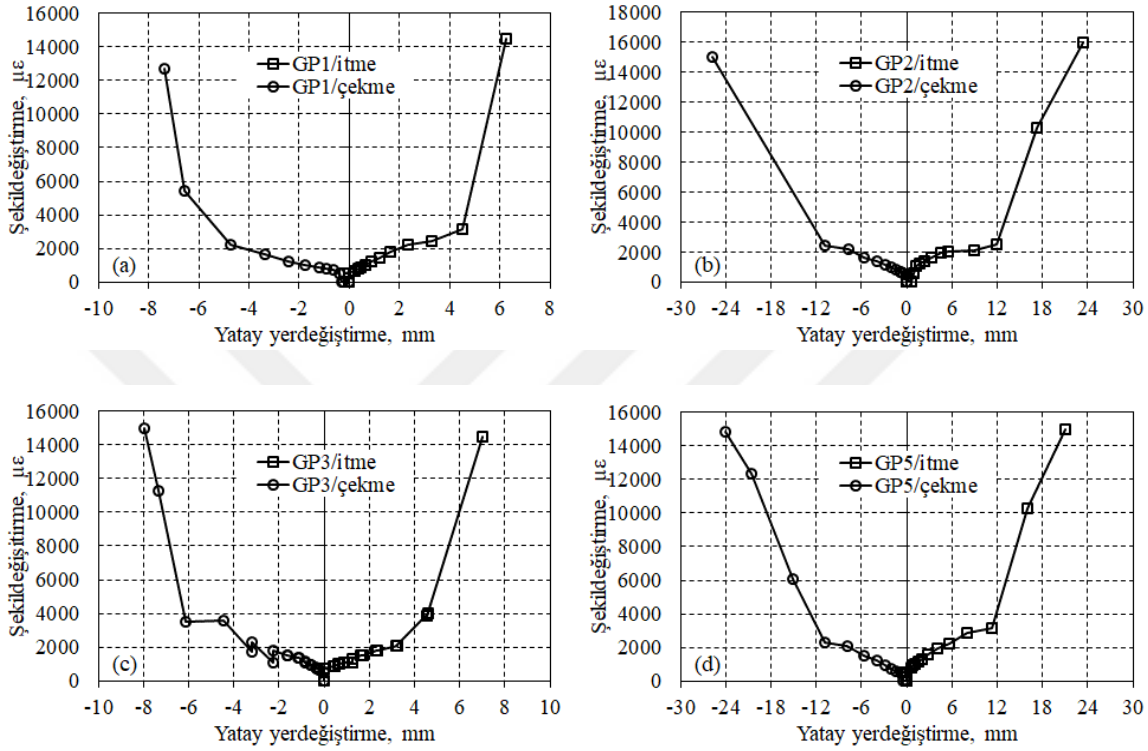
Kum saati şekilli dairesel enkesitli, yüksek ortası çapı 16 mm olan çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-KSDE-3) görümleri Şekil 3.21'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirme değerlerini elde etmek amacıyla C1 ve C4 numaralı çelik çubuklara gerinim pulları (GP) yapıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde de verildiği gibi çubuk boyunca şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için C1 numaralı çubuğa dört adet (GP2, GP3, GP4, GP5), çubuklar arasında yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için ise C4 numaralı çubuğa bir adet (GP3'ün karşılığı) GP yapıştırılmıştır (GP1). C1 numaralı çubuğun yükseklik ortasına yapıştırılan GP'den anlamlı sonuç alınamamıştır. C1 çubuğuna yapıştırılan GP3 ve A4 numaralı çubuğa yapıştırılan GP4'den benzer sonuçlar alınmıştır. C1 numaralı çubuğun alt ve üst mesnet bölgelerine yakın olacak şekilde yapıştırılan GP2 ve GP5'den de benzer şekildeğiştirme ölçümleri alınmıştır. Yapıştırılan GP'ler yardımıyla elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.22'de görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000 με (10^{-6} mm/mm) değerinde şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi yataylaşmaya

başlamıştır. Çelik çubuklarda oluşan 2000 με şekildeğiştirme değeri C1 numaralı çubukta çekmede 2.26 mm, C4 numaralı çubukta ise itmede 2.34 mm yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.22-(a, c)).Yedinci yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler 3160.62 με'na, yerdeğiştirmeler ise itmede 4.52 mm'ye ulaştığında akma yükü 128.66 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.23).

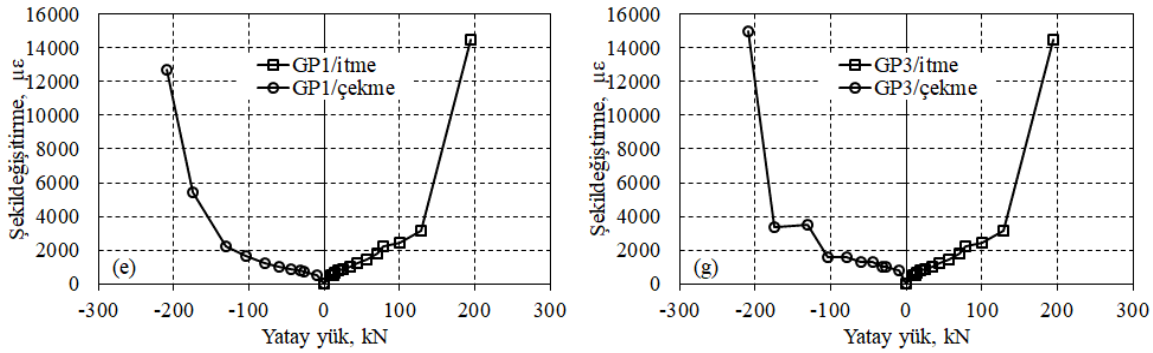


Şekil 3.21. S-KSDE-3 deney elemanının görünümleri

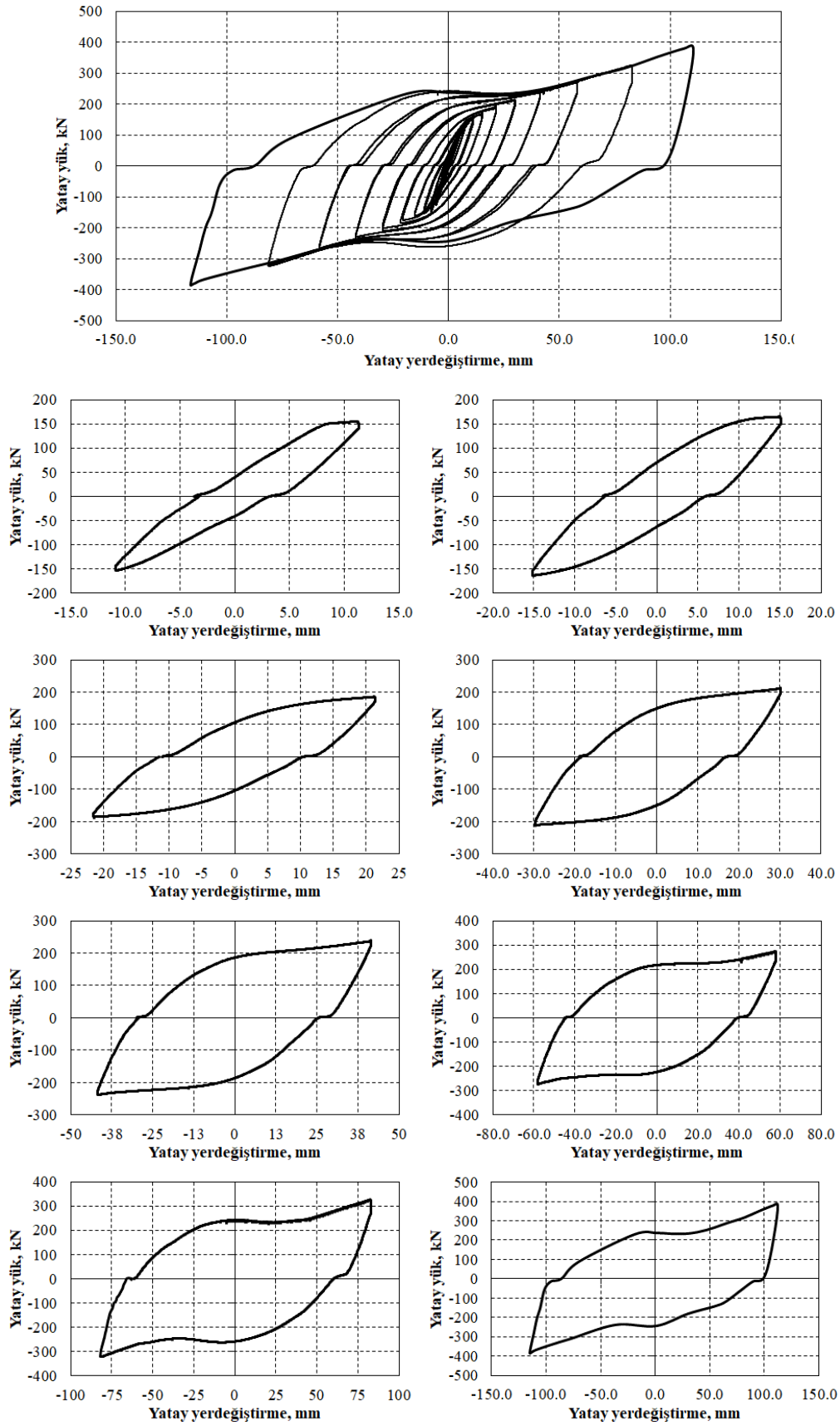
S-KSDE-3 deney elemanının çevrimsel yükleme etkisinde, yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.24'te verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.



Şekil 3.22. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri



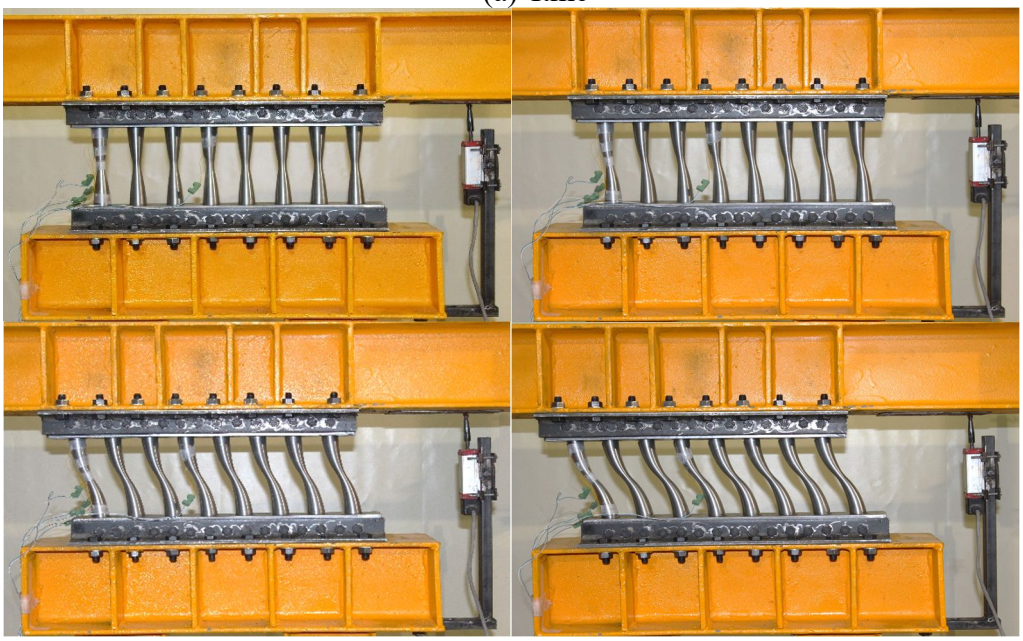
Şekil 3.23. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri



Şekil 3.24.S-KSDE-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.24'te görüldüğü gibi deney elemanının akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (4.52 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanımı da artmıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımına (≈80.9 mm) kadar KSDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.25). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 273.56 kN, çekmede ise 273.21 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 112.62 artmıştır.

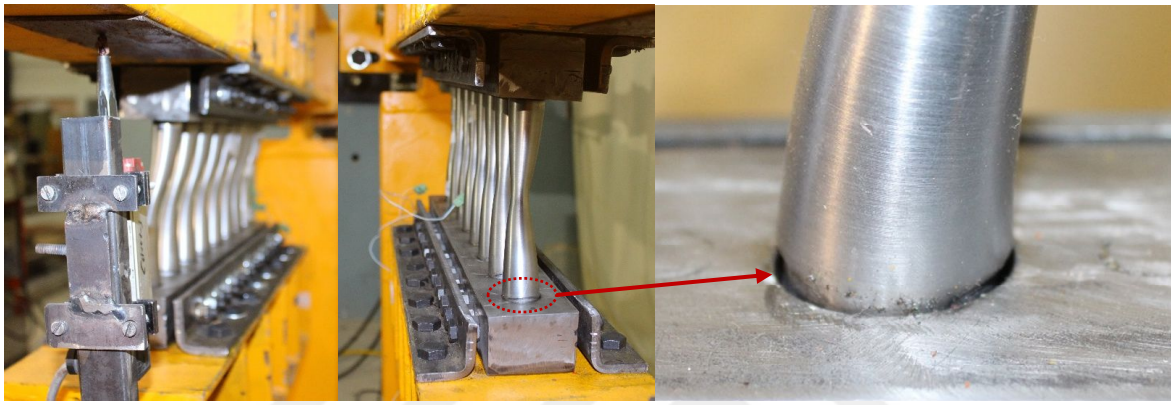
(a) İtme



(b) Çekme

Şekil 3.25. S-KSDE-3 Elemanının deney anından görünümleri

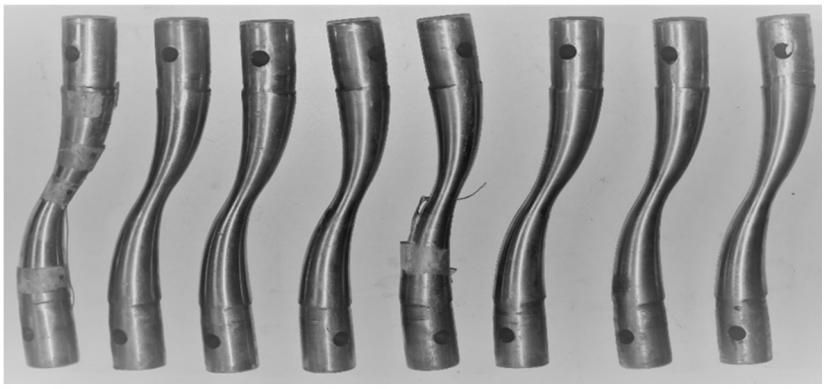
On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 3.26). Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 326.30 kN, çekmede ise 322.31 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 153.61 artmıştır.



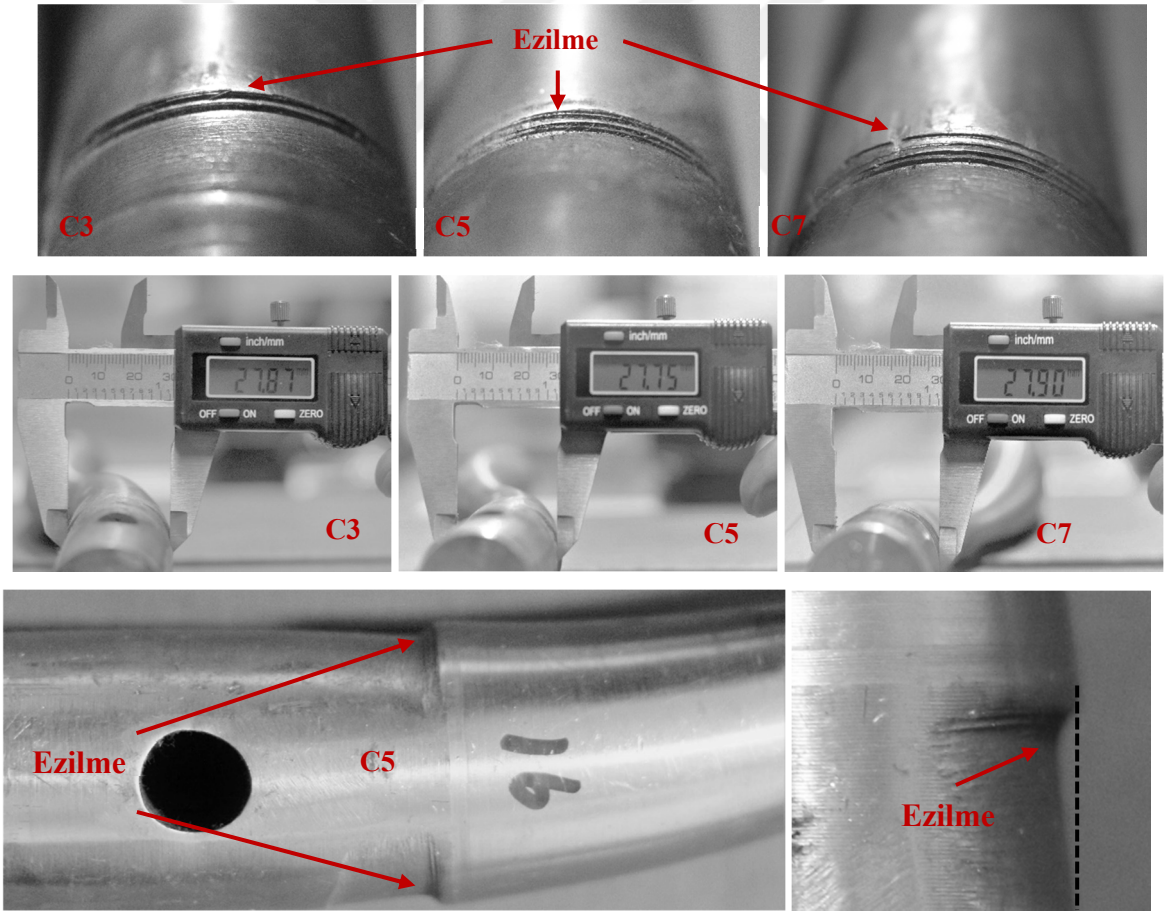
Şekil 3.26. KSDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar

On yedinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈113 mm), KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Buna rağmen, KSDE çelik çubukların hem çubuk yüksekliği boyunca hem de mesnet bölgelerinde kopma ve çatlama tipi bir hasar oluşmamıştır. Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanın dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 389.10 kN ve 383.13 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 197.78 artmıştır. Şekil 3.27'de çelik çubukların, deney sonucundaki nihai şekildeğiştirme halleri verilmiştir. Benzer hasar durumuna sahip çelik çubukların davranışlarına örnek olarak C3, C5 ve C7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde ezilme etkisiyle oluşan hasarların detaylı görünümleri Şekil 3.28'de verilmiştir. Şekil 3.29'da ise çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara bağlantısını sağlamak amacıyla açılan cıvata yuvalarında oluşan hasarlara örnek olarak C3, C5 ve C7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerine ait detaylı görünümleri verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri ve düşey bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir

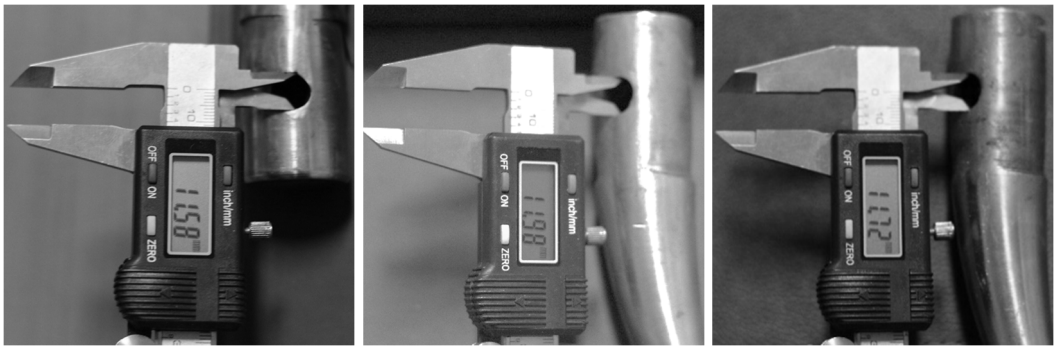
hasar oluşmamıştır. Yatay bağlantı cıvataları ise gözle görülür derecede şekildeğiştirmiştir (Şekil 3.30). Deneyin son aşamasına ait bir görünüm ise Şekil 3.31'de verilmiştir.



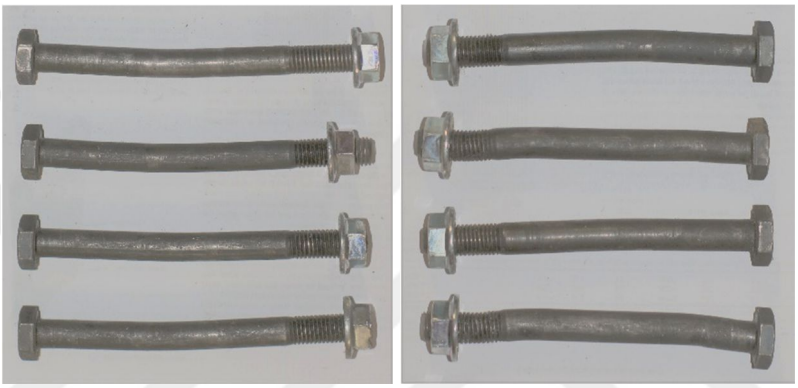
Şekil 3.27. KSDE çelik çubuklarda oluşan şekildeğiştirmeler



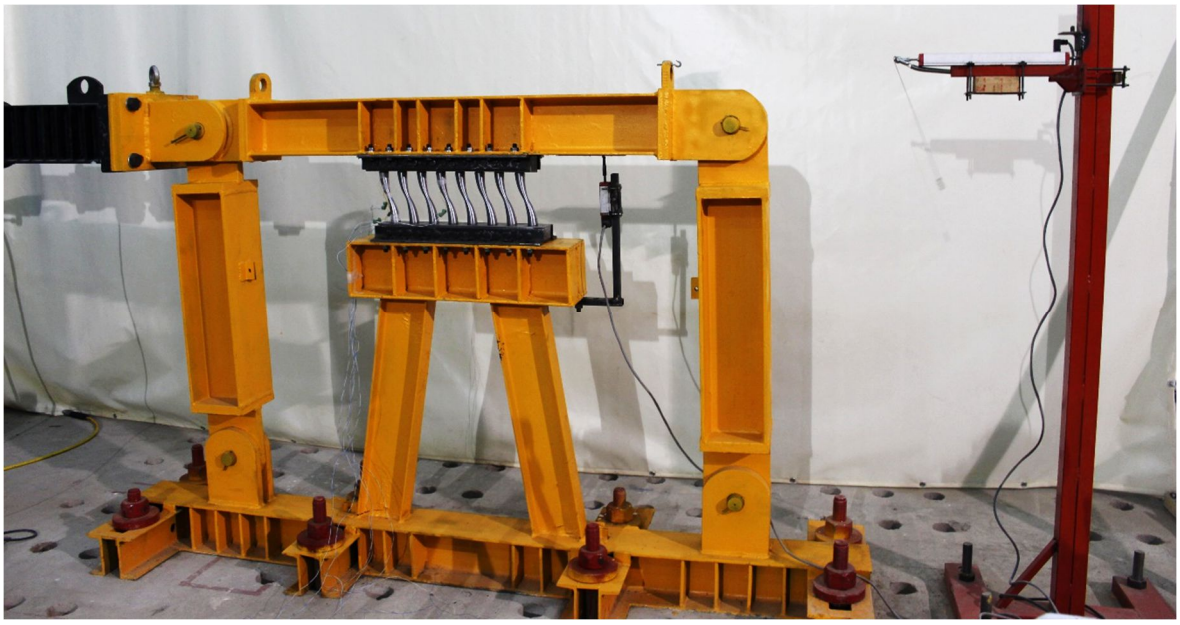
Şekil 3.28. C3, C5, C7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar



Şekil 3.29. C3, C5, C7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar



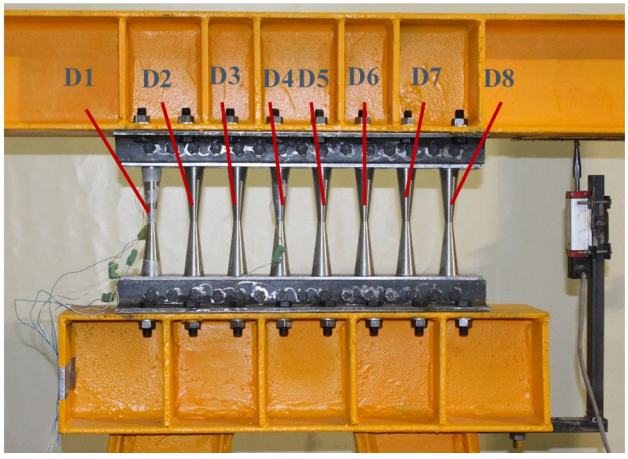
Şekil 3.30. Yatay bağlantı cıvatalarında oluşan hasarlar



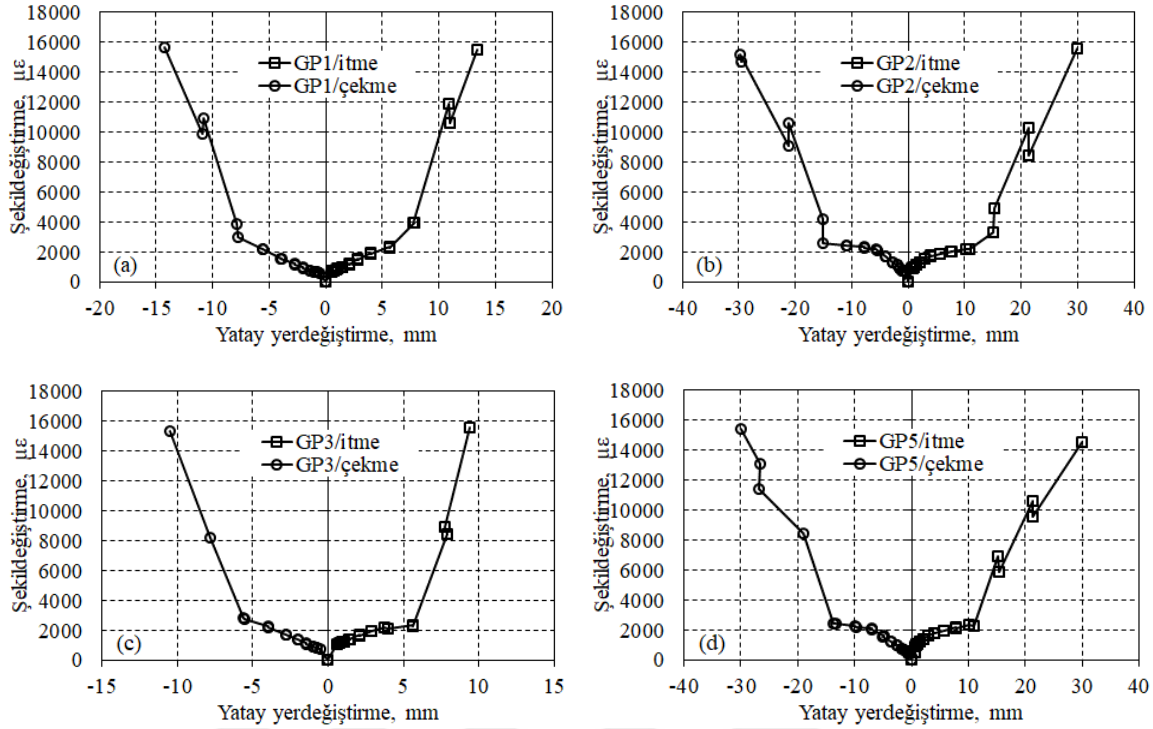
Şekil 3.31. Deneyin son aşamasına ait bir görünüm

3.2.4. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-1)

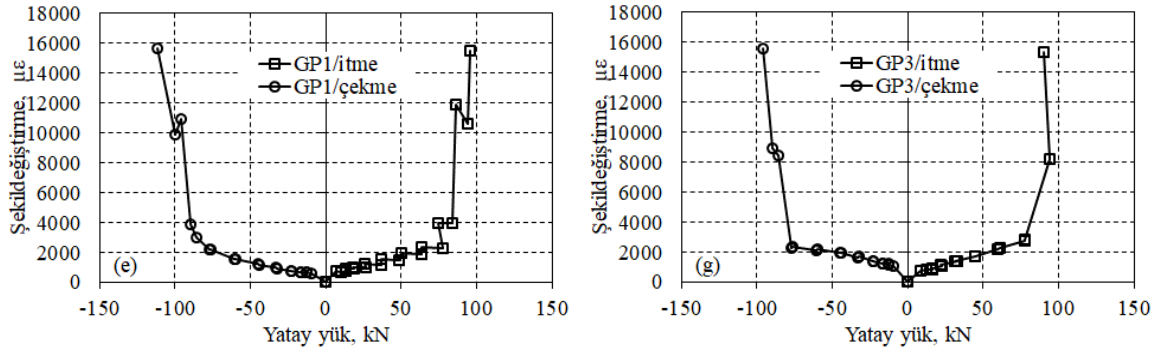
Konik şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 12 mm olan çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-KDE-1) görümü Şekil 3.32'de verilmiştir. Yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirme değerlerini elde etmek amacıyla D1 ve D4 numaralı çelik çubuklara gerinim pulları (GP) yapıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde de verildiği gibi çubuk boyunca şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için D1 numaralı çubuğa dört adet (GP2, GP3, GP4, GP5), çubuklar arasında yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için ise D4 numaralı çubuğa bir adet (GP3'ün karşılığı) GP yapıştırılmıştır (GP1). D1 numaralı çubuğun yükseklik ortasına yapıştırılan GP'den anlamlı sonuç alınamamıştır. D1 çubuğuna yapıştırılan GP3 ve D4 numaralı çubuğa yapıştırılan GP1'den benzer sonuçlar elde edilmiştir. D1 numaralı çubuğun alt ve üst mesnet bölgelerine yakın olacak şekilde yapıştırılan GP2 ve GP5'ten de benzer şekildeğiştirme ölçümleri elde edilmişir. Yapıştırılan GP'ler yardımıyla elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrilerinden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000 με (10-6 mm/mm) değerinde şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi yataylaşmaya başlamıştır (Şekil 3.33). Çelik çubuklarda oluşan 2000 με şekildeğiştirme değeri D1 numaralı çubukta çekmede 3.97 mm, D4 numaralı çubukta ise itmede 3.96 mm yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.33-(a, c)).Yedinci yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler 2747.40 με'na, yerdeğiştirmeler ise itmede 5.63 mm'ye ulaştığında akma yükü 77.451 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.34).



Şekil 3.32. S-KDE-1 deney elemanının görünümü

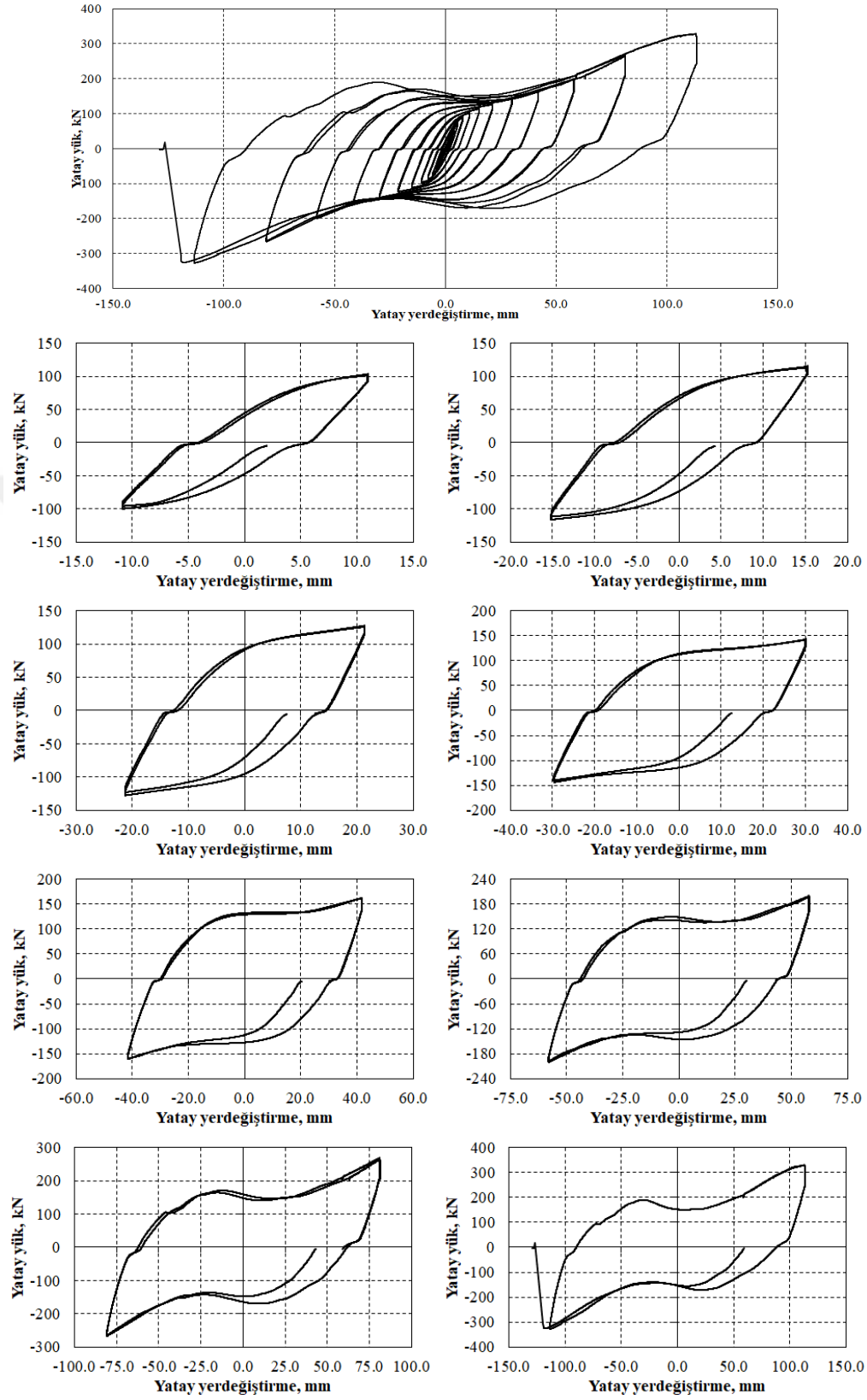


Şekil 3.33. D1 ve D4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri



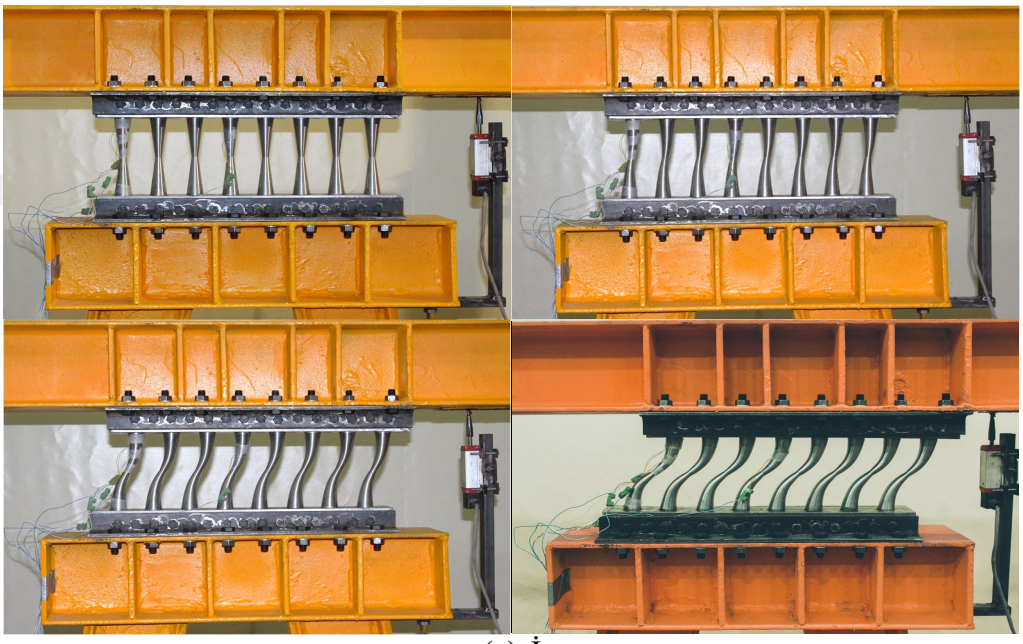
Şekil 3.34. D1 ve D4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri

S-KDE-1 deney elemanının çevrimsel yükleme etkisinde, yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.35'te verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.

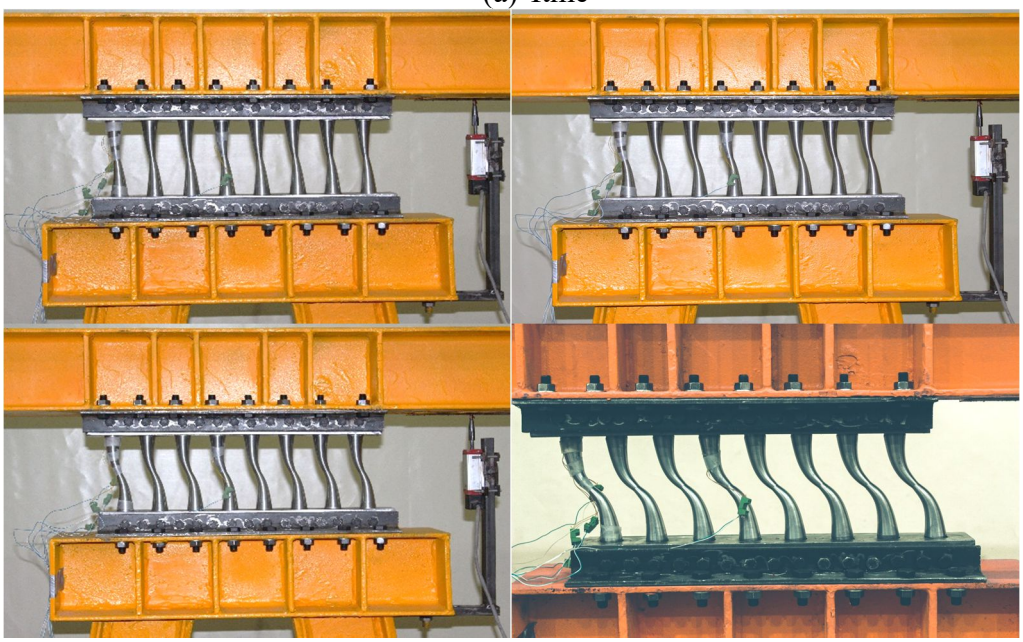


Şekil 3.35. S-KDE-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.35'ten görüldüğü gibi deney elemanının akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (5.63 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanımı da artmıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımına (≈80.9 mm) kadar KDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.36). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 200.20 kN, çekmede ise 200.16 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 158.48 artmıştır.



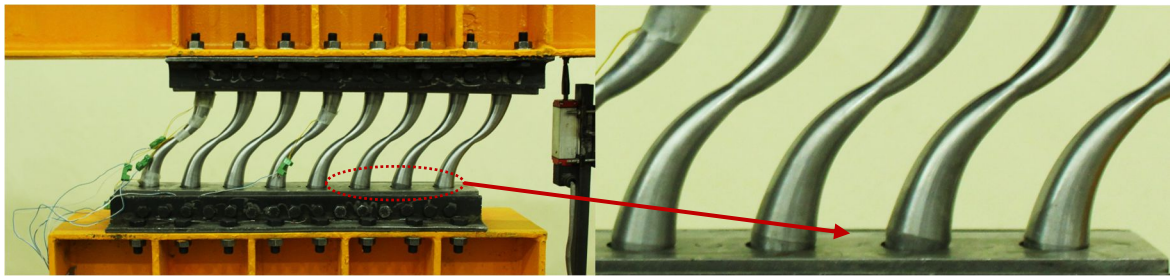
(a) İtme



(b) Çekme

Şekil 3.36. S-KDE-1 elemanının deney anından görünümleri

On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 3.37).

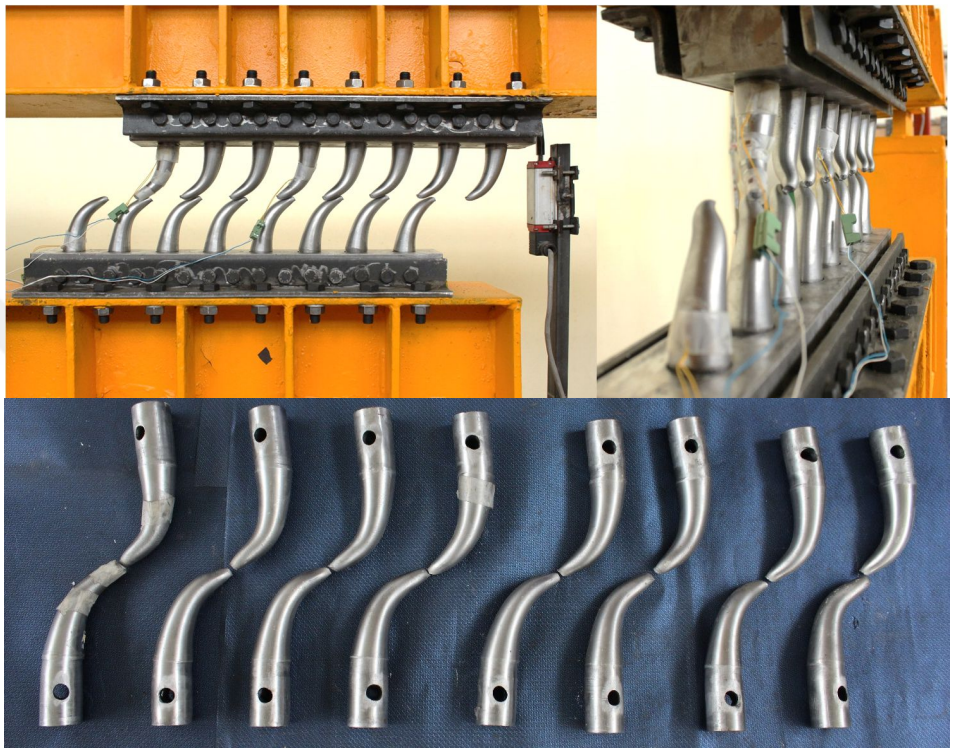


Şekil 3.37. Çelik çubukların mesnet bölgelerindeki hasar oluşumları

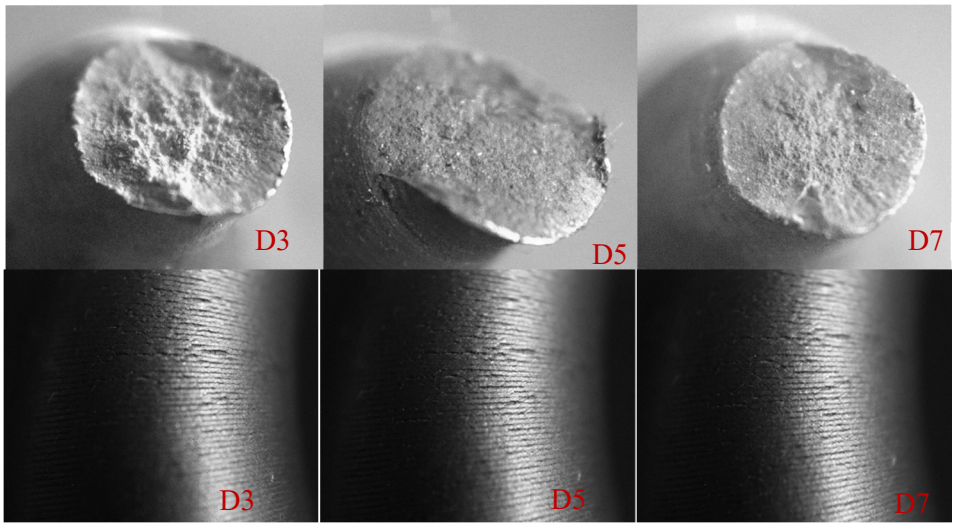
Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 268.535 kN, çekmede ise 266.217 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 246.71 artmıştır.

On yedinci yerdeğiştirme adımına (≈113 mm) gelindiğinde, KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanın dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 329.265 kN ve 327.683 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 325.126 artmıştır. Yükleme protokolü tamamlanmasının ardından, deney elemanı yük taşıma kapasitesini kaybedene kadar statik itme yüklemesi uygulanmıştır. Çekmede 119.430 mm yerdeğiştirme değerine ulaşıldığında, KDE çelik çubuklar eş zamanlı olarak çubuk yüksekliği ortasından kopmuştur (Şekil 3.38). Bu durumda, yatay yük değeri 307.19 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanından elde edilen yatay yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre 22.075 kN azalmıştır. KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde çatlama veya kopma tipi bir hasar gözlemlenmemiştir. Benzer göçme durumuna sahip çelik çubukların hasar durumlarına örnek olarak D3, D5 ve D7 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri Şekil 3.39'da verilmiştir. Şekil 3.40'ta ise çubukların mesnet bölgelerindeki hasarların oluşumuna örnek olarak D3, D5 ve D7 numaralı çelik çubukların cıvata yuvalarındaki hasarların detaylı görünümleri verilmiştir. Ayrıca KDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarların yanı sıra çelik çubukların yükseklik ortasına yakın

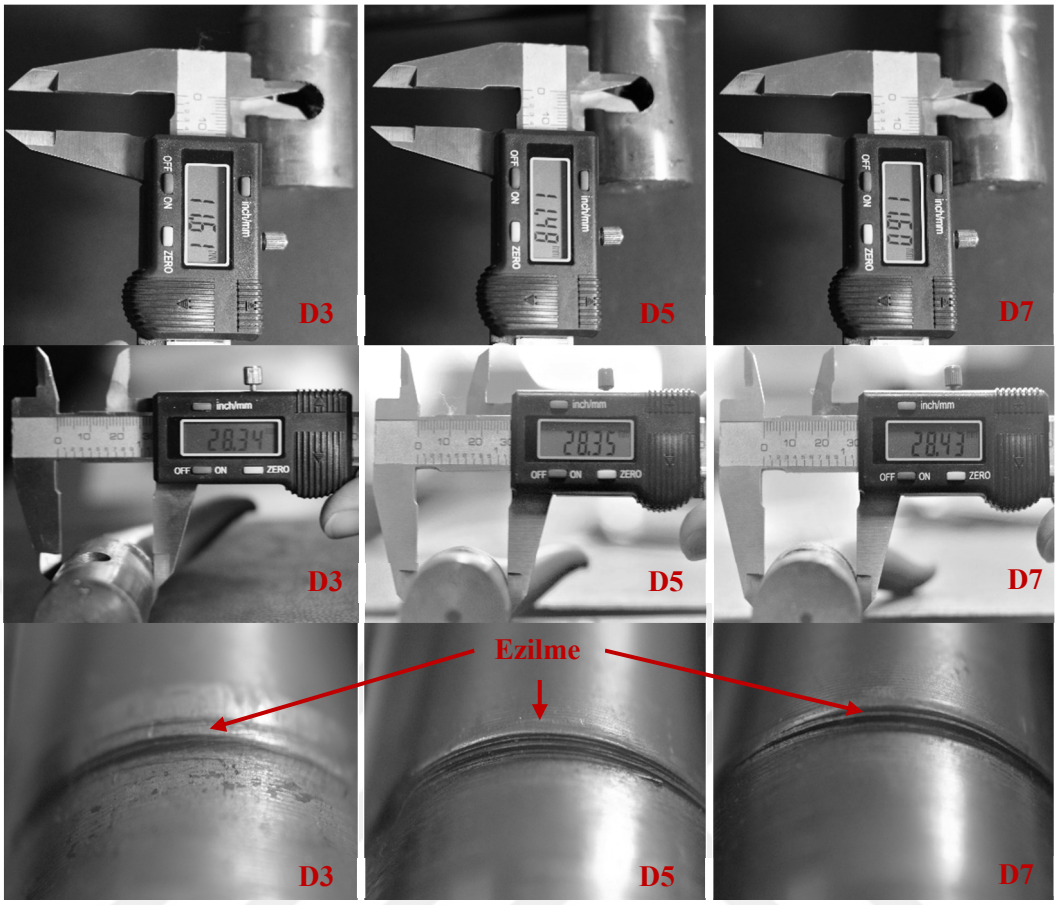
bölgelerde eğilme etkisi ile oluşan çekme gerilmelerinden dolayı çatlamalar meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.39). Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır. Şekil 3.41'de deneyin son aşamasına ait bir görünüm verilmiştir.



Şekil 3.38. KDE çelik çubuklarda oluşan şekildeğiştirmeler



Şekil 3.39. D3, D5 ve D7 numaralı çelik çubuklarda oluşan hasarların detaylı görünümleri

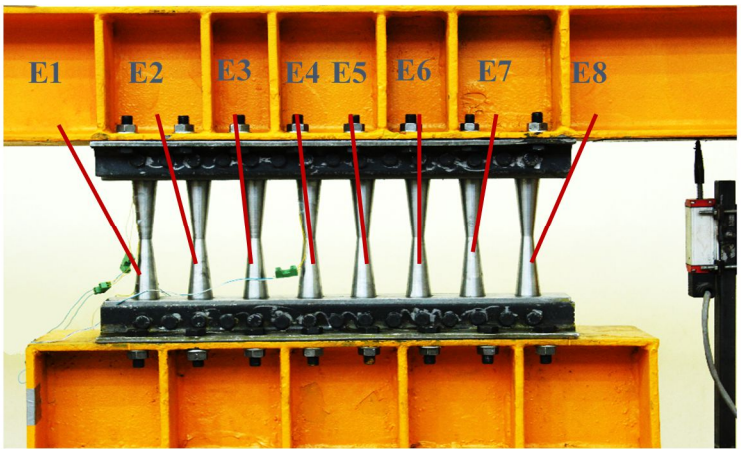


Şekil 3.40. D3, D5 ve D7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar

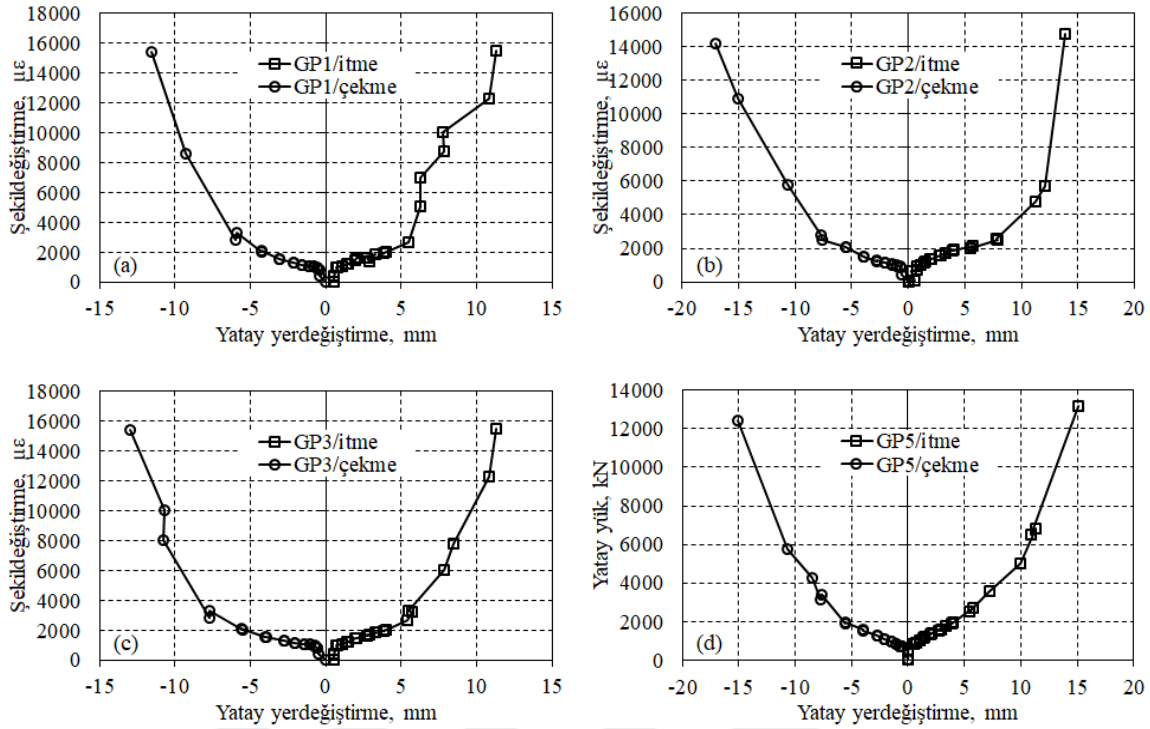
Şekil 3.41. Deneyin son aşamasına ait bir görünüm

3.2.5. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-2)

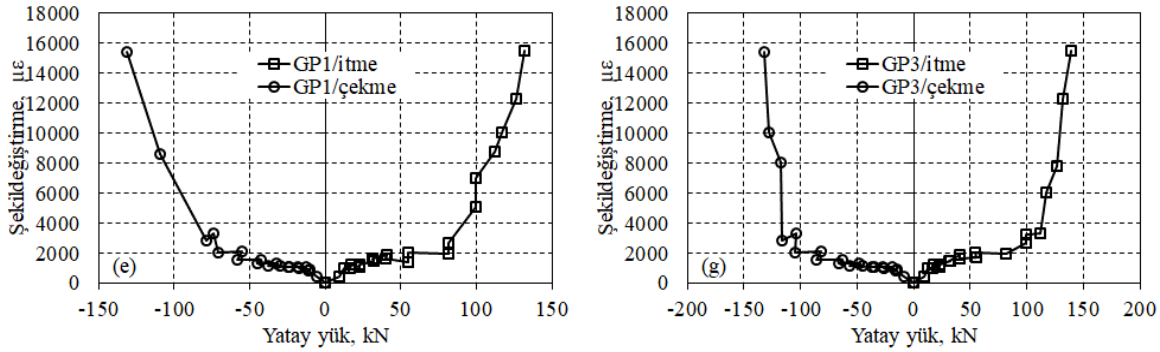
Konik şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 14 mm olan çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-KDE-2) görümü Şekil 3.42'de verilmiştir. Yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirme değerlerini elde etmek amacıyla E1 ve E4 numaralı çelik çubuklara gerinim pulları (GP) yapıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde de verildiği gibi çubuk boyunca şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için E1 numaralı çubuğa dört adet (GP2, GP3, GP4, GP5), çubuklar arasında yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için ise E4 numaralı çubuğa bir adet (GP3'ün karşılığı) GP yapıştırılmıştır (GP1). E1 numaralı çubuğun yükseklik ortasına yapıştırılan GP'den anlamlı sonuç alınamamıştır. E1 çubuğuna yapıştırılan GP3 ve E4 numaralı çubuğa yapıştırılan GP1'den benzer sonuçlar alınmıştır. E1 numaralı çubuğun alt ve üst mesnet bölgelerine yakın olacak şekilde yapıştırılan GP2 ve GP5'den de benzer şekildeğiştirme ölçümleri alınmıştır. Yapıştırılan GP'ler yardımıyla elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrilerinden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000 με (10-6 mm/mm) değerinde şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi yataylaşmaya başlamıştır (Şekil 3.43). Çelik çubuklarda oluşan 2000 με şekildeğiştirme değeri E1 numaralı çubukta itmede 3.88 mm, E4 numaralı çubukta ise itmede 3.87 mm yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.43-(a, c)). Yedinci yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler 2700 με'na, yerdeğiştirmeler ise itmede 5.47 mm'ye ulaştığında akma yükü 81.60 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.44).



Şekil 3.42. S-KDE-2 deney elemanının görünümü

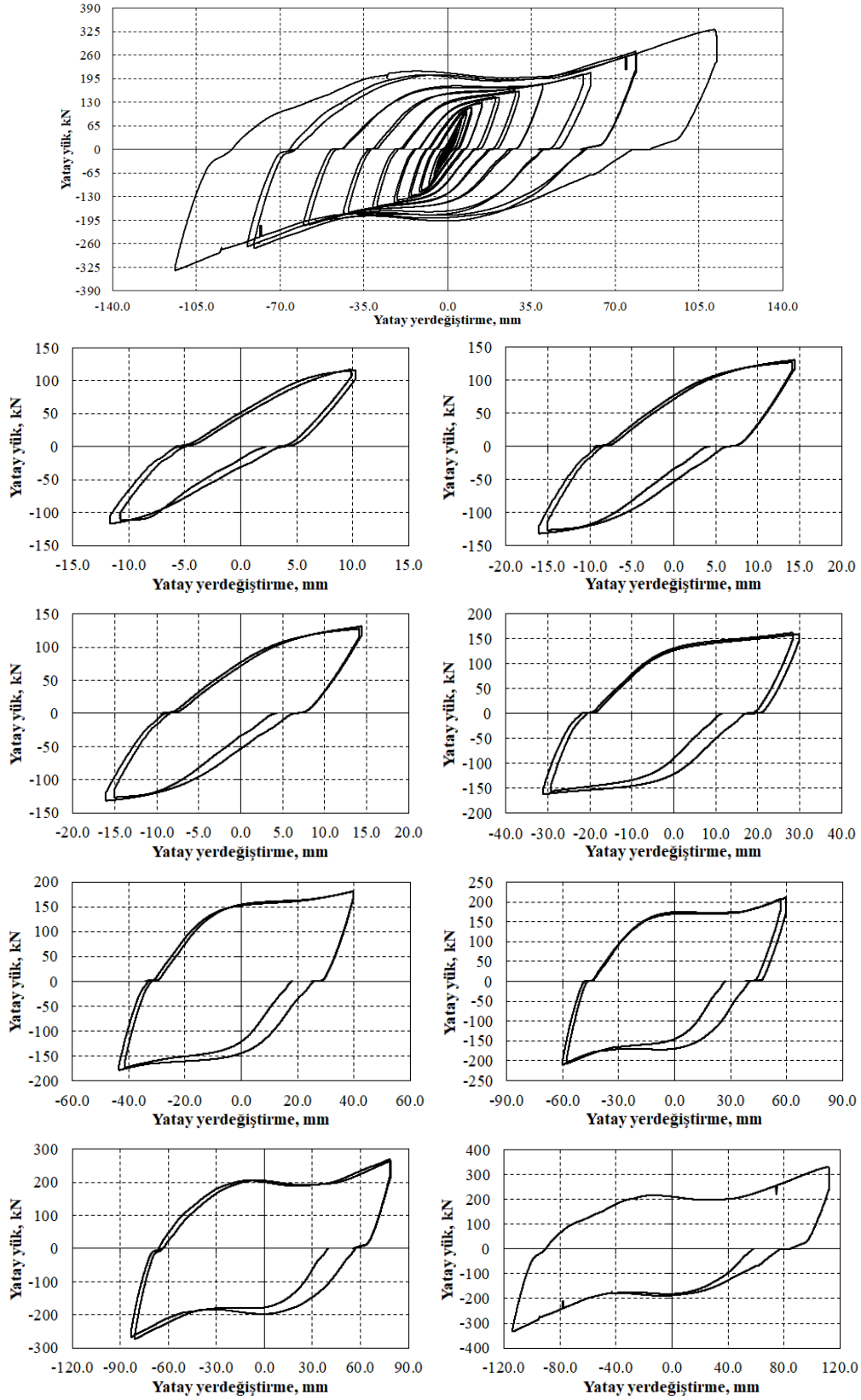


Şekil 3.43. E1 ve E4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri



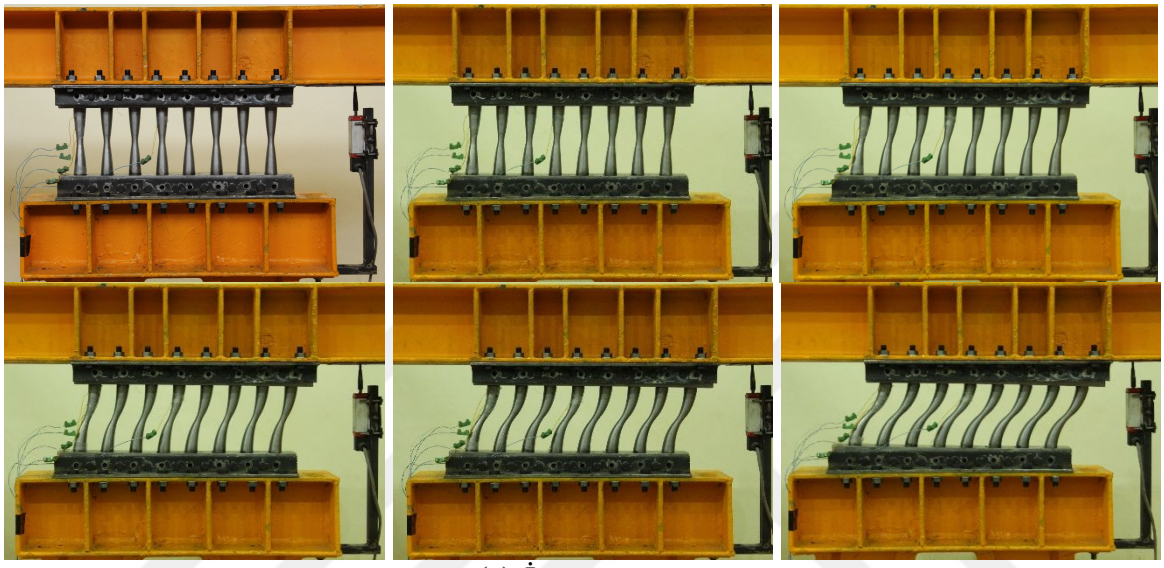
Şekil 3.44. E1 ve E4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri

S-KDE-2 deney elemanının çevrimsel yükleme etkisinde, yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.45'te verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.

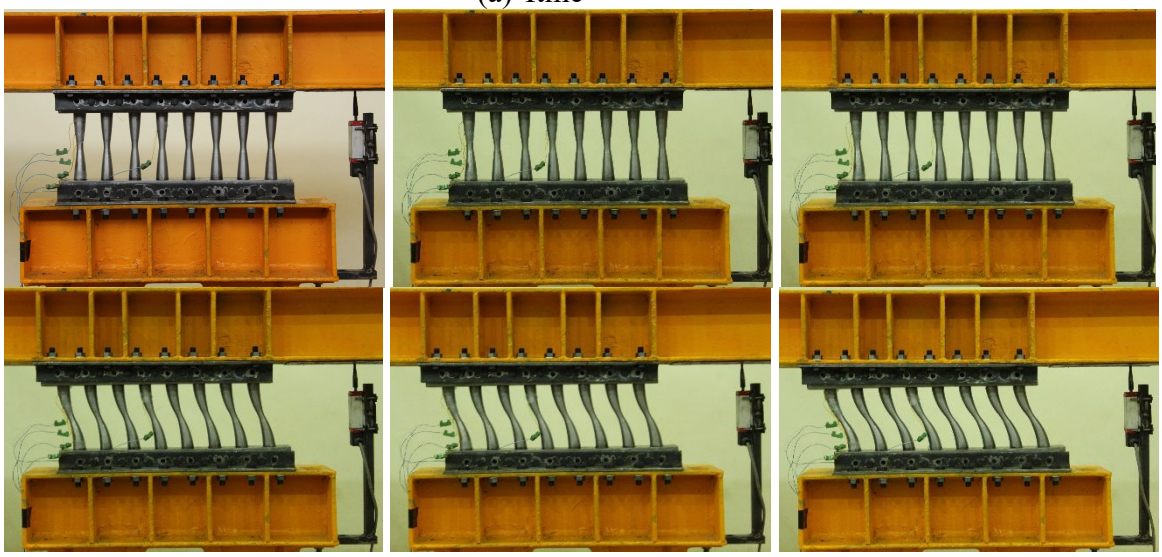


Şekil 3.45. S-KDE-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.45'ten görüldüğü gibi deney elemanı akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (5.47 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanımı da artmıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımına (≈80.9 mm) kadar KDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.46). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 211.97 kN, çekmede ise 210.13 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 159.77 artmıştır.



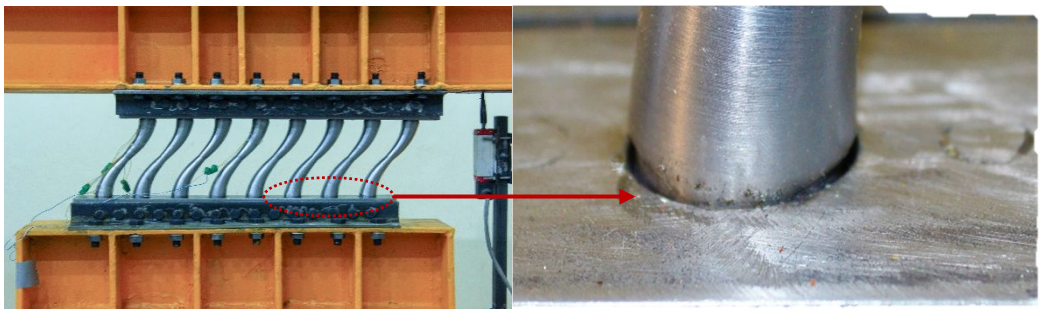
(a) İtme



(b) Çekme

Şekil 3.46. S-KDE-2 Elemanının deney anından görünümleri

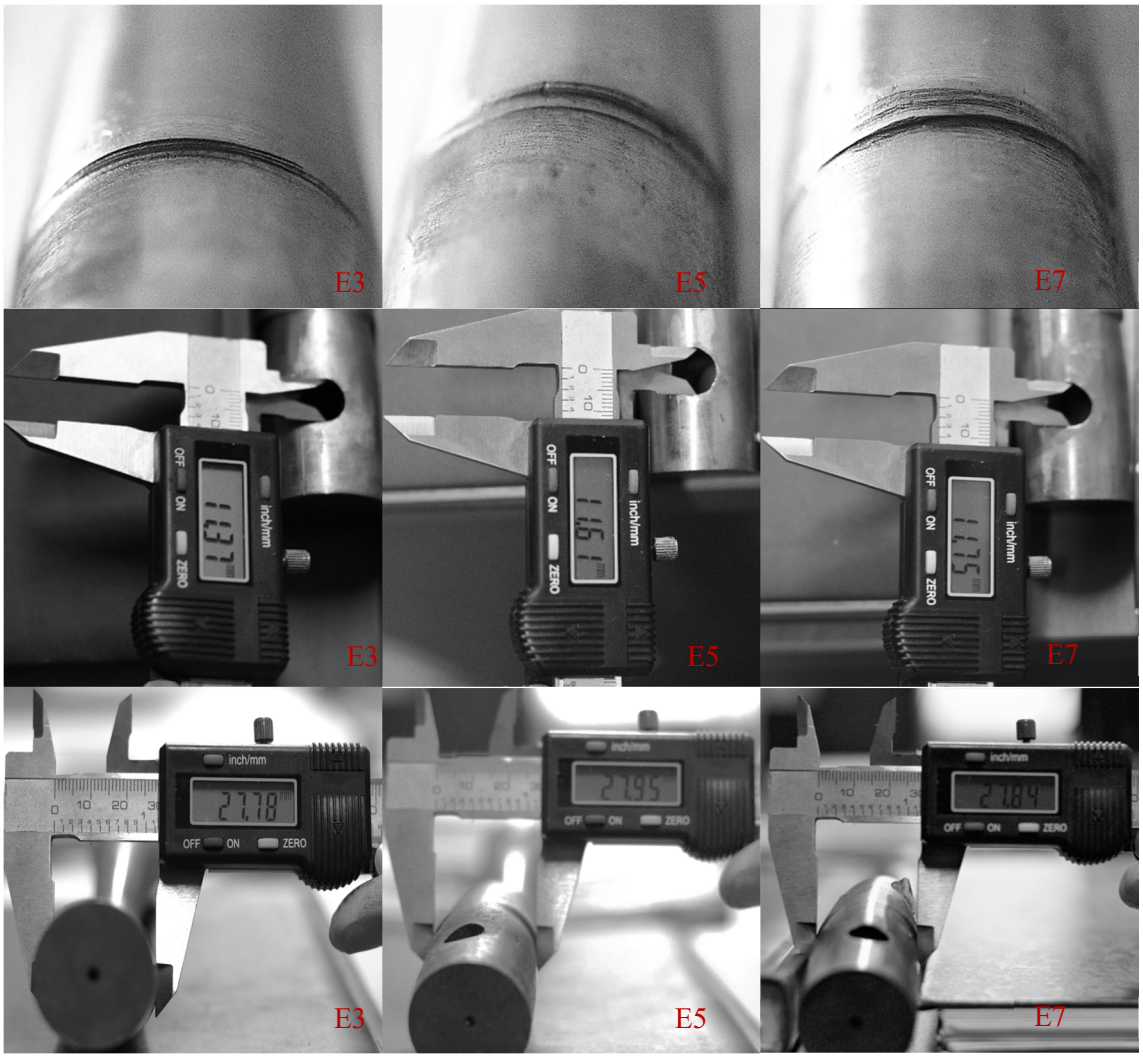
On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. KDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar

Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 270.84 kN, çekmede ise 272.72 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 234.21 artmıştır.

On yedinci yerdeğiştirme adımına (≈113.30 mm) gelindiğinde, KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanının dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 330.35 kN ve 333.51 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 308.71 artmıştır. KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde çatlama ve/veya kopma tipi bir hasar gözlenmemiştir. Şekil 3.48'de benzer hasar durumuna sahip çelik çubukların şekildeğiştirme durumlarına örnek olarak E3, E5 ve E7 numaralı çelik çubukta oluşan hasarların detaylı görünümleri ve çelik çubukların cıvata yuvalarında oluşan hasarların detaylı görünümleri verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır.



Şekil 3.48. E3, E5 ve E7 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar

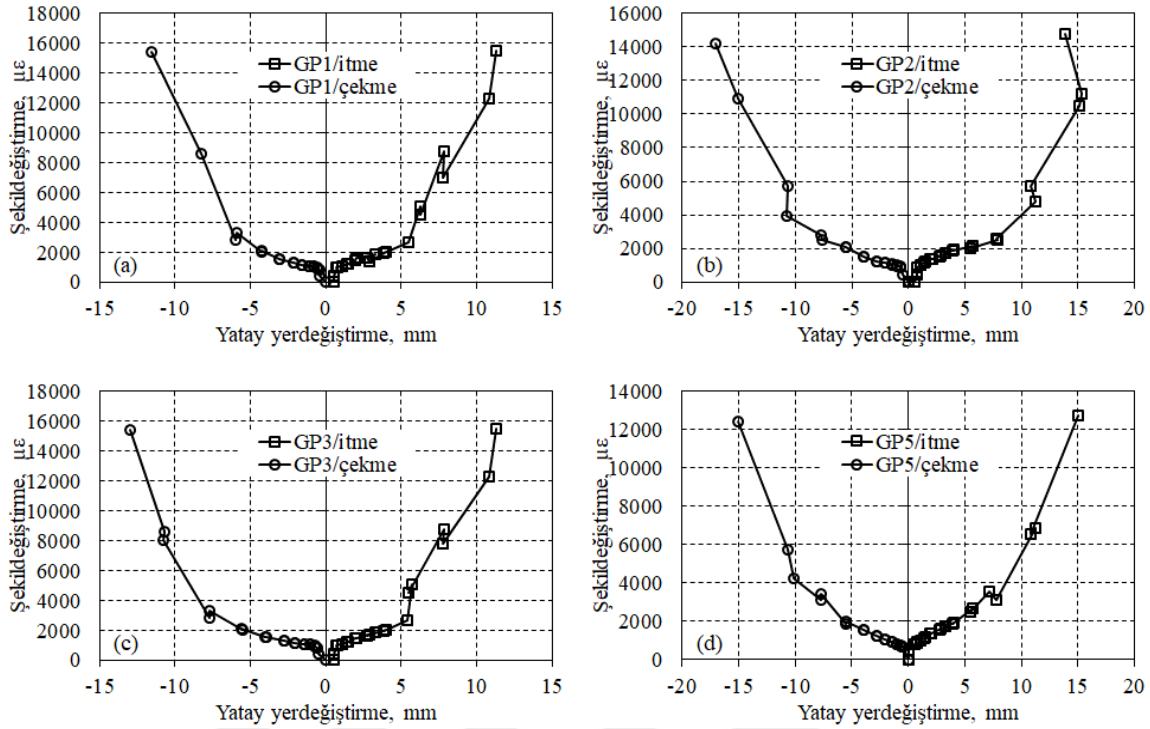
3.2.6. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-3)

Konik şekilli dairesel enkesitli, yüksek ortası çapı 16 mm olan çelik çubukların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-KDE-3) görümleri Şekil 3.49'da verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirme değerlerini elde etmek amacıyla F1 ve F4 numaralı çelik çubuklara gerinim pulları (GP) yapıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde de verildiği gibi çubuk boyunca şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için F1 numaralı çubuğa dört adet (GP2, GP3, GP4, GP5), çubuklar arasında yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak şekildeğiştirmelerin değişiminin belirlenmesi için ise F4 numaralı çubuğa bir adet (GP3'ün karşılığı) GP yapıştırılmıştır (GP1). F1 numaralı çubuğun yükseklik ortasına yapıştırılan GP'den anlamlı

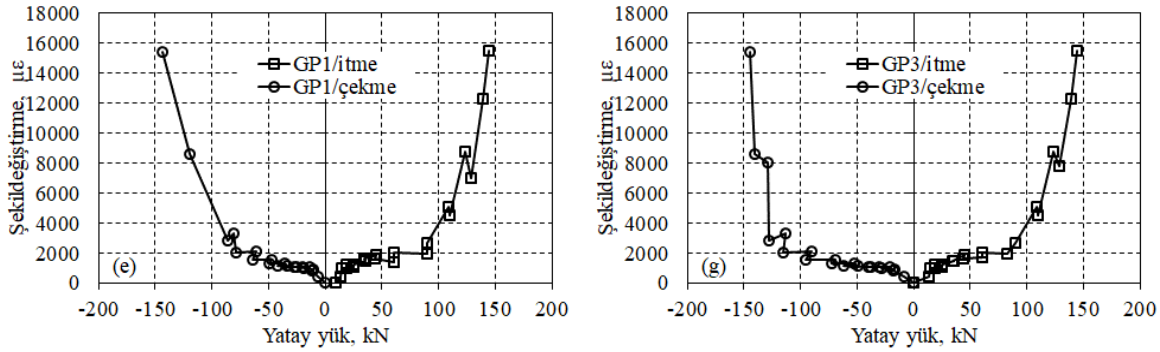
sonuç alınamamıştır. F1 çubuğuna yapıştırılan GP3 ve F4 numaralı çubuğa yapıştırılan GP4'den benzer sonuçlar alınmıştır. F1 numaralı çubuğun alt ve üst mesnet bölgelerine yakın olacak şekilde yapıştırılan GP2 ve GP5'den de benzer şekildeğiştirme ölçümleri alınmıştır. Yapıştırılan GP'ler yardımıyla elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrilerinden görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000 με (10-6 mm/mm) değerinde şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi yataylaşmaya başlamıştır (Şekil 3.50). Çelik çubuklarda oluşan 2000 με şekildeğiştirme değeri F1 numaralı çubukta itmede 3.98 mm, F4 numaralı çubukta ise itmede 3.88 mm yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.50-(a, c)).Yedinci yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler 2665.30 με'na, yerdeğiştirmeler ise itmede 5.45 mm'ye ulaştığında akma yükü 89.77 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.51).

Şekil 3.49. S-KDE-3 deney elemanının görünümleri

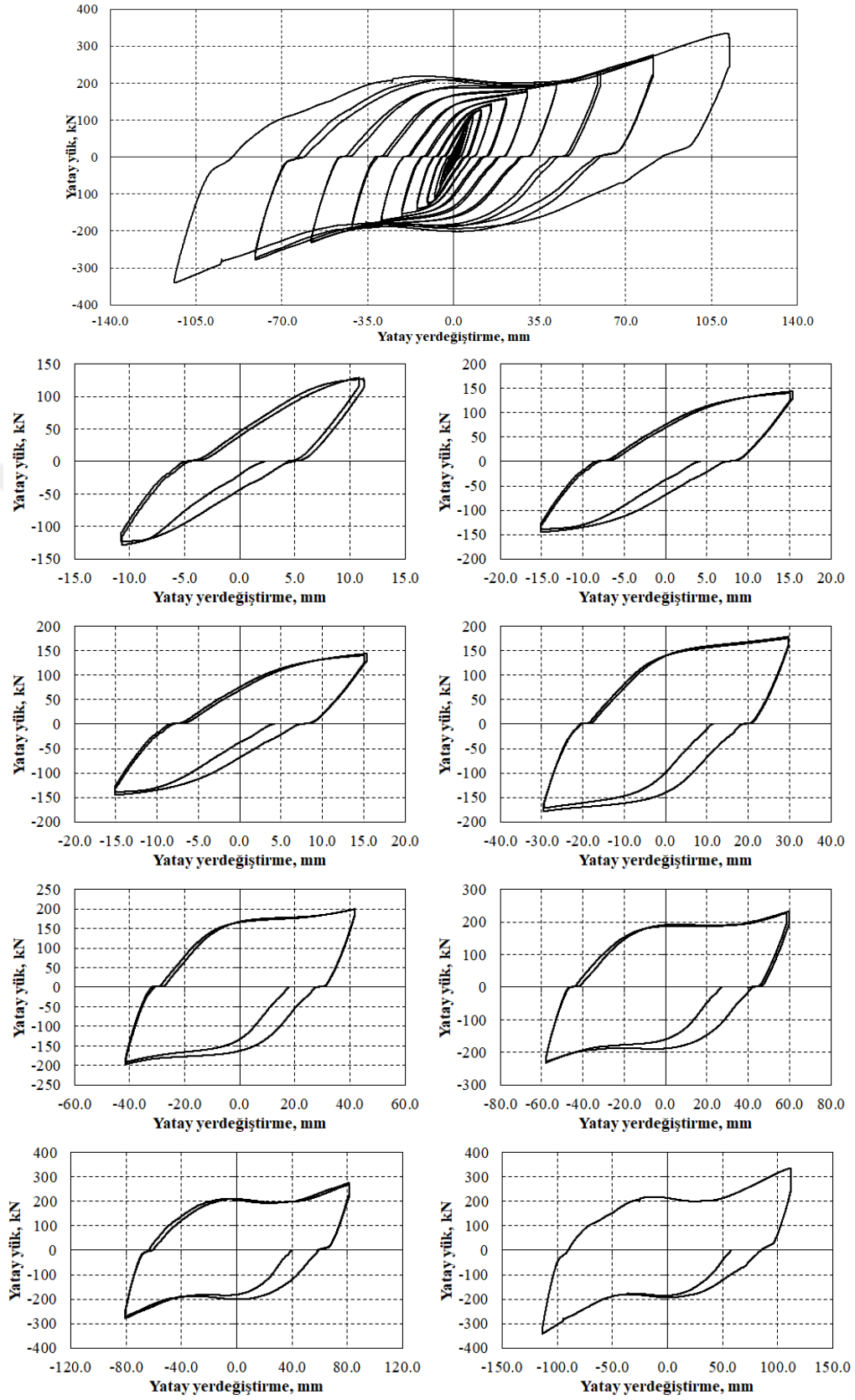
S-KDE-3 deney elemanının çevrimsel yükleme etkisinde, yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.52'de verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.



Şekil 3.50. F1 ve F4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ilişkisi grafikleri



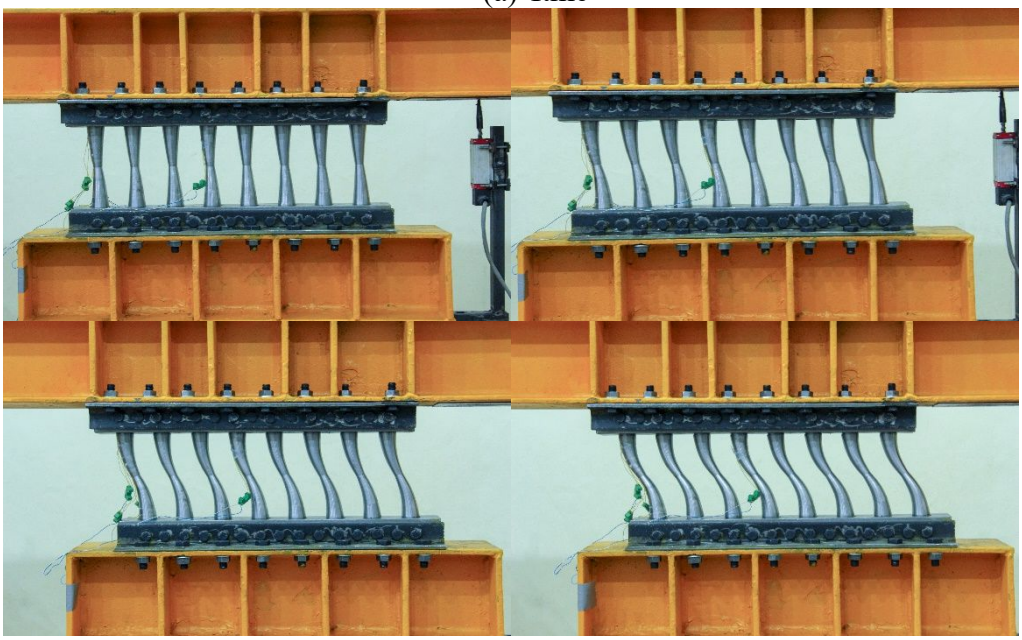
Şekil 3.51. F1 ve F4 numaralı KDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yük ilişkisi grafikleri



Şekil 3.52. S-KDE-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.52'de görüldüğü gibi deney elemanı akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (5.45 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle deney elemanının dayanımı da artmıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımına (≈80.9 mm) kadar KDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.53). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 233.170 kN, çekmede ise 231.153 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 161.50 artmıştır.

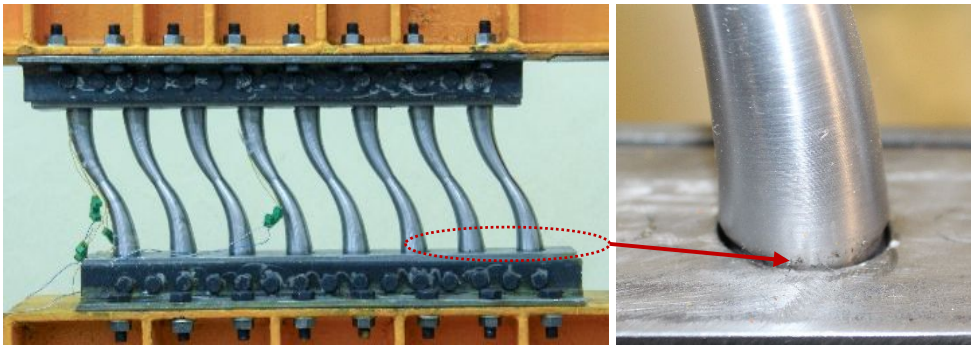
(a) İtme



(b) Çekme

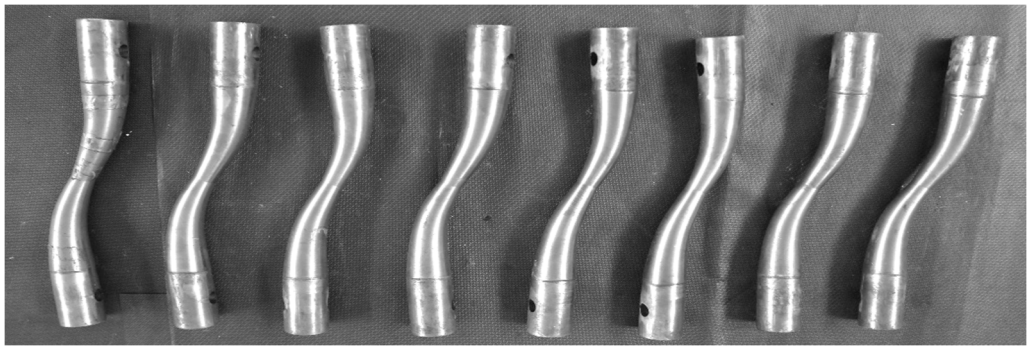
Şekil 3.53. S-KDE-3 elemanının on yedinci yerdeğiştirme adımına kadar farklı yerdeğiştirme seviyelerindeki şekildeğiştirme halleri

On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 3.54).

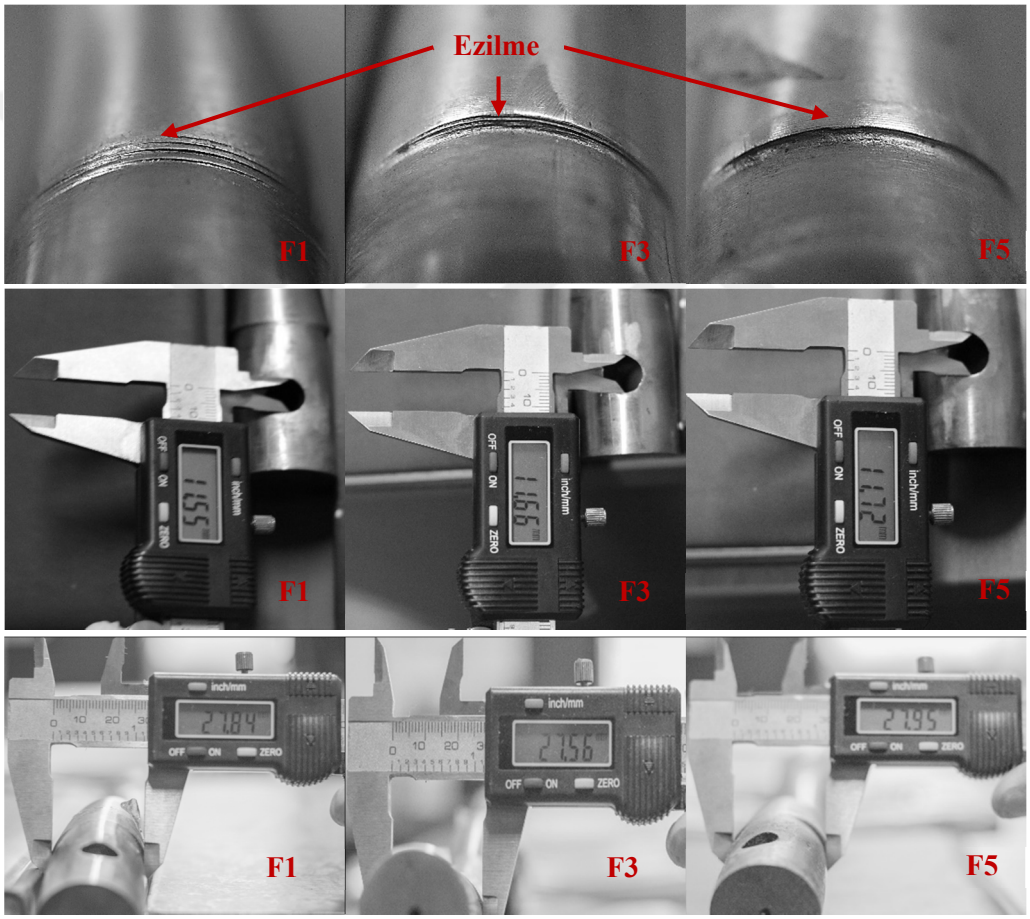


Şekil 3.54. KDE çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar

Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 276.631 kN, çekmede ise 278.54 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 210.30 artmıştır. On yedinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈113 mm), KDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Buna rağmen, KDE çelik çubukların hem çubuk yüksekliği boyunca hem de mesnet bölgelerinde kopma ve çatlama tipi bir hasar oluşmamıştır. Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrimi tamamlandığında deney elemanın dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 334.916 kN ve 340.630 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 279.47 artmıştır. Şekil 3.56'da çelik çabukların nihai durumdaki şekildeğiştirmiş halleri verilmiştir. Benzer hasar durumuna sahip çelik çubukların davranışlarına örnek olarak F1, F3 ve F5 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde ezilme etkisiyle oluşan hasarların detaylı görünümleri ve söz konusu çubukların çelik bloklara bağlantısını sağlamak amacıyla açılan cıvata yuvalarında oluşan hasarların detaylı görünümleri Şekil 3.57'de verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri ve düşey bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır. Yatay bağlantı cıvataları ise S-KSDE-3 deney elemanındaki duruma benzer olarak gözle görülür derecede şekildeğiştirmiştir.



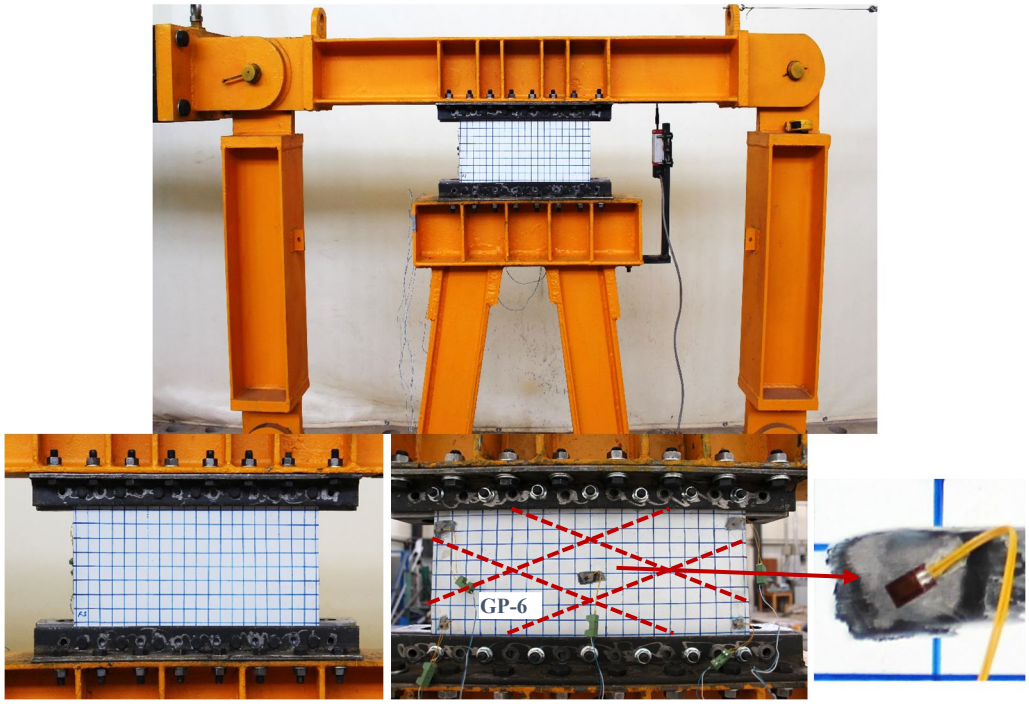
Şekil 3.55. Çelik çubukların nihai durumdaki şekildeğiştirmiş halleri



Şekil 3.56. F1, F3 ve F5 numaralı çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarlar

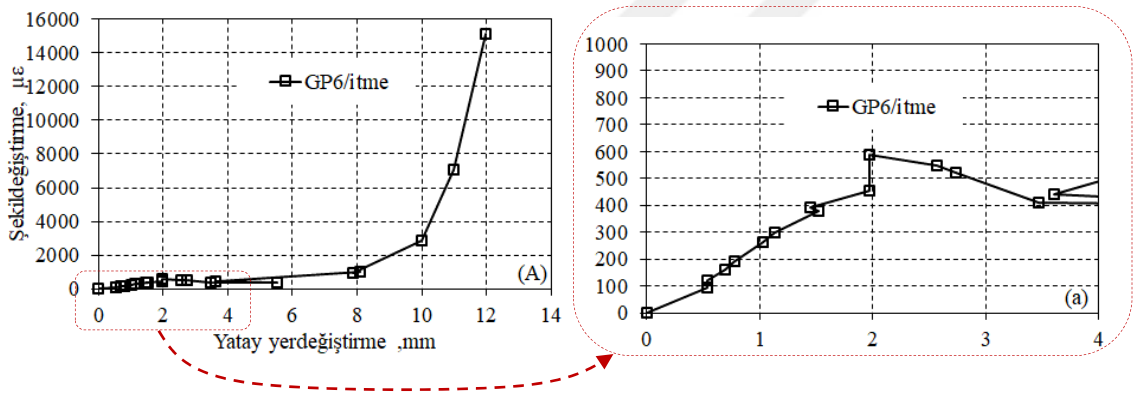
3.2.7. Kalınlığı 1.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-1)

Kalınlığı 1.50 mm olan çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-ÇP-1) görünümleri Şekil 3.57'de verilmiştir. S-ÇP-1 sönümleyici deney elemanını oluşturan çelik plakalarda meydana gelen şekildeğiştirmelerin belirlenebilmesi amacıyla, çevrimsel yükleme nedeniyle basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalan plaka düzlemindeki diyagonal bantların kesişim bölgelerine gerinim pulu (GP) yapıştırılmıştır (bk. Şekil 3.57). Yükleme protokolüne uygun olarak gerçekleştirilen çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen veriler yardımıyla çizilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme-yatay yük eğrileri sırasıyla Şekil 3.58 ve Şekil 3.59'da verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi 586.2 με (10^{-6} mm/mm) şekildeğiştirme değerine kadar çelik plakada oluşan şekildeğiştirmeler sürekli artmış, bu değere ulaşıldığında ise şekildeğiştirmeler ani bir şekilde azalmaya başlamıştır. Söz konusu şekildeğiştirme değeri (586.2 με) çeliğin karakteristik akma şekildeğiştirme değerinden (≈2000 με) daha küçüktür. Çelik plakalar, akma şekildeğiştirmesine ulaşmadan elastik burkulma davranışı göstermiş ve yerdeğiştirmeler itmede 2.0 mm'ye ulaştığında 75.34 kN'luk yük değerinde yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamıştır.

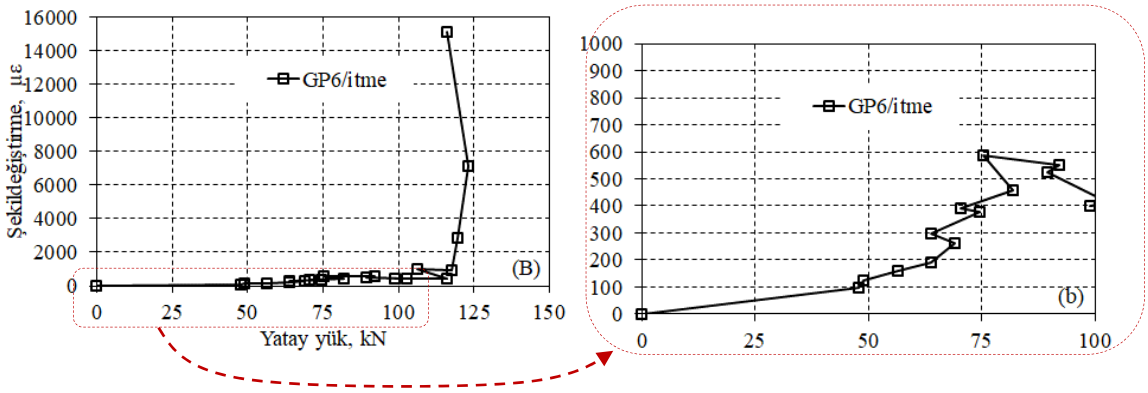


Şekil 3.57. Deney düzeneğinin ve deney elemanının görünümleri

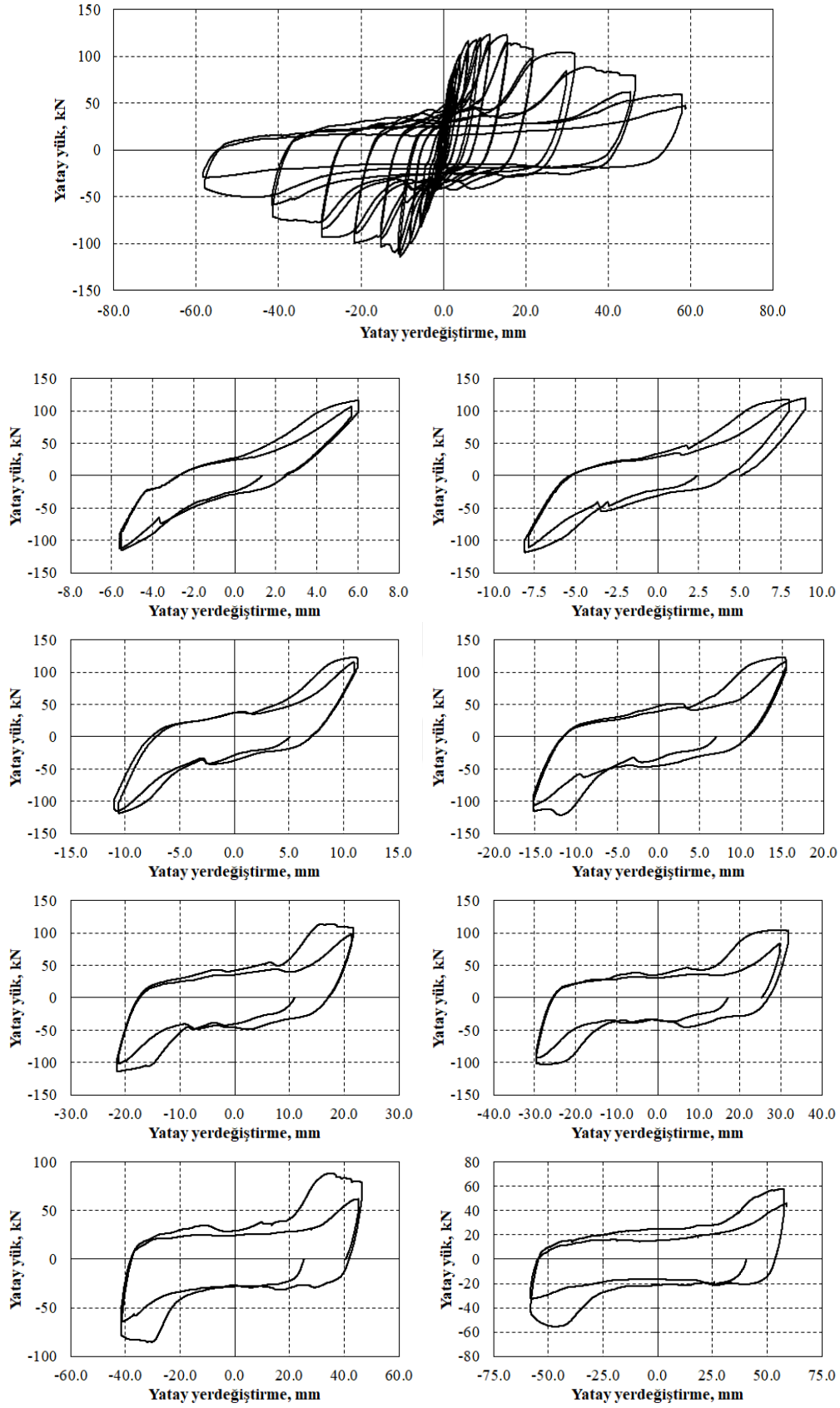
S-ÇP-1 deney elemanının, çevrimsel yükleme etkisinde elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.60'de verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir. Çelik plakaların elastik burkulma davranışı gösterdiği beşinci yerdeğiştirme adımından sonra 2.80 m yerdeğiştirmede (altıncı yerdeğiştirme adımı) yatay yük seviyesi itmede ve çekmede sırasıyla 92.06 kN ve 91.99 kN'a ulaşmıştır. Bu aşamada yük taşıma kapasitesi elastik burkulma yüküne göre % 22.2 artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına kadar (10.70 mm) yük taşıma kapasitesi sürekli artış göstermiştir. Yerdeğiştirmeler itmede 10.70 mm'ye ulaştığında, deney elemanı nihai yük taşıma kapasitesine sırasıyla itmede 123.22 kN, çekmede ise 121.14 kN değerlerinde ulaşmıştır (bk. Şekil 3.60).



Şekil 3.58. S-ÇP-1 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi

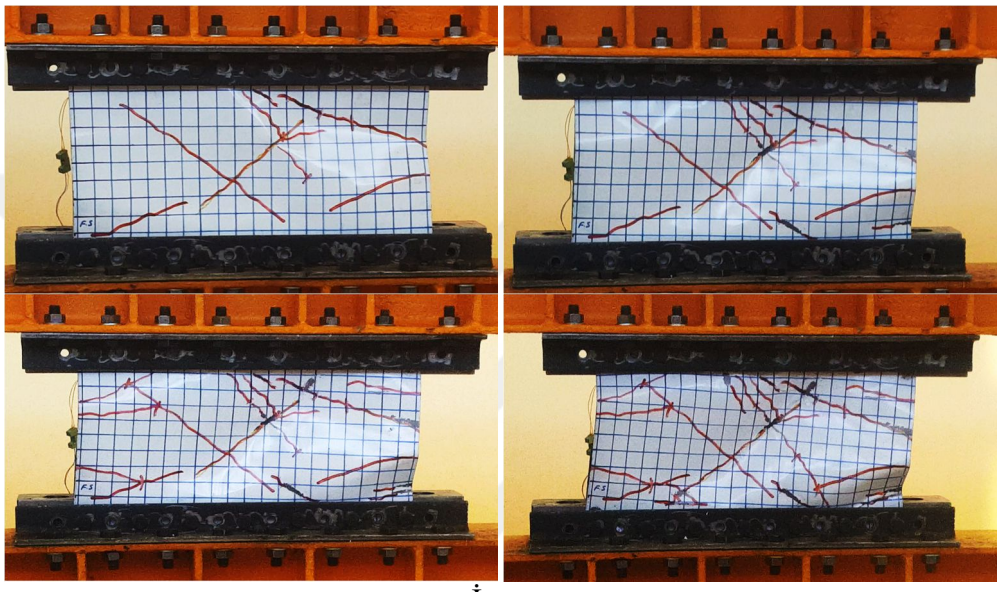


Şekil 3.59. S-ÇP-1 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi

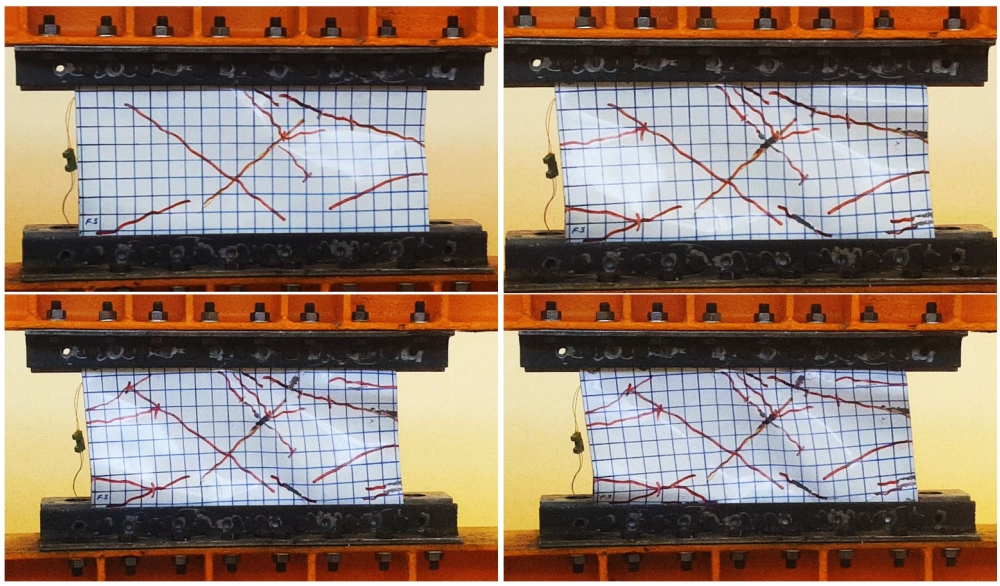


Şekil 3.60. S-ÇP-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Bu şekillerden görüldüğü gibi deney elemanı on ikinci yerdeğiştirme adımına (≈21.10 mm) ulaştığında, yük taşıma kapasitesi itmede 114.0 kN, çekmede 113.13 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda yatay yük seviyesi, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 8 azalmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ön ve arka kısımdaki çelik plakların çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde genişlemeler gözlemlenmiştir. Ayrıca çelik plakların gövdesinde elastik ötesi burkulma davranışı belirginleşmeye başlamıştır (Şekil 3.61).



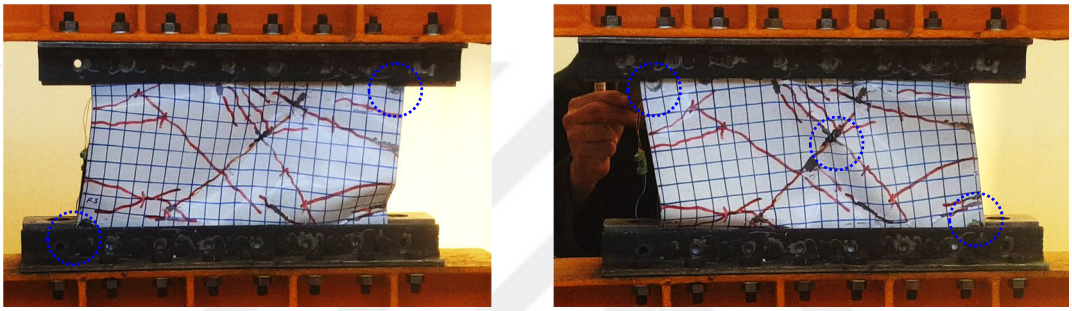
İtme



Çekme

Şekil 3.61. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri

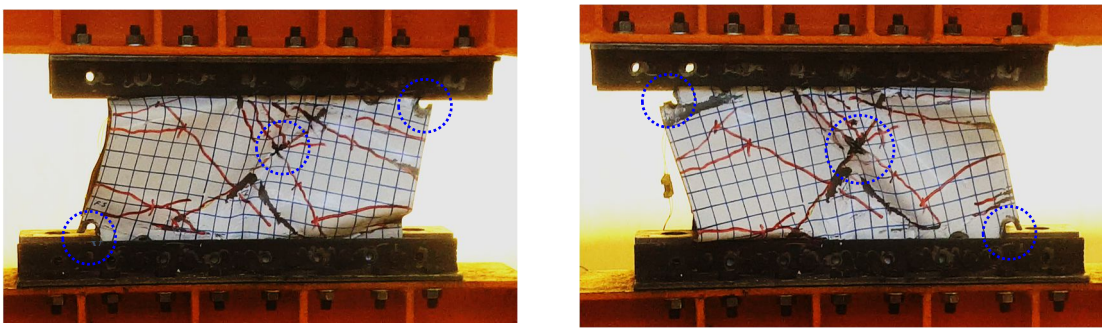
On üçüncü yerdeğiştirme adımında (29.5 mm) yatay yük değeri itmede 104.16 kN, çekmede ise 102.43 kN olarak elde edilmiştir. Bu yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yatay yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 18.3 azalmıştır. Bu aşamada, çelik plakların mesnetlendiği bağlantı deliklerinde oluşan hasarlar gözle görülür derecede artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakların köşe bölgelerindeki bağlantı delikleri kopmuştur. Ayrıca ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde yorulma etkisiyle "X" şeklinde yırtılma oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 3.62).



İtme Çekme

Şekil 3.62. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri (13.adım)

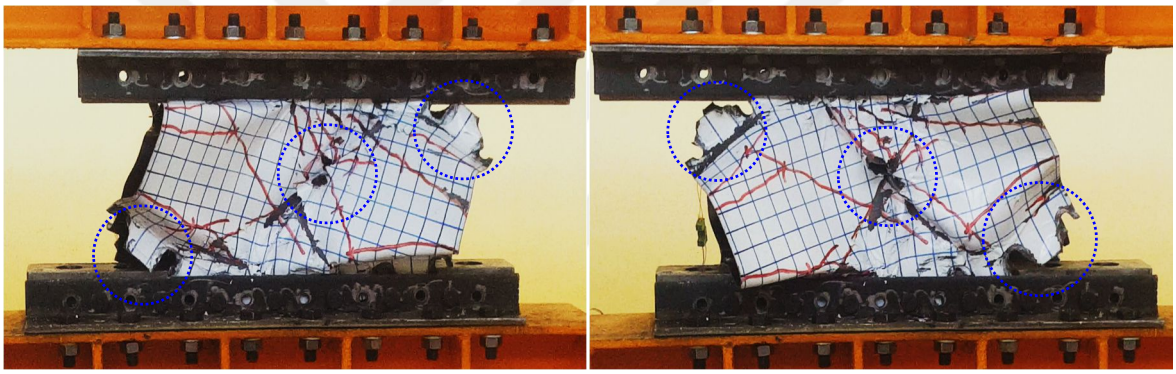
On dördüncü yerdeğiştirme adımında (41.30 mm), yatay yük değeri itmede 88.50 kN, çekme de ise 85 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 39.2 azalmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Ayrıca ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde yorulma etkisiyle oluşan "X" şeklindeki yırtılma büyümüştür (Şekil 3.63).



İtme Çekme

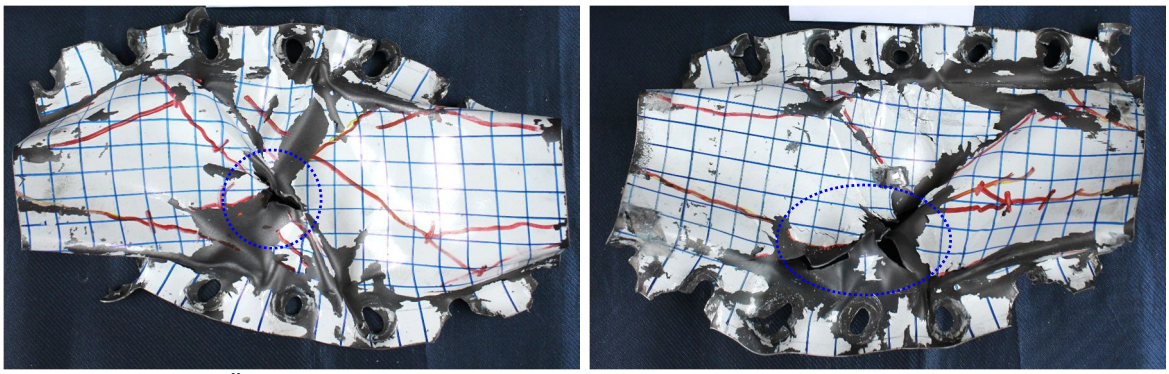
Şekil 3.63. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri (14. adım)

On beşinci yerdeğiştirme adımında (57.80 mm), yatay yük değeri itmede 57.84 kN, çekme de ise 55.5 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 113 azalmış ve deney sonlandırılmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Oluşan bu hasarların detaylı görünümleri Şekil 3.64'te verilmiştir. Nihai durumda ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde yorulma etkisiyle oluşan "X" şeklinde yırtılma büyümüştür. Şekil 3.66'da ön ve arka yüzündeki çelik plakların gövdesinde, yorulma etkisiyle oluşan "X" şeklindeki yırtılmanın detaylı görünümleri verilmiştir. Deney sonucunda çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır.



İtme Çekme

Şekil 3.64. S-ÇP-1 elemanının deney anından görünümleri (15. adım)



Ön plaka Arka plaka

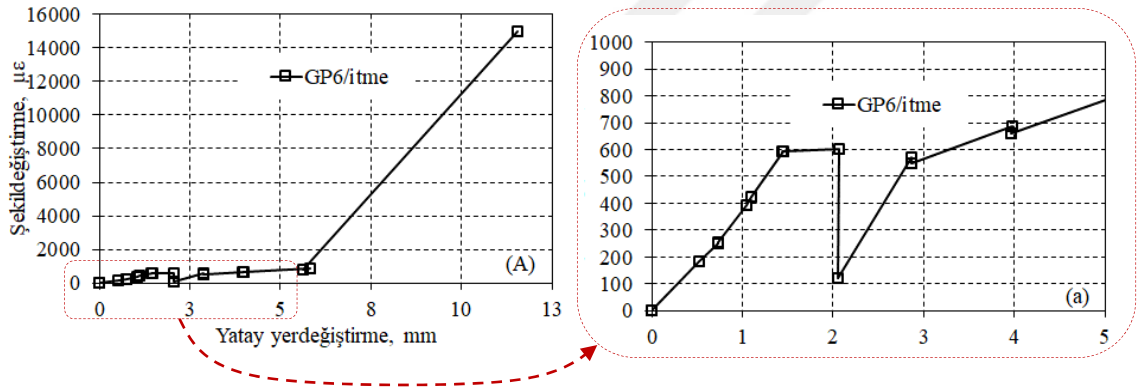
Şekil 3.65. S-ÇP-1 elemanının nihai hasar durumları

3.2.8. Kalınlığı 2.00 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-2)

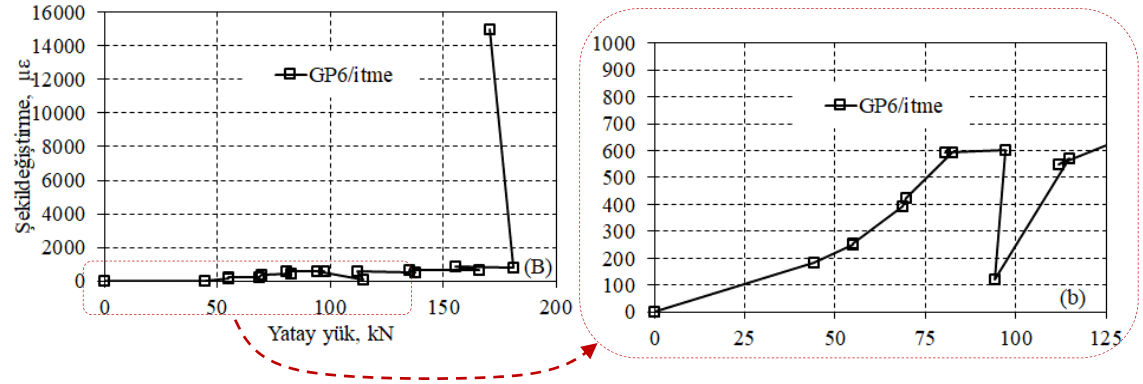
Kalınlığı 2.00 mm olan çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-ÇP-2) görünümleri Şekil 3.66'da verilmiştir. S-ÇP-2 sönümleyici deney elemanını oluşturan çelik plakalarda meydana gelen şekildeğiştirmelerin belirlenebilmesi amacıyla, çevrimsel yükleme nedeniyle basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalan plaka düzlemindeki diyagonal bantların kesişim bölgelerine gerinim pulu (GP) yapıştırılmıştır (bk. Şekil 3.66). Yükleme protokolüne uygun olarak gerçekleştirilen çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen veriler yardımıyla çizilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme-yatay yük eğrileri sırasıyla Şekil 3.67 ve Şekil 3.68'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi 600 με (10^{-6} mm/mm) şekildeğiştirme değerine kadar çelik plakada oluşan şekildeğiştirmeler sürekli artmış, bu değere ulaşıldığında ise şekildeğiştirmeler ani bir şekilde azalmaya başlamıştır. Söz konusu şekildeğiştirme değeri (600 με) çeliğin karakteristik akma şekildeğiştirme değerinden (≈2000 με) daha küçüktür. Çelik plakalar, akma şekildeğiştirmesine ulaşmadan elastik burkulma davranışı göstermiş ve yerdeğiştirmeler itmede 2.07 mm'ye ulaştığında 97 kN'luk yük değerinde yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamıştır.

Şekil 3.66. Deney düzeneğinin ve deney elemanının görünümleri

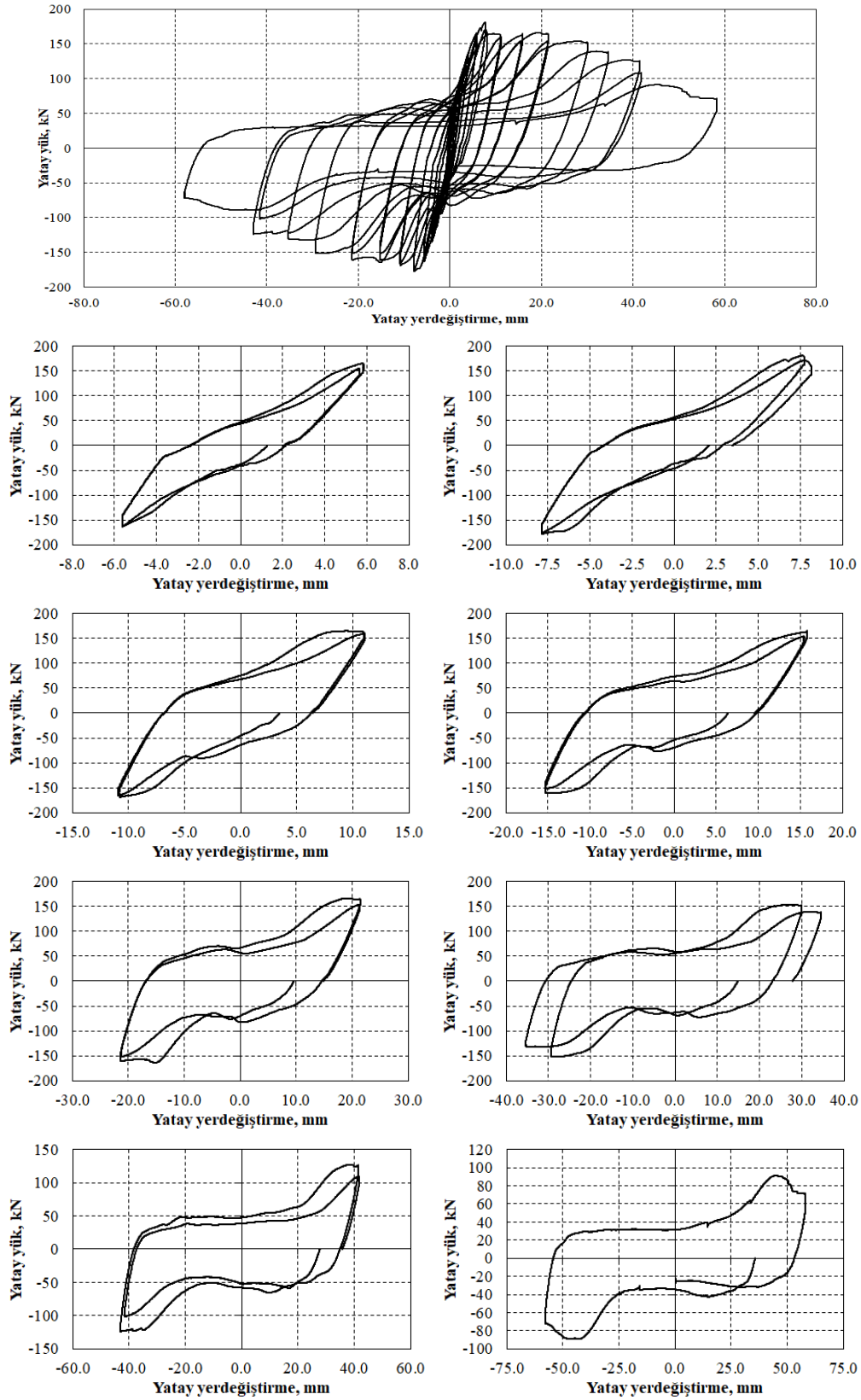
S-ÇP-2 deney elemanının, çevrimsel yükleme etkisinde elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.69'da verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, çelik plakaların elastik burkulma davranışı gösterdiği beşinci yerdeğiştirme adımından sonra altıncı yerdeğiştirme adımında (2.80 mm) yatay yük seviyesi itmede ve çekmede sırasıyla 114.70 kN ve 114.34 kN'a ulaşmıştır. Bu aşamada yük taşıma kapasitesi elastik burkulma yüküne göre % 18.2 artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına kadar (10.7 mm) yük taşıma kapasitesi sürekli artış göstermiştir. Yerdeğiştirmeler itmede 7.70 mm'ye ulaştığında, deney elemanı yük taşıma kapasitesi sırasıyla itmede 181.18 kN, çekmede ise 177.66 kN olarak elde edilmiştir (bk. Şekil 3.69).



Şekil 3.67. S-ÇP-2 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi

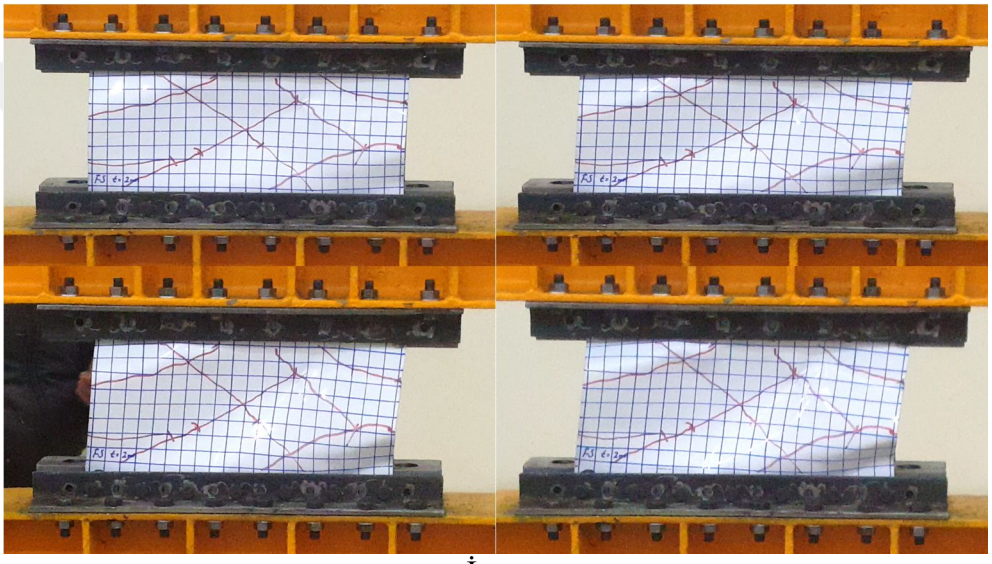


Şekil 3.68. S-ÇP-2 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi

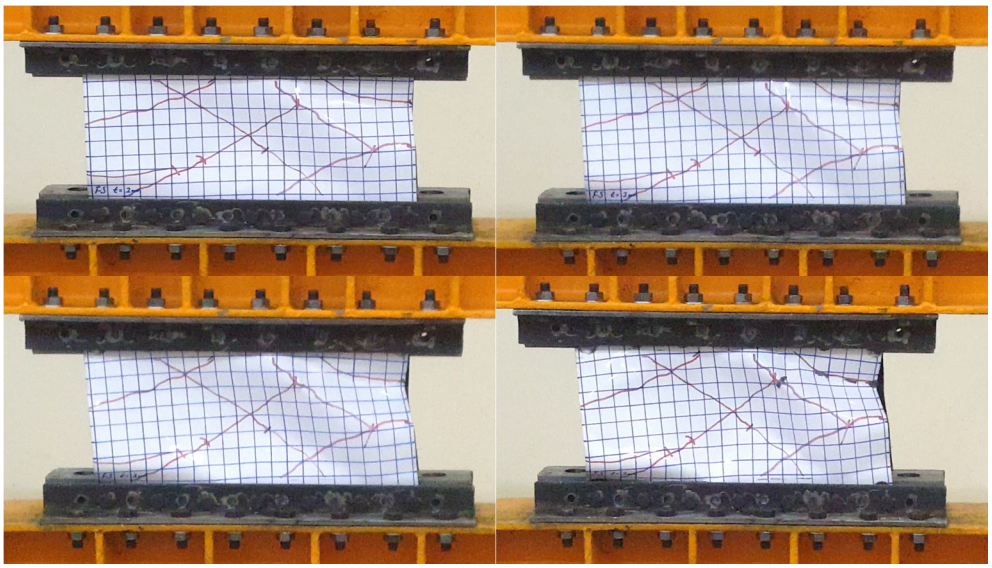


Şekil 3.69. S-ÇP-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Bu şekillerden görüldüğü gibi deney elemanı maksimum yük değerine ulaştığı dokuzuncu yerdeğiştirme adımından sonra devam eden çevrimlerde on ikinci yerdeğiştirme adımına (21.10 mm) gelindiğinde yük taşıma kapasitesi itmede 166.17 kN, çekmede 164.45 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda yatay yük seviyesi, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 9 azalmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ön ve arka kısımdaki çelik plakların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde genişlemeler gözlemlenmiştir. Ayrıca çelik plakaların gövdesinde elastik ötesi burkulma davranışı belirginleşmeye başlamıştır (Şekil 3.70).



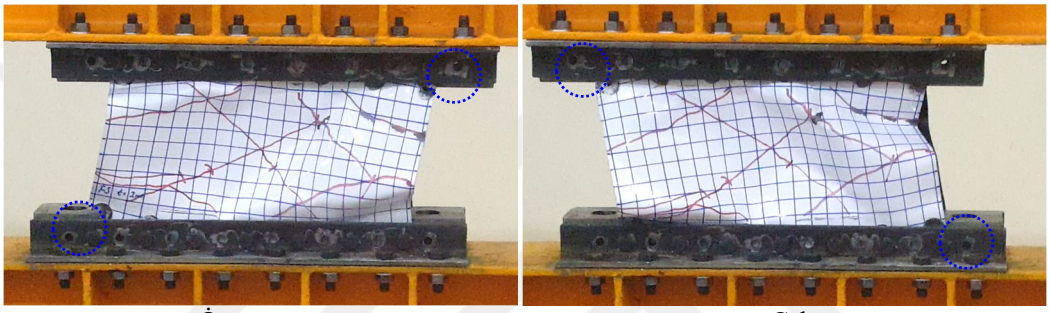
İtme



Çekme

Şekil 3.70. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri

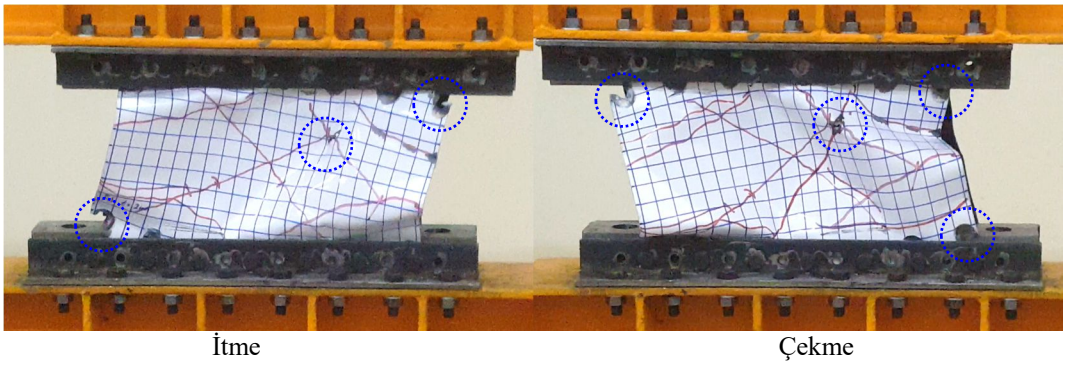
On üçüncü yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (29.5 mm) yatay yük değeri itmede 153.82 kN, çekmede ise 151.62 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yatay yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 17.7 azalmıştır. Bu yerdeğiştirme adımında, çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde oluşan hasarlar gözle görülür derecede artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı delikleri kopmuştur. Ayrıca ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde yorulma etkisiyle "X" şeklinde çatlama oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 3.71).



İtme Çekme

Şekil 3.71. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri (13. adım)

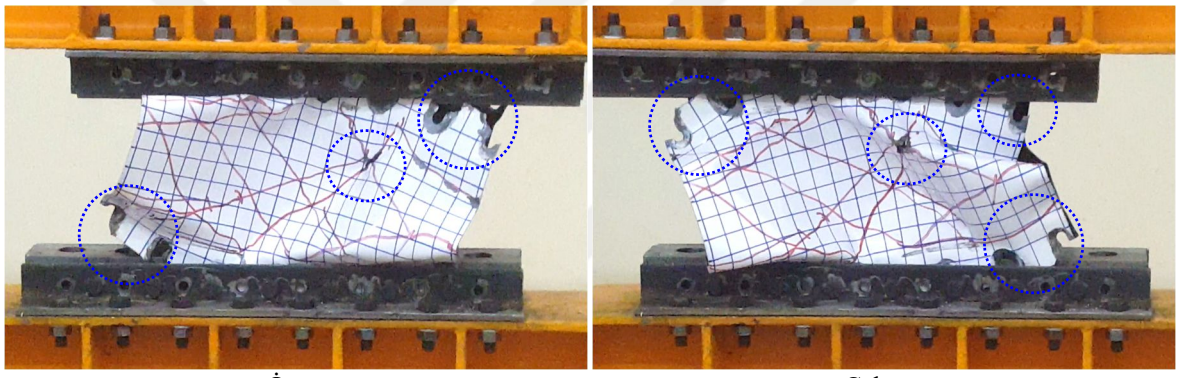
On dördüncü yerdeğiştirme adımında (41.30 mm), yatay yük değeri itmede 127.20 kN, çekme de ise 123.68 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 42.4 azalmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Ayrıca ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde yorulma etkisiyle oluşan "X" şeklindeki çatlama büyümüştür (Şekil 3.72).



İtme Çekme

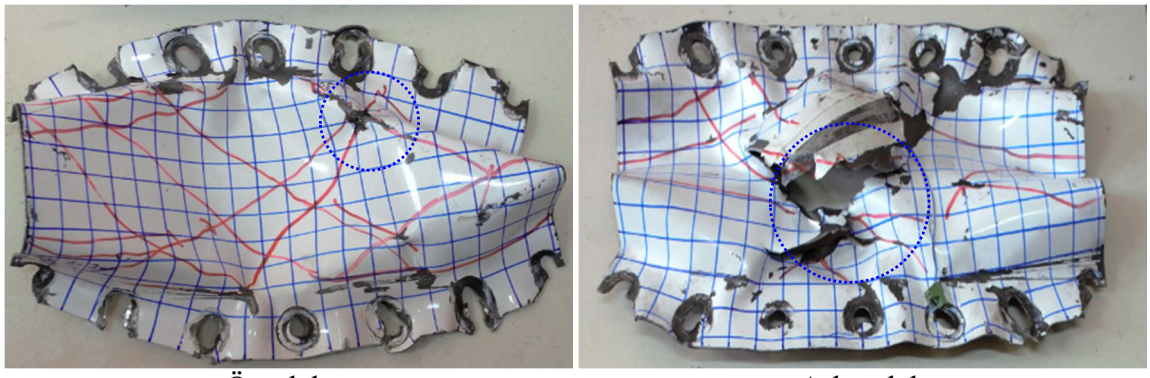
Şekil 3.72. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri (14. adım)

On beşinci yerdeğiştirme adımında (57.80 mm), yatay yük değeri itmede 91.46 kN, çekme de ise 89.38 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 98 azalmış ve deney sonlandırılmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Oluşan bu hasarların detaylı görünümleri Şekil 3.73'de verilmiştir. Nihai durumda ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde yorulma etkisiyle oluşan "X" şeklinde çatlama büyümüştür. Şekil 3.74'de ön ve arka yüzündeki çelik plakaların gövdesinde, yorulma etkisiyle oluşan "X" şeklindeki yırtılmanın detaylı görünümleri verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır.



İtme Çekme

Şekil 3.73. S-ÇP-2 elemanının deney anından görünümleri (15. adım)

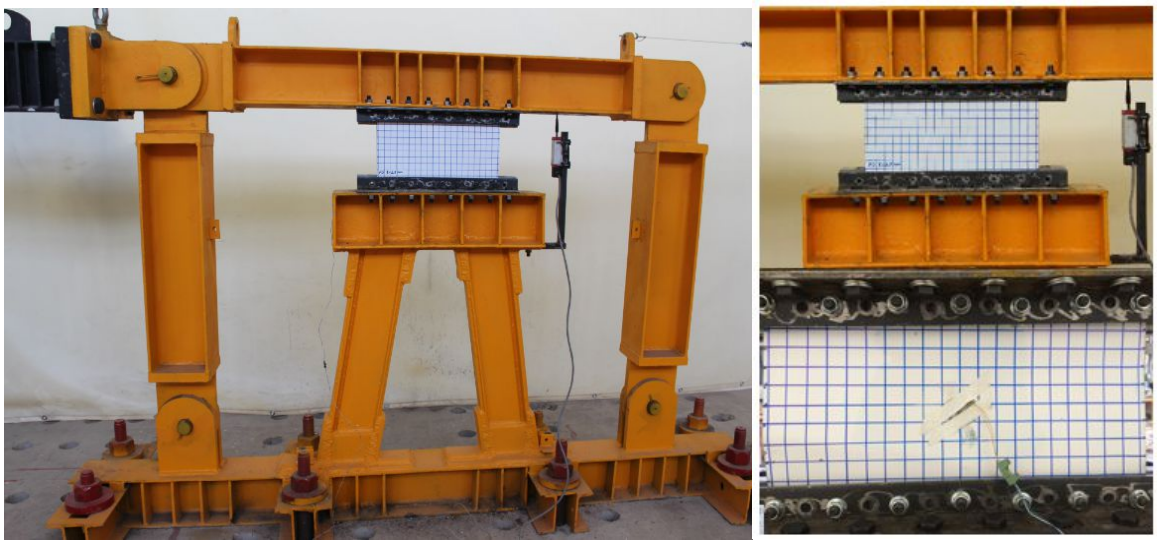


Ön plaka Arka plaka

Şekil 3.74. S-ÇP-2 elemanının nihai hasar durumları

3.2.9. Kalınlığı 2.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-3)

Kalınlığı 2.50 mm olan çelik plakaların kullanıldığı sönümleyici deney elemanının (S-ÇP-3) görünümleri Şekil 3.75'de verilmiştir. S-ÇP-3 sönümleyici deney elemanını oluşturan çelik plakalarda meydana gelen şekildeğiştirmelerin belirlenebilmesi amacıyla, çevrimsel yükleme nedeniyle basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalan plaka düzlemindeki diyagonal bantların kesişim bölgelerine gerinim pulu (GP) yapıştırılmıştır (bk. Şekil 3.75). Yükleme protokolüne uygun olarak gerçekleştirilen çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen veriler yardımıyla çizilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme-yatay yük eğrileri sırasıyla Şekil 3.76 ve Şekil 3.77'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi 522 με (10^{-6} mm/mm) şekildeğiştirme değerine kadar çelik plakada oluşan şekildeğiştirmeler sürekli artmış, bu değere ulaşıldığında ise şekildeğiştirmeler ani bir şekilde azalmaya başlamıştır. Söz konusu şekildeğiştirme değeri (522 με) çeliğin karakteristik akma şekildeğiştirme değerinden (≈2000 με) daha küçüktür. Çelik plakalar, akma şekildeğiştirmesine ulaşmadan elastik burkulma davranışı göstermiş ve yerdeğiştirmeler itmede 2.80 mm'ye ulaştığında 111.30 kN'luk yük değerinde yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamıştır.

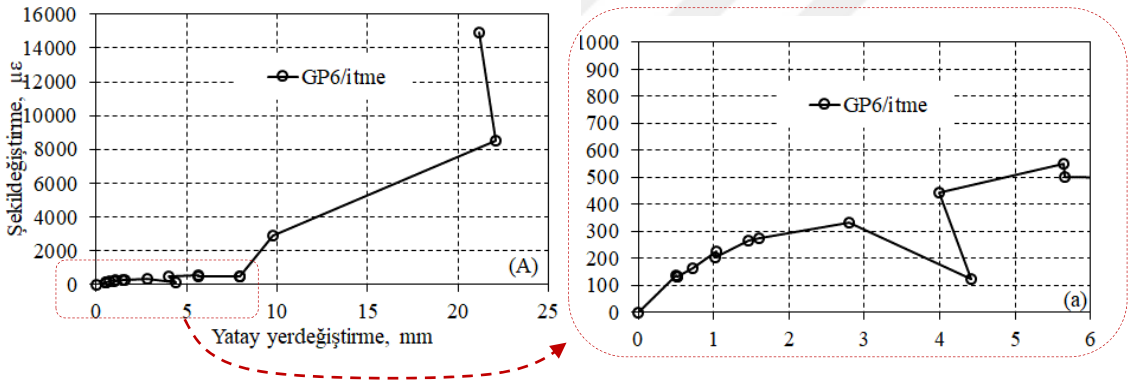


Şekil 3.75.Deney düzeneğinin ve deney elemanının görünümleri

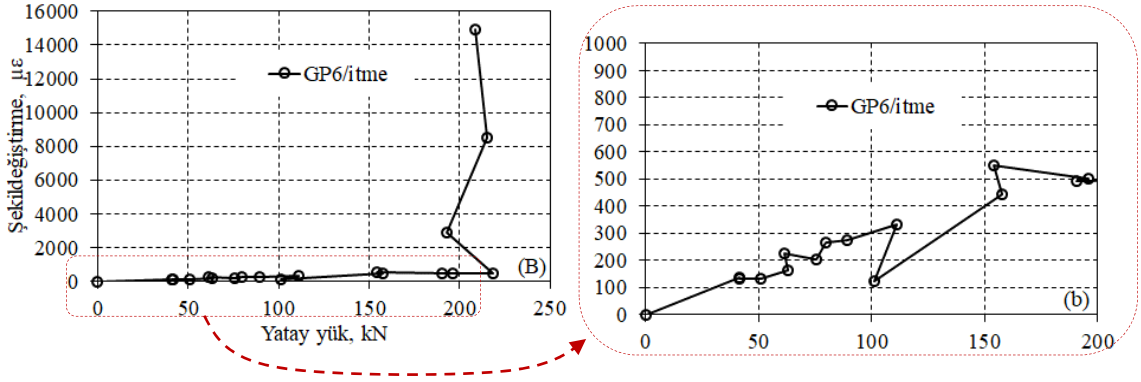
S-ÇP-3 deney elemanının, çevrimsel yatay yük etkisinde elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.78'de verilmiştir. Bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay

yükleme etkisinde elastik ötesi davranışların belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.

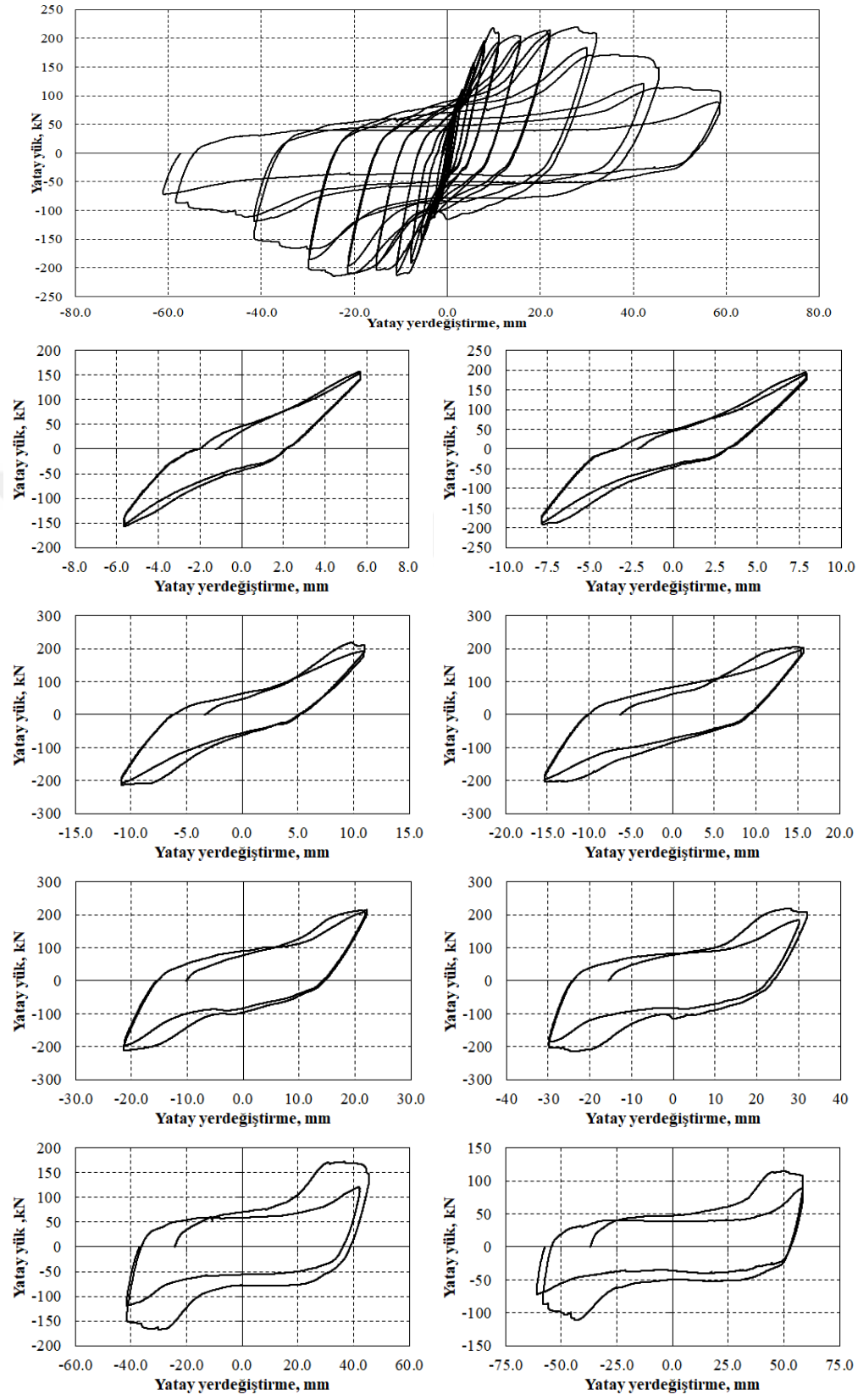
Çelik plakaların elastik burkulma davranışı gösterdiği altıncı yerdeğiştirme adımından sonra yedinci yerdeğiştirme adımında yük taşıma kapasitesi artmıştır. Sekizinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (5.50 mm) yatay yük seviyesi itmede ve çekmede sırasıyla 157.43 kN ve 157.21 kN'a ulaşmıştır. Bu aşamada yük taşıma kapasitesi elastik burkulma yüküne göre % 41.4 artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına kadar (10.7 mm) yük taşıma kapasitesi sürekli artış göstermiştir. Yerdeğiştirmeler itmede yaklaşık olarak 9.80 mm'ye ulaştığında, deney elemanı yük taşıma kapasitesi sırasıyla itmede 218.13 kN, çekmede ise 213.82 kN olarak elde edilmiştir (bk. Şekil 3.78).



Şekil 3.76. S-ÇP-3 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi

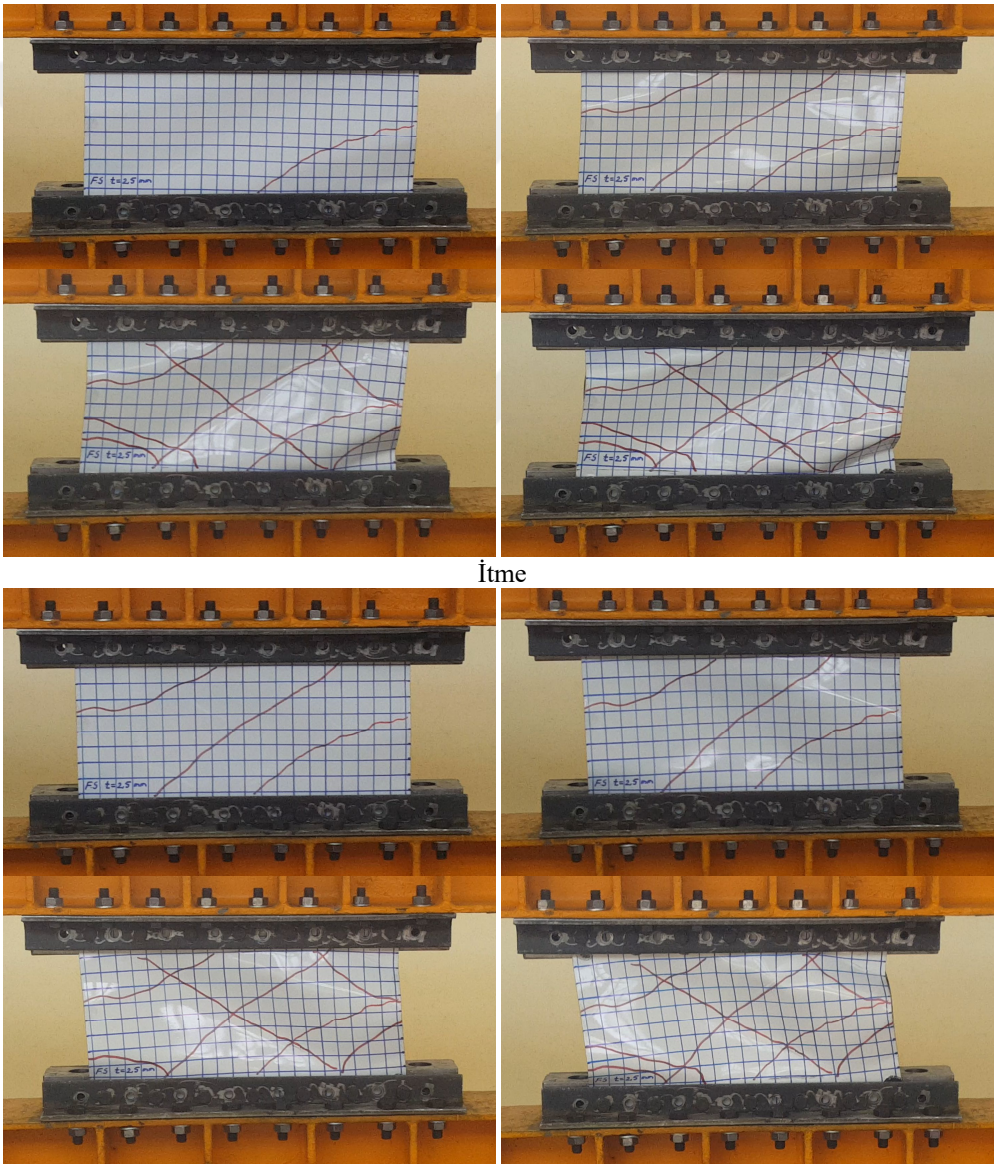


Şekil 3.77.S-ÇP-3 deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi



Şekil 3.78. S-ÇP-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.78'de görüldüğü gibi deney elemanı maksimum yük değerine ulaştığı onuncu yerdeğiştirme adımından sonra devam eden çevrimlerde on ikinci yerdeğiştirme adımına (21.10 mm) gelindiğinde yük taşıma kapasitesi itmede 214.89 kN, çekmede 210.64 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda yatay yük seviyesi, nihai yük taşıma kapasitesine göre %1.50 azalmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ön ve arka kısımdaki çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde genişlemeler gözlemlenmiştir. Ayrıca çelik plakaların gövdesinde elastik ötesi burkulma davranışı belirginleşmeye başlamıştır (Şekil 3.79).

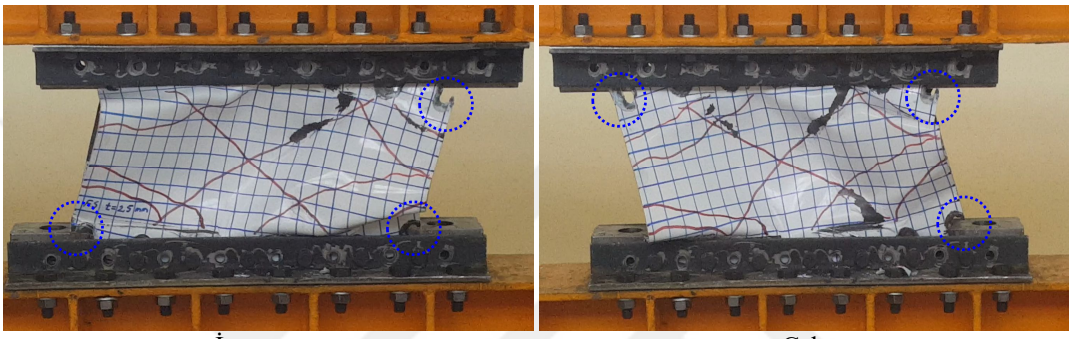


İtme

Çekme

Şekil 3.79. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri

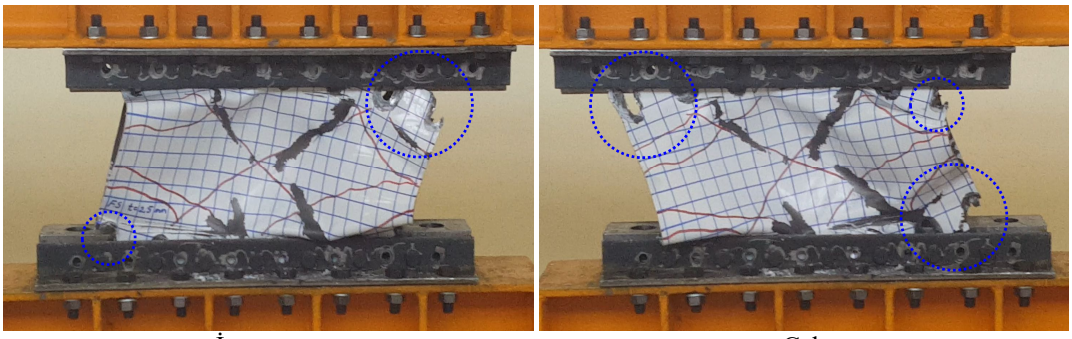
On üçüncü yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (29.5 mm) yatay yük değeri itmede 218.40 kN, çekmede ise 213.80 kN değerine ulaşmıştır. Bu durumda elde edilen maksimum yatay yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesiyle yaklaşık olarak aynıdır. Bu yerdeğiştirme adımında, çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde oluşan hasarlar gözle görülür derecede artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı delikleri kopmuştur (Şekil 3.80).



İtme Çekme

Şekil 3.80. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri (13. adım)

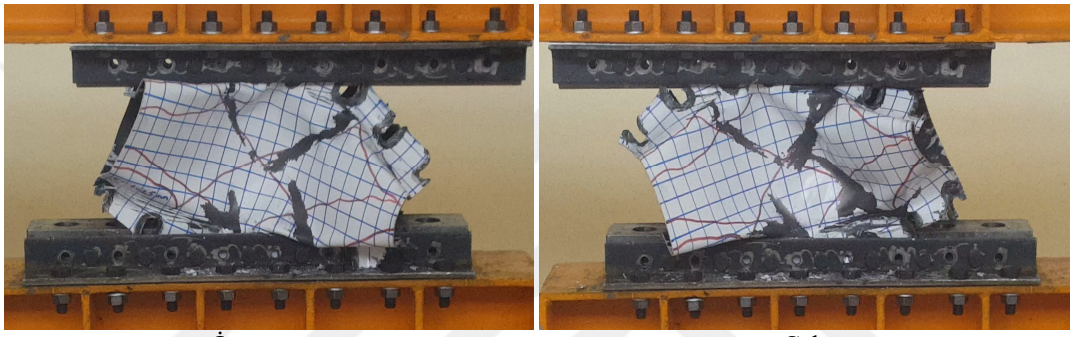
On dördüncü yerdeğiştirme adımında (41.30 mm), yatay yük değeri itmede 171.79 kN, çekme de ise 167.42 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 27 azalmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Bun rağmen ön ve arka kısımlardaki çelik plakaların gövdelerinde herhangi çatlama ve/veya yırtılma tipi bir hasar gözlenmemiştir (Şekil 3.81).



İtme Çekme

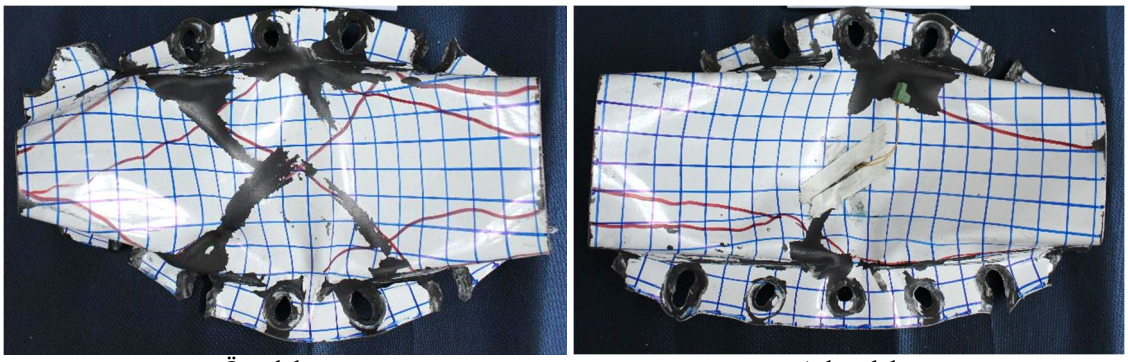
Şekil 3.81. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri (14. adım)

On beşinci yerdeğiştirme adımında (57.80 mm), yatay yük değeri itmede 114.30 kN, çekme de ise 111.18 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, nihai yük taşıma kapasitesine göre % 90.8 azalmış ve deney sonlandırılmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Oluşan bu hasarların detaylı görünümleri Şekil 3.82 ve Şekil 3.83'te verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri, düşey ve yatay bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır.



İtme Çekme

Şekil 3.82. S-ÇP-3 elemanının deney anından görünümleri (15. adım)

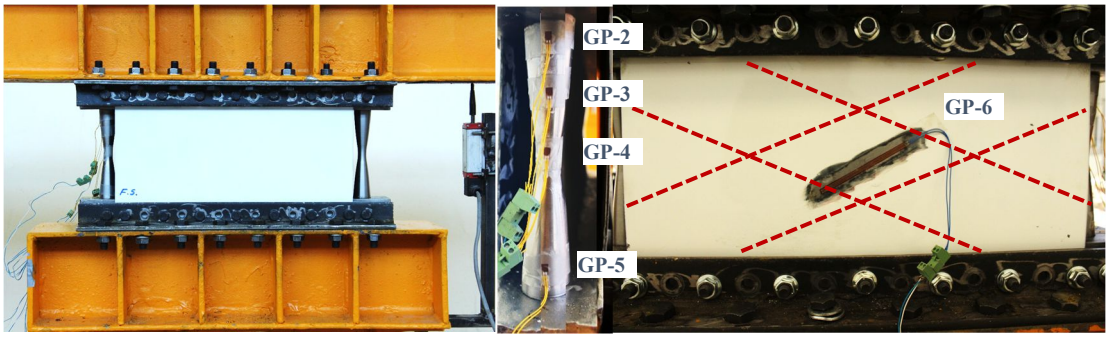


Ön plaka Arka plaka

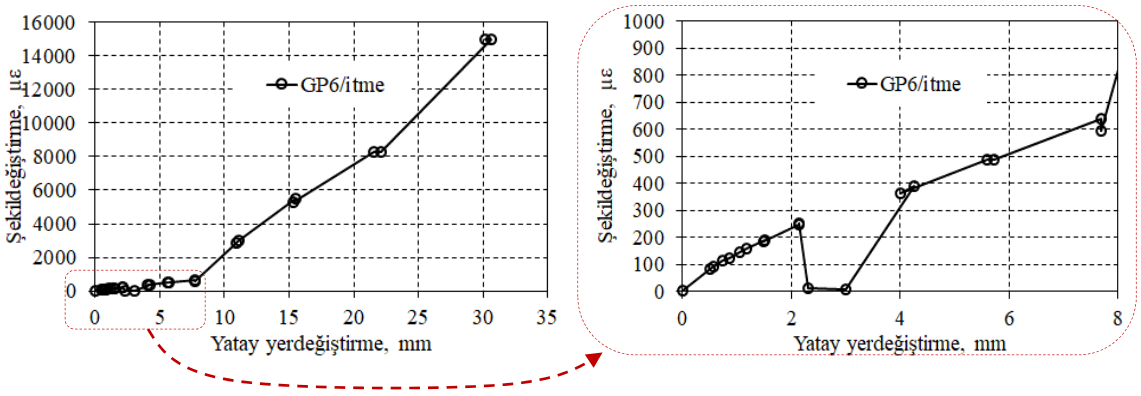
Şekil 3.83. S-ÇP-3 elemanının nihai hasar durumları

3.2.10. İki Bileşenli Enerji Sönümleyici (İBES) Deney Elemanı

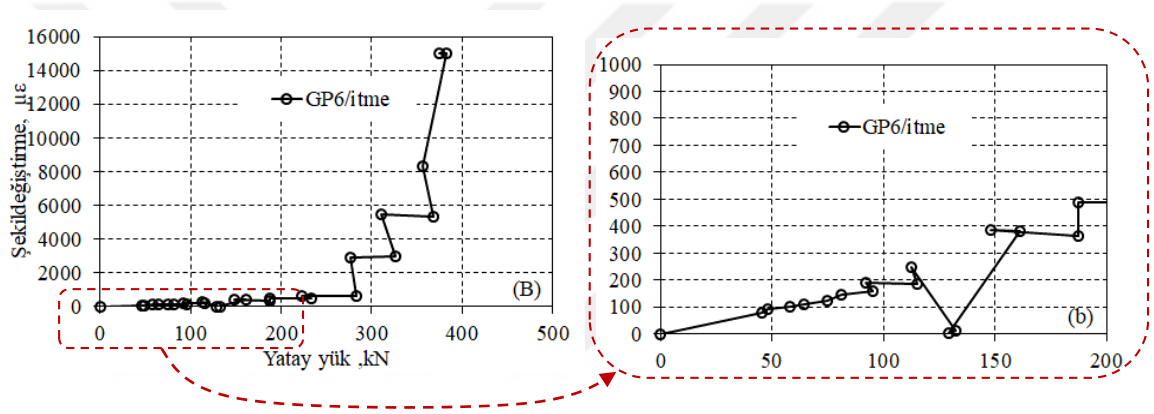
İki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) deney elemanının görünümleri Şekil 3.84'te verilmiştir. İBES deney elemanını oluşturan KSDE çelik çubuklardan C1 ve C4 numaralı çubuklara yapıştırılan GP'ler yardımıyla yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, sönümleyici deney elemanını oluşturan ve ana parçalardan olan çelik plakalarda meydana gelen şekildeğiştirmelerin belirlenebilmesi amacıyla da çevrimsel yükleme nedeniyle basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalan plaka düzlemindeki diyagonal bantların kesişim bölgelerine gerinim pulu (GP) yapıştırılmıştır (bk. Şekil 3.84). Yükleme protokolüne uygun olarak gerçekleştirilen çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen veriler yardımıyla oluşturulan yatay yerdeğiştirme-şekildeğiştirme ve yatay yük-şekildeğiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 3.85 ve Şekil 3.86'da verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi 246.19 με (10^{-6} mm/mm) şekildeğiştirme değerine kadar şekildeğiştirmeler sürekli artmış, bu şekildeğiştirme değerine ulaşıldığında ise şekildeğiştirmeler ani bir şekilde azalmaya başlamıştır. Söz konusu şekildeğiştirme değeri (246.19 με) çeliğin karakteristik akma şekildeğiştirme değerinden (≈2000 με) daha küçüktür. Çelik plakalar, akma şekildeğiştirmesine ulaşmadan elastik burkulma davranışı göstermiş ve yerdeğiştirmeler itmede 2.14 mm'ye ulaştığında 115.23 kN'luk yük değerinde yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamıştır.



Şekil 3.84. İBES deney elemanının görünümleri



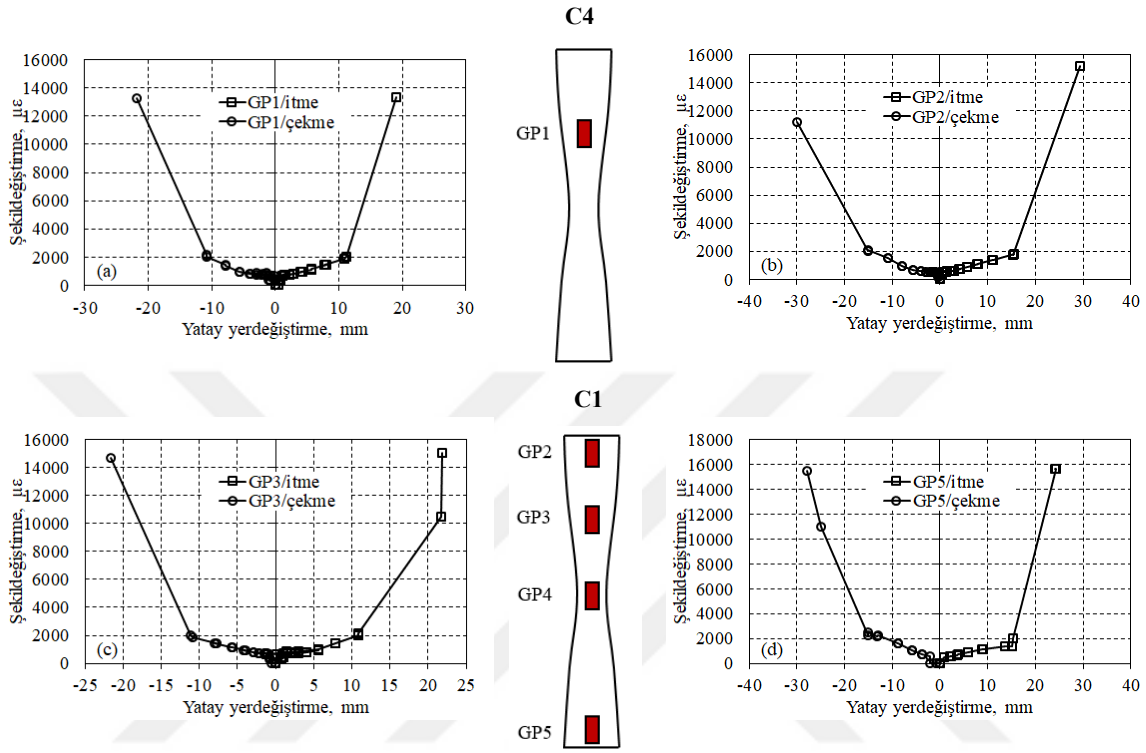
Şekil 3.85. İBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi (ÇP)



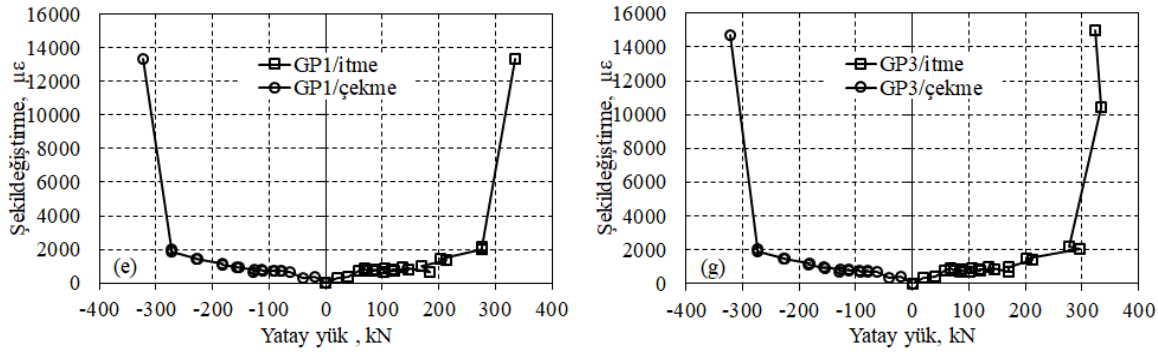
Şekil 3.86. İBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi (ÇP)

C1 ve C4 numaralı çelik çubuklara yapıştırılan GP'ler yardımıyla da KSDE çelik çubukların yatay yerdeğiştirmeye göre şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.87). Şekilden de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000με şekildeğiştirme değerine kadar şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme grafiklerinin eğimi, sönümleyici tasarımda kullanılan çelik plakaların davranışına benzer olarak, KSDE çelik çubukların akma şekildeğiştirme değerine ulaşması ile artmıştır. Yaklaşık olarak 2000με şekildeğiştirme değeri, çeliğin akma şekildeğiştirmesi olup ilk olarak C1 numaralı çelik çubuğun yüzeyinde sırasıyla 10.65 (itme) mm ve 10.70 mm (çekme) yerdeğiştirme değerlerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.87-a, c)). Bu yerdeğiştirme değerlerini içerisinde barındıran onuncu yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler yaklaşık 2020.23 με'a ve yerdeğiştirmeler itmede 10.84 mm'ye ulaştığında, deney elemanının akma yükü 276.94 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.88). İBES deney elemanının, yükleme protokolüne uygun olarak yapılan çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisini gösteren eğri Şekil 3.89'da

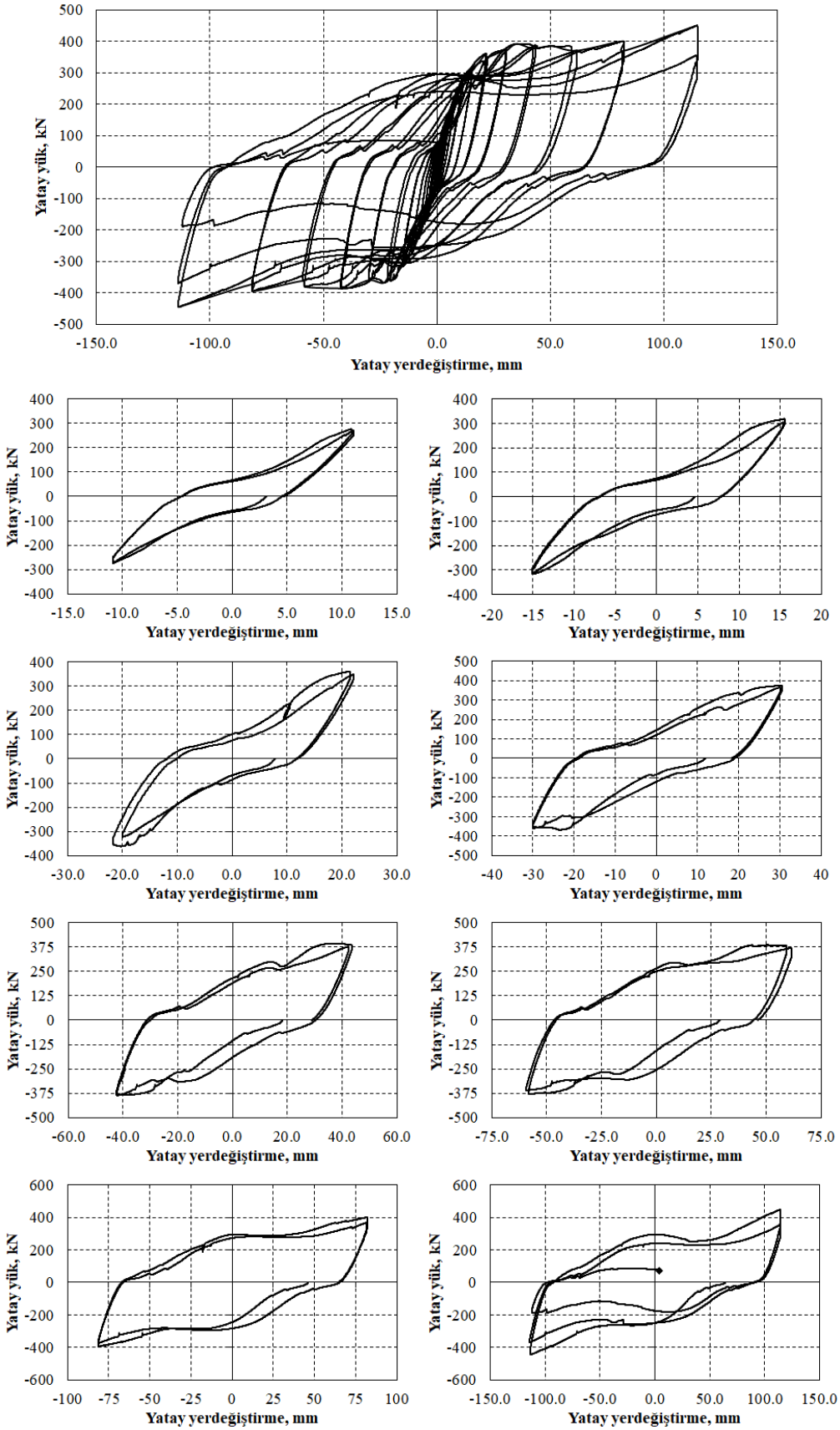
verilmiştir. Ayrıca bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.



Şekil 3.87. C1 ve C4 numaralı çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri

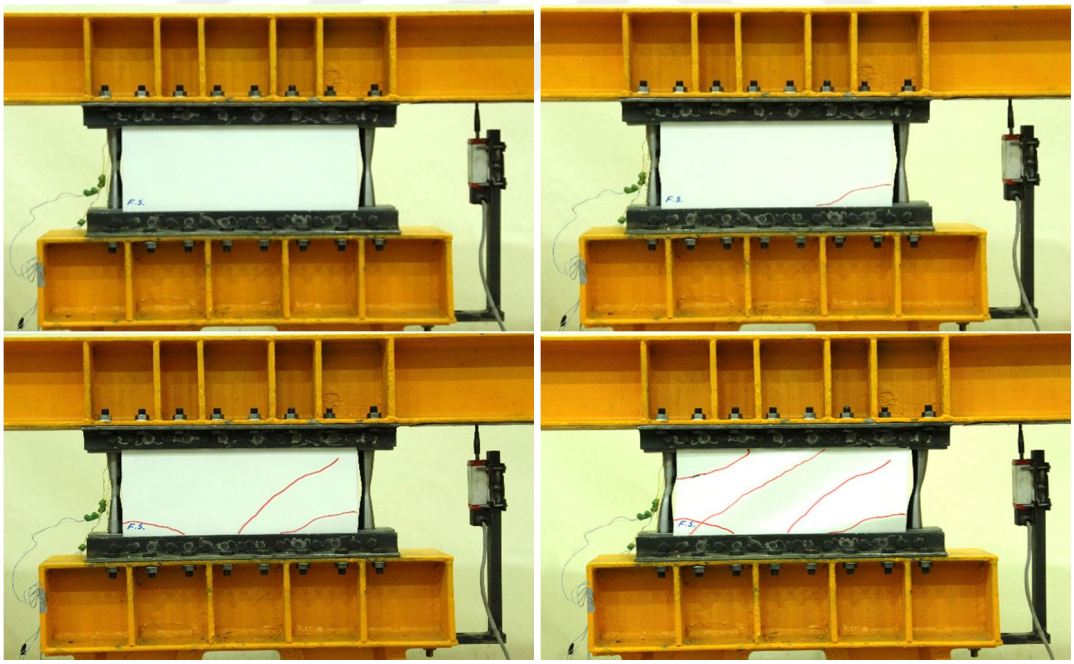


Şekil 3.88. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme yatay yük eğrileri



Şekil 3.89. İBES deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

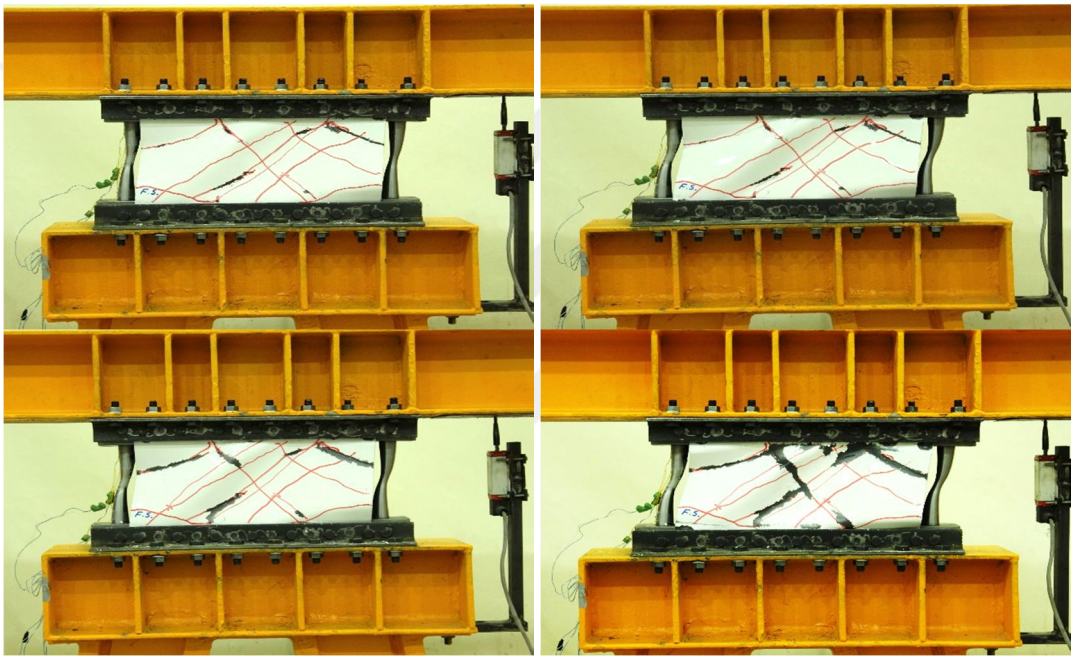
Bu şekillerden görüldüğü gibi deney elemanı akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle deney elemanının dayanımı da artmıştır. On birinci yerdeğiştirme adımına (≈15.0 mm) gelindiğinde KSDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir. Ön ve arka yüzdeki çelik plakalarda ise elastik ötesi burkulma davranışı belirgin hale gelmiştir (Şekil 3.90). Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 318.80 kN, çekmede ise 316.30 kN olarak elde edilmiş ve deney elemanının yük taşıma kapasitesi, akma yüküne göre % 15 artmıştır. On ikinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (21.10 mm) ise yatay yük seviyesi itmede 360.43 kN, çekmede ise 361.58 kN değerine ulaşmıştır. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 30.56 artmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ön ve arka kısımdaki çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde genişlemeler gözlemlenmiş ve çelik plakaların gövdesinde elastik ötesi burkulma davranışı gözle görülür derecede artmıştır. Çelik çubuklarda ise herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir (bk. Şekil 3.90).



Şekil 3.90. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (12. adım)

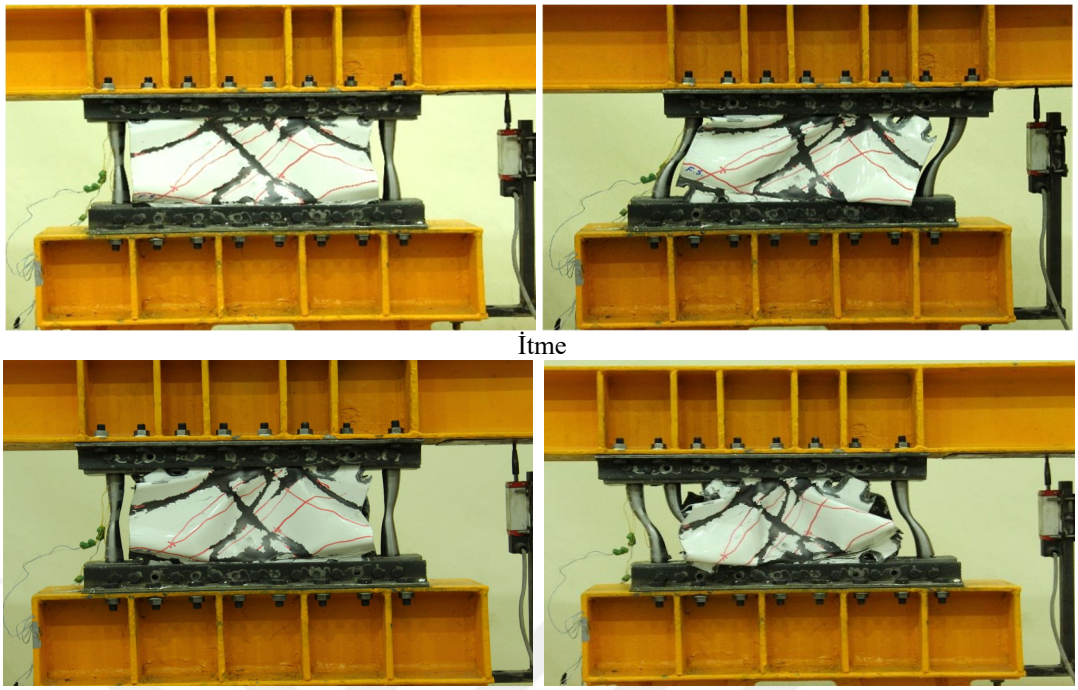
On üçüncü yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (29.5 mm) yatay yük değeri itmede 374.18 kN, çekmede ise 367.54 kN değerine ulaşmıştır. Bu durumda elde edilen maksimum yatay yük değeri, akma yüküne göre % 35 artmıştır. Bu yerdeğiştirme adımında, çelik

plakaların çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde oluşan hasarlar gözle görülür derecede artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki genişlemeler artmıştır. On dördüncü yerdeğiştirme adımında (41.30 mm), yatay yük değeri itmede 391.64 kN, çekme de ise 385.95 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, akma yüküne göre % 41.4 artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmıştır. Çelik çubuklarda ise herhangi hasar gözlemlenmemiştir (Şekil 3.91).



Şekil 3.91. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (14. adım)

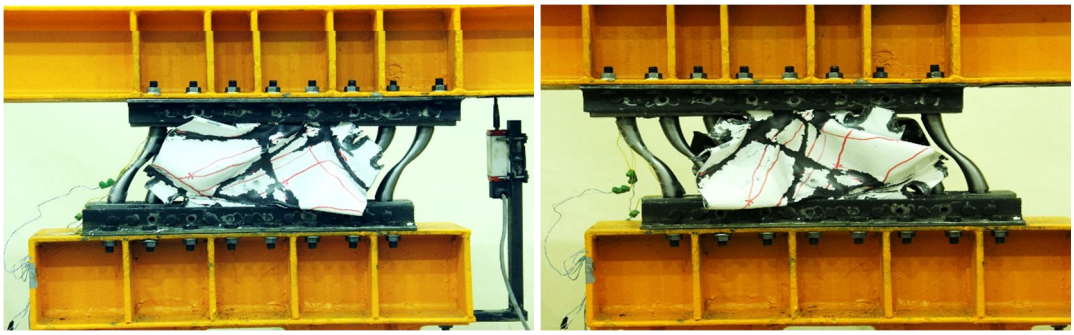
On beşinci yerdeğiştirme adımında (57.80 mm), yatay yük değeri itmede 384.90 kN, çekme de ise 380.62 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, bir önceki yerdeğiştirme adımına göre yaklaşık olarak % 2 azalmıştır. Akma yüküne göre ise yük değeri % 39 artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı delikleri kopmuştur (Şekil 3.92). Çelik çubukların ise dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde oluşan hasarlar gözle görülür hale gelmiştir (Şekil 3.93).



Şekil 3.92. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (15. adım)

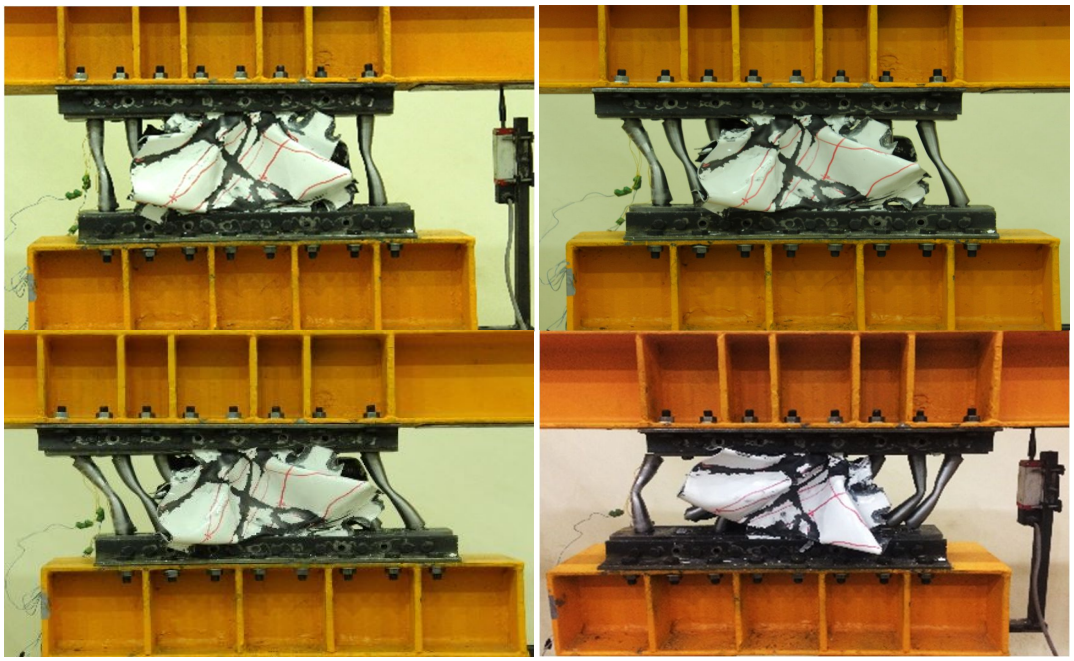
Şekil 3.93. Çelik çubukların mesnet bölgelerinde oluşan hasarların görünümleri

On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar artmıştır. Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda bir düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 400.19 kN, çekmede ise 394.89 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 44.50 artmıştır (Şekil 3.94).



Şekil 3.94. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (16. adım)

On yedinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈113 mm), KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar büyük oranda artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının ikinci çevriminde hem KSDE çelik çubuklar hem de çelik plakalar bloklara mesnetlendiği bölgelerden ayrılmıştır (Şekil 3.95). Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanın dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 450.74 kN ve 444.85 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 62.75 artmıştır. Nihai durumda hem plakaların hem de çelik çubukların hasar durumlarına ait görünümler Şekil 3.96'da verilmiştir.

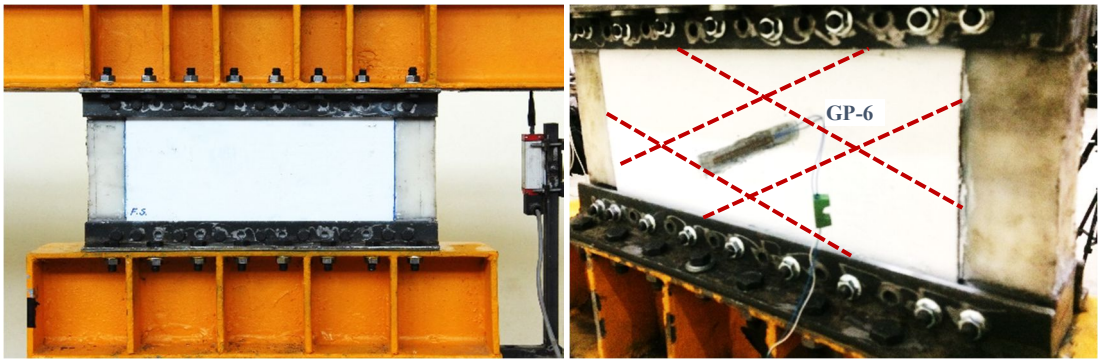


Şekil 3.95. İBES deney elemanının deney anından görünümleri (17. adım)

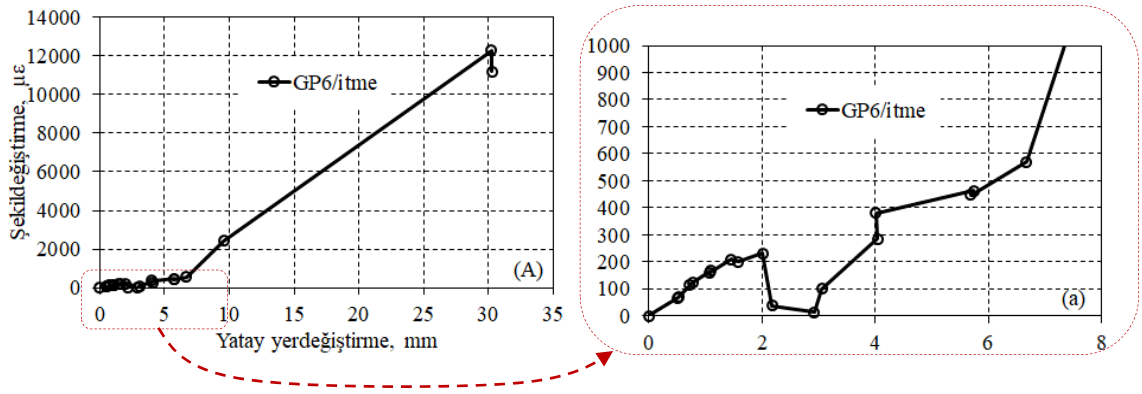
Şekil 3.96. Hem plakaların hem de çelik çubukların nihai hasar durumlarına ait görünümler

3.2.11. Üç Bileşenli Enerji Sönümleyici (ÜBES) Deney Elemanı

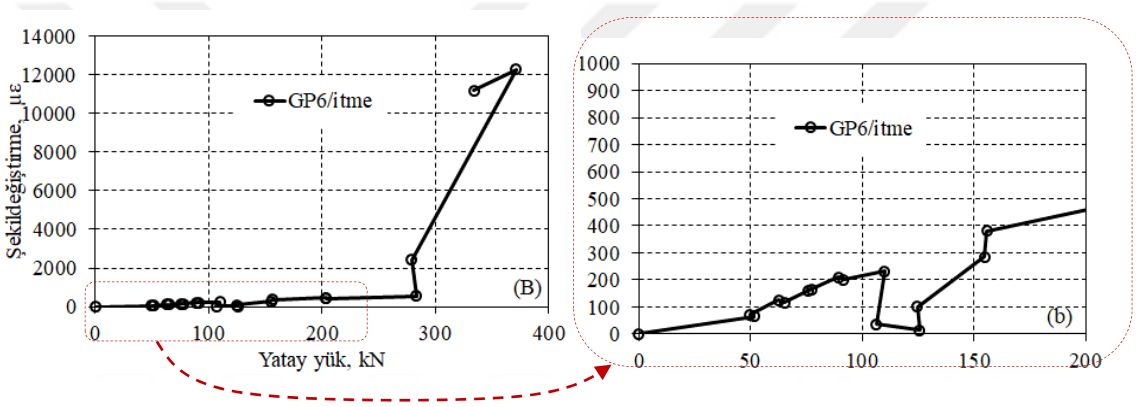
Üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) deney elemanının görünümleri Şekil 3.97'de verilmiştir. ÜBES deney elemanını oluşturan KSDE çelik çubuklardan C1 ve C4 numaralı çubuklara yapıştırılan GP'ler yardımıyla yatay yerdeğiştirme miktarına göre şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir (bk. Şekil 3.97). Ayrıca, sönümleyici deney elemanını oluşturan ve ana parçalardan olan çelik plakalarda meydana gelen şekildeğiştirmelerin belirlenebilmesi amacıyla, çevrimsel yükleme nedeniyle basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalan plaka düzlemindeki diyagonal bantların kesişim bölgelerine gerinim pulu (GP) yapıştırılmıştır (bk. Şekil 3.97). Yükleme protokolüne uygun olarak gerçekleştirilen çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen veriler yardımıyla çizilen yatay yerdeğiştirme-şekildeğiştirme ve yatay yük-şekildeğiştirme zarf eğrileri sırasıyla Şekil 3.98 ve Şekil 3.99'da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi çelik plakadan elde edilen 230.90 με (10^{-6} mm/mm) şekildeğiştirme değerine kadar şekildeğiştirmeler sürekli artmış, bu şekildeğiştirme değerine ulaşıldığında ise şekildeğiştirmeler ani bir şekilde azalmaya başlamıştır. Bu şekildeğiştirme değeri (230.90 με) çeliğin karakteristik akma şekildeğiştirme değeri (2000 με) değerinden daha küçük bir değer olduğundan çelik plakalar akma davranışı gösteremeden, elastik burkulma davranışı göstermiş ve yerdeğiştirmeler itmede 2.01 mm'ye ulaştığında 109.90 kN'luk yük değerinde yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamıştır.



Şekil 3.97. ÜBES deney elemanının görünümleri



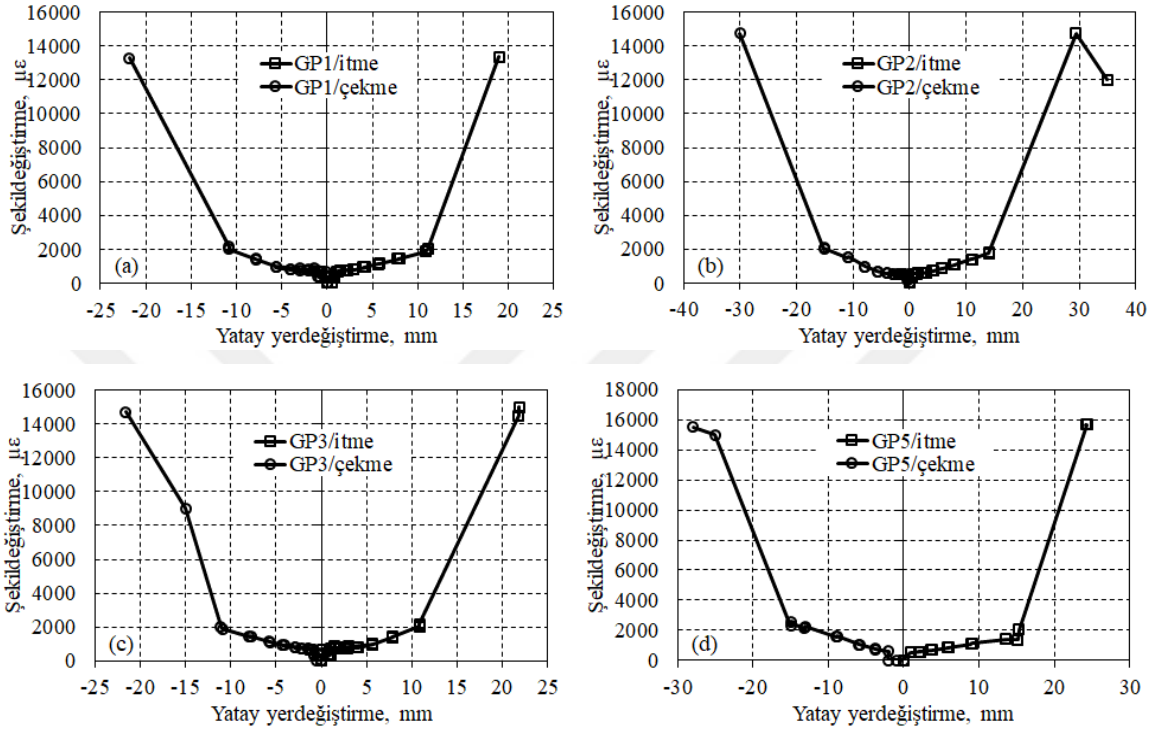
Şekil 3.98. ÜBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrisi



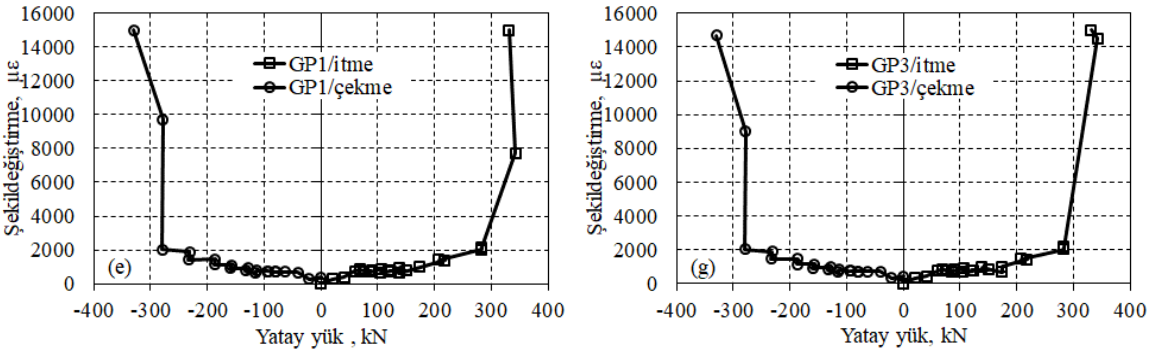
Şekil 3.99. ÜBES deney elemanının şekildeğiştirme-yatay yük eğrisi

C1 ve C4 numaralı çelik çubuklara yapıştırılan GP'ler yardımıyla da KSDE çelik çubukların yatay yerdeğiştirmeye göre şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.100). Şekilden de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 2000με şekildeğiştirme değerine kadar şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme grafiklerinin eğimi, sönümleyici tasarımda kullanılan çelik plakaların davranışına benzer olarak, KSDE çelik çubukların akma şekildeğiştirme değerine ulaşması ile artmıştır. Yaklaşık olarak 2000με (10^{-6} mm/mm) şekildeğiştirme değeri, çeliğin akma şekildeğiştirmesi olup ilk olarak C1 numaralı çelik çubukta 9.57 (itme) mm yerdeğiştirme değerinde meydana gelmiştir (bk. Şekil 3.100-(a,c)). Onuncu yerdeğiştirme adımında şekildeğiştirmeler yaklaşık 2427.0 με'a ve yerdeğiştirmeler itmede 9.57 mm'ye ulaştığında, deney elemanının akma yükü (P_y) 279.13 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 3.101). ÜBES deney elemanının, yükleme protokolüne uygun olarak yapılan çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisini gösteren eğri Şekil 3.102'de verilmiştir.

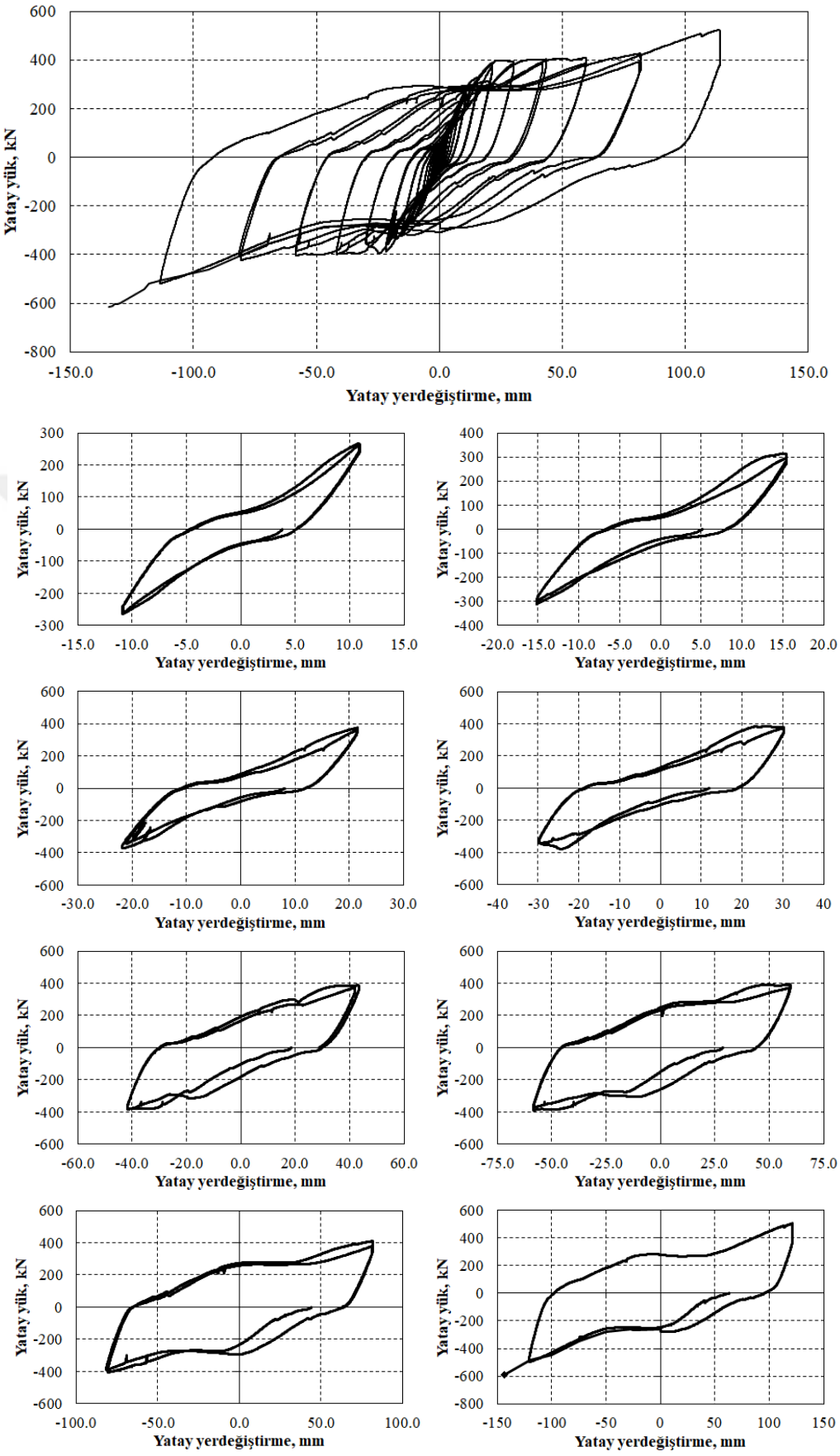
Ayrıca bu şekilde deney elemanında çevrimsel yatay yükleme etkisinde elastik ötesi davranışın belirginleştiği son sekiz yerdeğiştirme adımına ait çevrimlerin detaylı gösterimi de verilmiştir.



Şekil 3.100. C1 ve C4 numaralı çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrileri

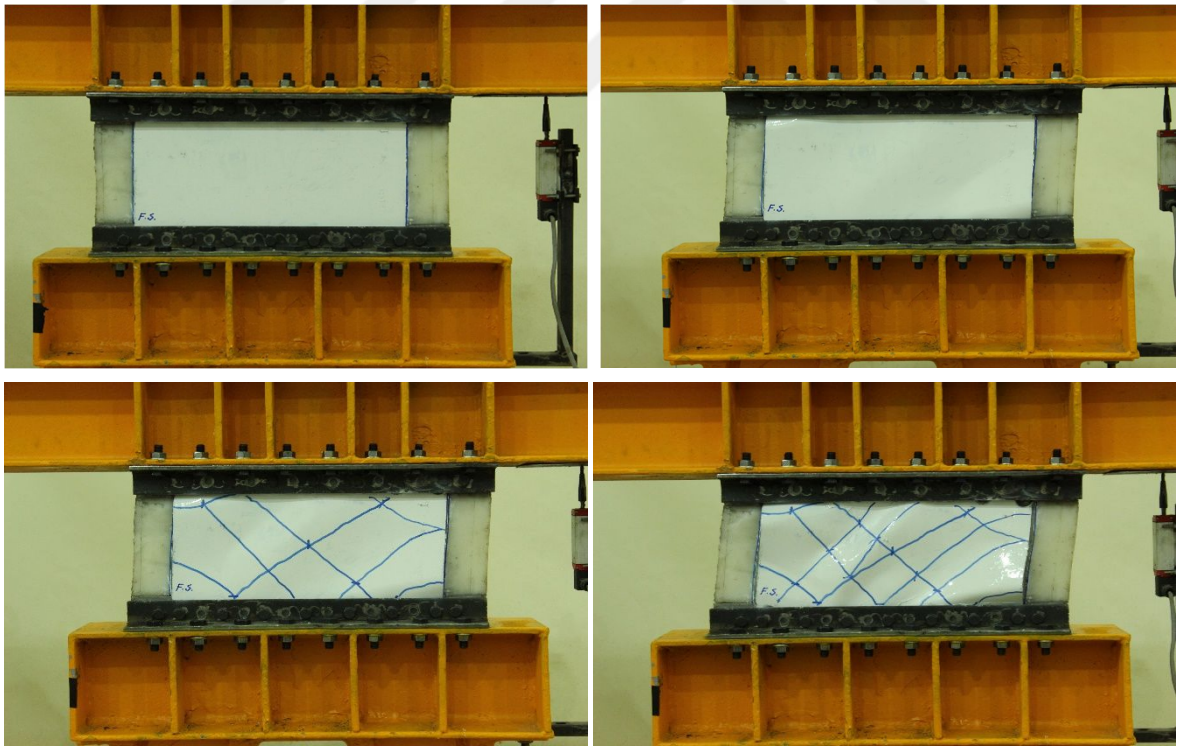


Şekil 3.101. C1 ve C4 numaralı KSDE çelik çubuklardan elde edilen şekildeğiştirme yatay yük eğrileri



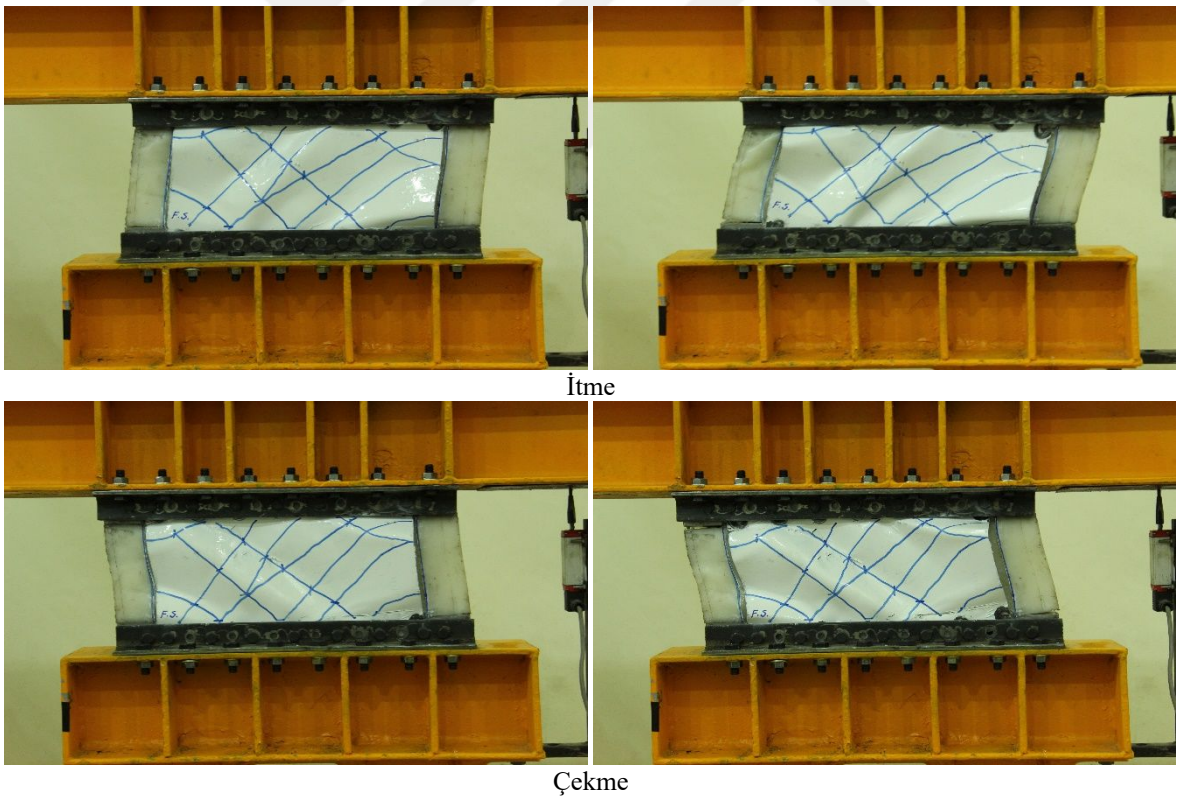
Şekil 3.102. ÜBES deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Bu şekillerden görüldüğü gibi deney elemanının akma yerdeğiştirme değerine ulaştıktan (9.57 mm) sonraki yerdeğiştirme adımlarında çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanımı artmıştır. On birinci yerdeğiştirme adımına (≈15.0 mm) gelindiğinde KSDE çelik çubuklarda önemli bir hasar gözlemlenmemiştir. Ön ve arka yüzdeki çelik plakalarda ise elastik ötesi burkulma davranışı belirgin hale gelmiştir. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 327.07 kN, çekmede ise 321.88 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 17.17 artmıştır. On ikinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈21.10 mm) ise yatay yük seviyesi itmede 390.34 kN, çekmede ise 388.02 kN değerine ulaşmıştır. Bu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 39.84 artmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ön ve arka kısımdaki çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde genişlemeler gözlemlenmiş ve çelik plakaların gövdesinde elastik ötesi burkulma etkisindeki deformasyonlar artmış, poliüretan elastomer dolgu ise başlangıçta paralel olan kenarları, şekildeğiştirme sonrasında da paralel kalmıştır (bk. Şekil 3.103).



Şekil 3.103. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (12. adım)

On üçüncü yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈29.5 mm) yatay yük değeri itmede 398.39 kN, çekmede ise 395.13 kN değerine ulaşmıştır. Bu durumda elde edilen maksimum yatay yük değeri, akma yüküne göre % 42.72 artmıştır. Bu yerdeğiştirme adımında, çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde oluşan hasarlar gözle görülür derecede artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki genişlemeler maksimum seviyeye ulaşmıştır. On dördüncü yerdeğiştirme adımında (≈41.30 mm), yatay yük değeri itmede 403.10 kN, çekme de 397.84 kN değerine gerilemiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yük değeri, akma yüküne göre % 44.41 artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı deliklerindeki hasarlar artmış, poliüretan elastomer dolgunun, önceki yerdeğiştirme adımlarında dönüştüğü paralel kenar form gözle görülür derecede belirginleşmiştir (Şekil 3.104).

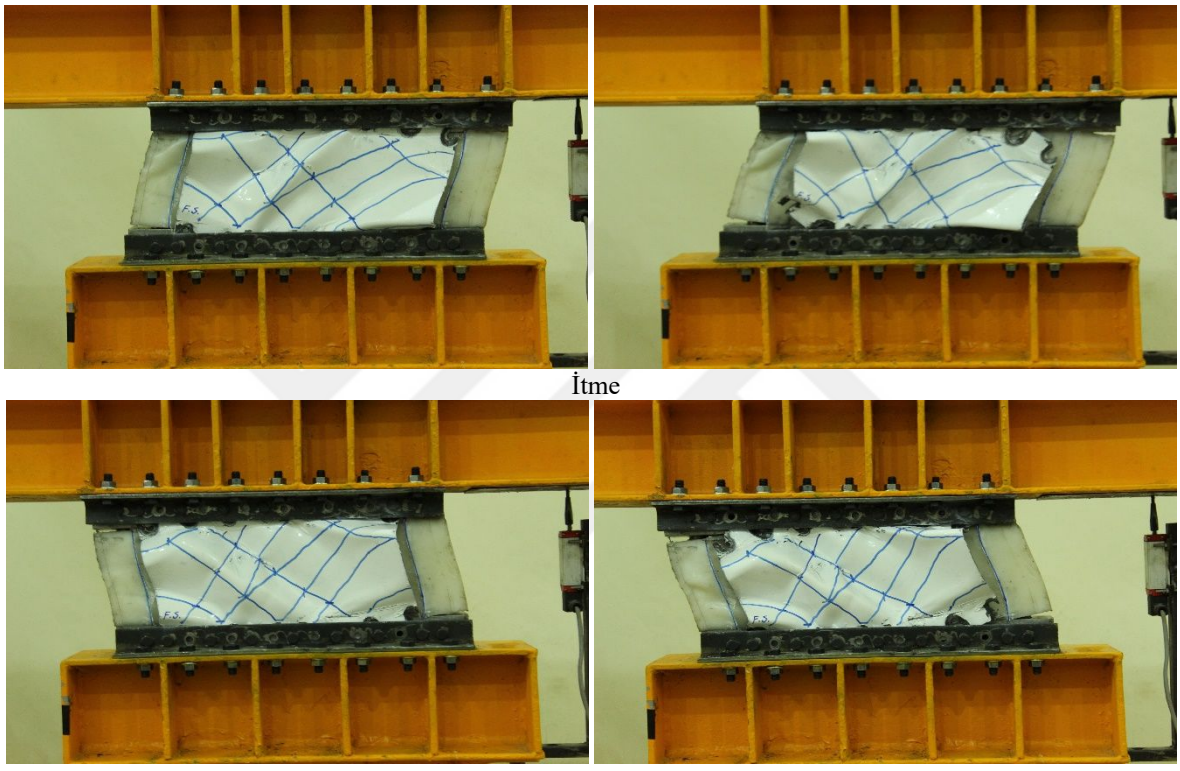


İtme

Çekme

Şekil 3.104. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (14. adım)

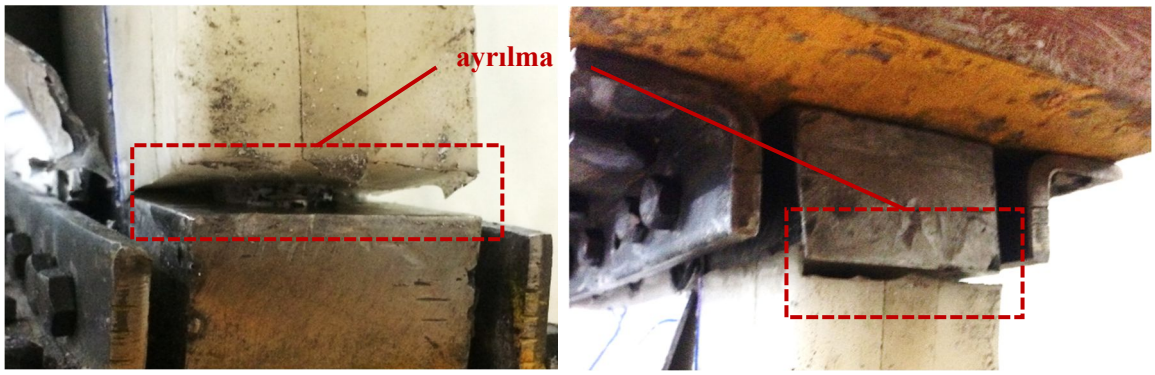
On beşinci yerdeğiştirme adımında (≈57.80 mm), yatay yük değeri itmede 409.51 kN, çekme de ise 404.03 kN değerine ulaşmıştır. Akma yüküne göre ise yük değeri % 41 artmıştır. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının son çevriminde hem arka hem de ön yüzdeki plakaların köşe bölgelerindeki bağlantı delikleri kopmuştur (Şekil 3.105). Ayrıca poliüretan elastomer dolgu, yüzeylerine yapıştığı dairesel yuvalı çelik bloklardan ayrılmaya başlamıştır (Şekil 3.106).



İtme

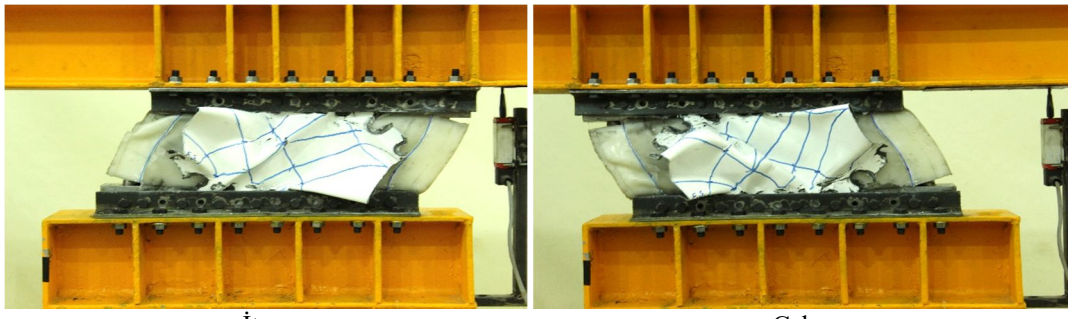
Çekme

Şekil 3.105. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (15. adım)



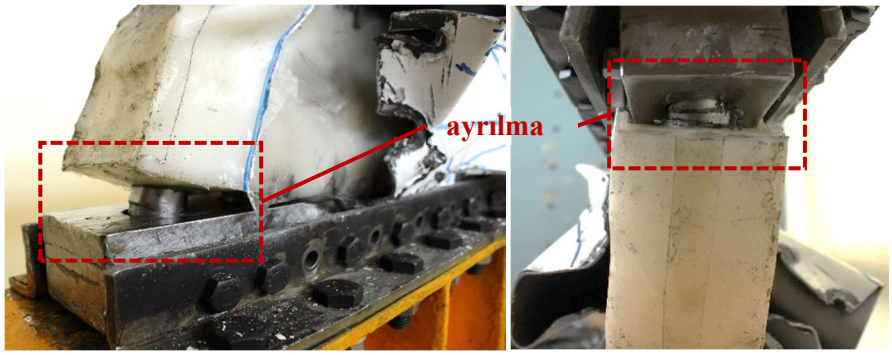
Şekil 3.106. Poliüretan elastomer dolgunun çelik bloklardan ayrılması (15. adım)

On altıncı yerdeğiştirme adımının (≈80.9 mm) ikinci çevrimine gelindiğinde ise KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar artmıştır (Şekil 3.107). Deney elemanında hasarların oluşmasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli oranda düşüşe sebep olmamıştır. Bu aşamada yatay yük değerleri, itmede 427.56 kN, çekmede ise 423.55 kN olarak elde edilmiştir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 53.17 artmıştır. On yedinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈113 mm), KSDE çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar belirginleşmiştir. Özellikle bu yerdeğiştirme adımının ikinci çevriminde hem KSDE çelik çubukların hem de çelik plakaların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasarlar büyük oranda artmıştır. Bu aşamada son çevrim adımı yükleme protokolüne uygun olarak tamamlanmıştır. Bu yerdeğiştirme adımındaki ikinci çevrim tamamlandığında deney elemanın dayanımı itmede ve çekmede sırasıyla 524.80 kN ve 518.87 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada deney elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 88 artmıştır. Ayrıca poliüretan elastomer dolgu, yüzeylerine yapıştığı dairesel yuvalı çelik bloklardan büyük oranda ayrılmıştır (Şekil 3.108). Ancak, ÜBES elemanı bu yerdeğiştirme seviyesinde yük taşıma kapasitesini kaybetmemiştir. Nihai yük taşıma kapasitesinin elde edilmesi amacıyla, ÜBES deney elemanına statik itme yüklemesi uygulanmış ve çekmede 134.45 mm yerdeğiştirmede 615.18 kN'luk yük elde edilmiştir. Bu yük değerinde, ÜBES elemanı yük taşıma kapasitesini kaybetmemesine rağmen deney düzeneğinden ve ölçüm sisteminden kaynaklanan sınırlamalar nedeniyle deney sonlandırılmıştır. Statik itme yüklemesi sonucunda elde edilen 615.18 kN'luk yük değeri, ÜBES elemanının nihai yük taşıma kapasitesi olarak kabul edilmiştir. Bu durumda ÜBES elemanının nihai yük taşıma kapasitesi akma yüküne göre % 120.39 artmıştır.



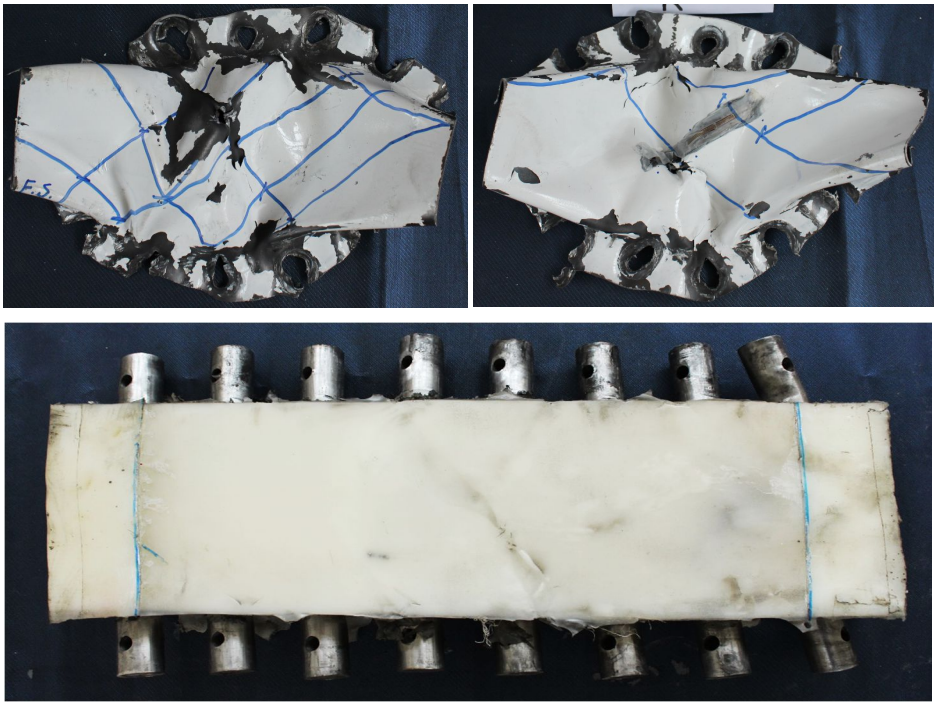
İtme Çekme

Şekil 3.107. ÜBES deney elemanının deney anından görünümleri (16. adım)



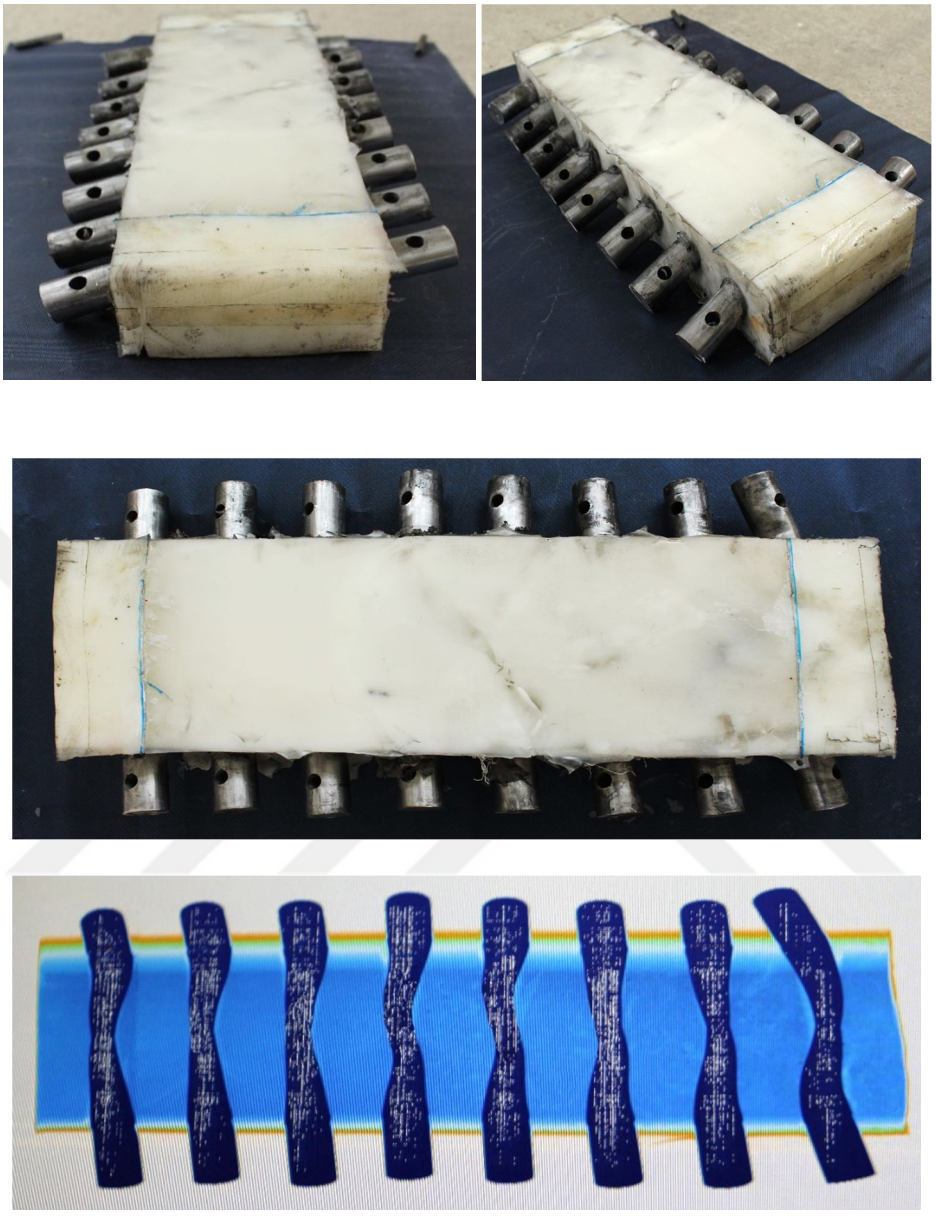
Şekil 3.108. Poliüretan elastomer dolgunun çelik bloklardan ayrılması (17.adım)

Çelik plakaların ve çelik çubuk-poliüretan elastomer dolgunun deney sonundaki nihai görünümleri Şekil 3.109'da verilmiştir. Ayrıca, ÜBES deney elemanının temel parçalarından olan KSDE çelik çubukların nihai durumdaki şekildeğiştirmiş hallerinin elde edilmesi amacıyla, deney elemanı X-Ray taramasına tabi tutulmuştur. Şekil 3.100'de ÜBES deney elemanını X-Ray tarama görüntüsü verilmiştir. Deney sonucunda dairesel yuvalı çelik bloklar, bağlantı köşebentleri ve düşey bağlantı cıvatalarında gözle görülür bir hasar oluşmamıştır. Şekillerden görüldüğü gibi ÜBES elemanında diğer deney elemanlarına kıyasla, çelik çubukların mesnet bölgelerindeki hasarlar çok daha azdır.



Şekil 3.109. Çelik plakaların ve çelik çubuk-poliüretan elastomer dolgunun deney sonundaki nihai görünümleri

Şekil 3.109'un devamı

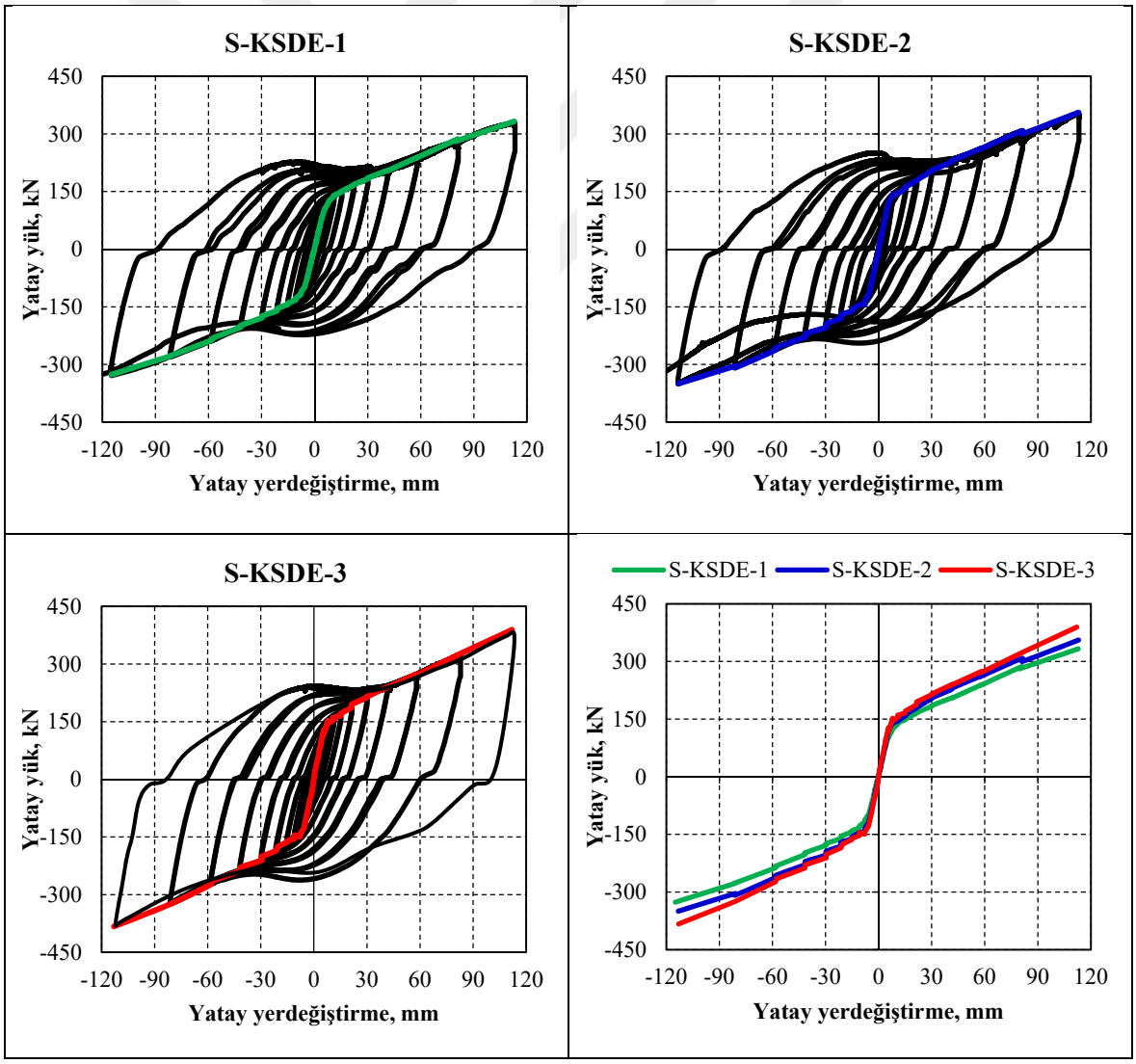


Şekil 3.110. ÜBES deney elemanının X-Ray tarama görüntüsü

3.3. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulguların Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi

3.3.1. Yük Taşıma Kapasiteleri

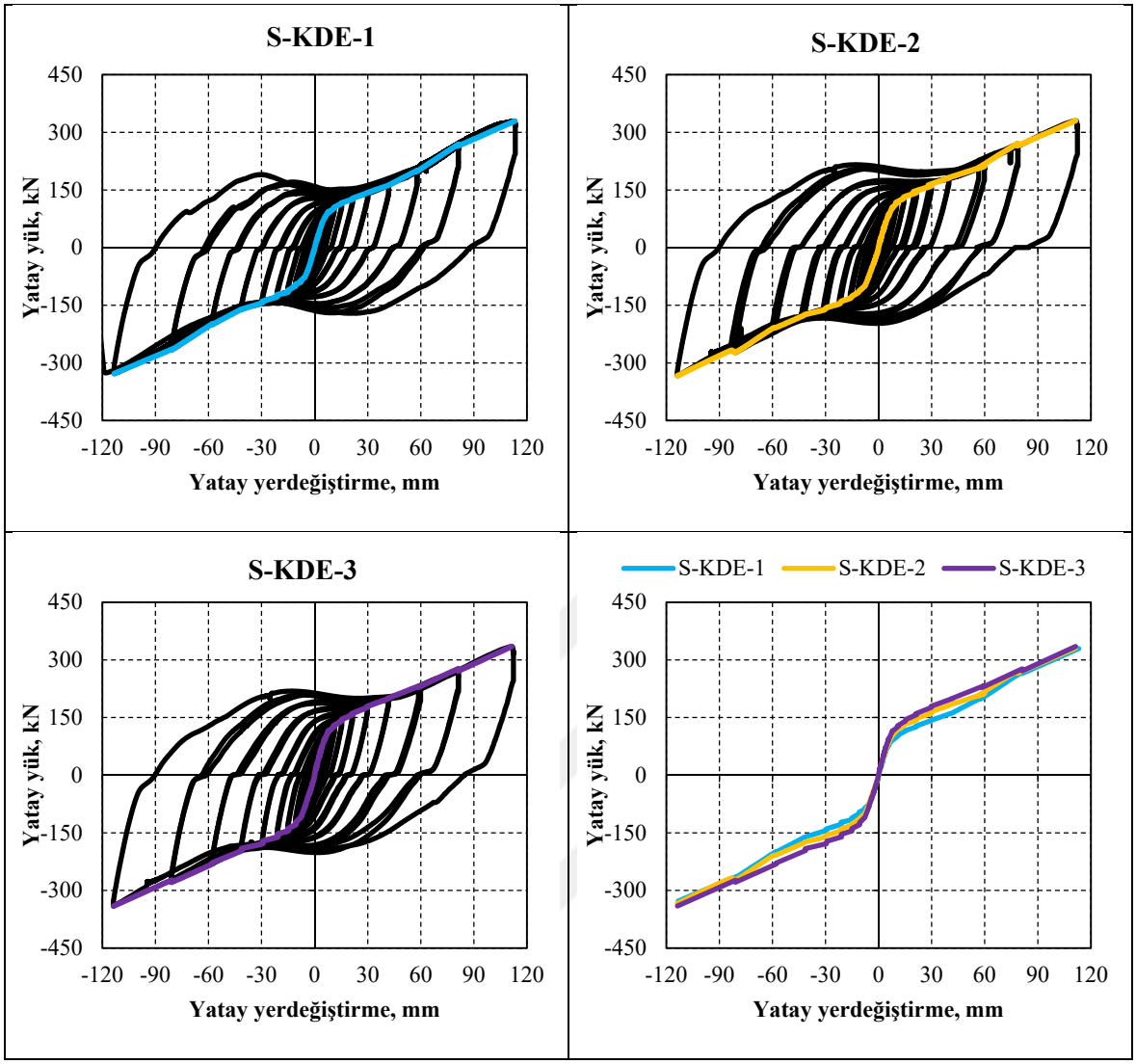
Çevrimsel yüklemeye tabi tutulan deney elemanlarından elde edilen dayanım zarfı eğrileri, S-KSDE sönümleyicileri için Şekil 3.111'de, S-KDE sönümleyiciler için Şekil 3.112'de, S-ÇP sönümleyiciler için Şekil 3.113'te ve İBES ve ÜBES sönümleyiciler için ise Şekil 3.114'te verilmiştir. Ayrıca sönümleyicilerin dayanım zarf eğrileri ise Şekil 3.115'te birlikte verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi tüm deney elemanlarından elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme grafikleri, çevrimsel yükleme etkisindeki bir sönümleyici sistemden ve/veya elemandan beklenen simetrik davranışı sergileyebilmiştir.



Şekil 3.111.S-KSDE tipi sönümleyici elemanların dayanım zarfı eğrileri

Kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 sönümleyici deney elemanlarında akmanın gerçekleştiği yük değerleri sırasıyla 103.20 kN, 119.10 kN ve 128.66 kN'dur. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan KSDE çelik çubuklardan oluşan S-KSDE-1 deney elemanından en düşük akma yükü elde edilmiştir. KSDE çelik çubuklarının kullanıldığı deney elemanları arasında en yüksek akma yüküne sahip olan eleman ise S-KSDE-3 deney elemanıdır. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının akma yükü, yükseklik ortası enkesit çapı değeri sırasıyla 14 mm ve 12 mm olan S-KSDE-2 ile S-KSDE-1'in akma yüklerinden sırasıyla % 8 ve % 24.67 daha fazla olarak elde edilmiştir

Söz konusu deney elemanları, akma yüküne ulaşmasının ardından pekleşme nedeniyle dayanım artışı göstermişlerdir. Özellikle deney elemanları on altıncı yerdeğiştirme adımında (≈80.9 mm), çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasar oluşumları gözlemlenmiştir. Bu durum, deney elemanlarının çevrimsel yükleme etkisi altında elde edilen dayanımlarında herhangi bir düşüşe sebep olmamıştır. Söz konusu yerdeğiştirme adımında S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanları sırasıyla 286.56 kN, 308.21 kN ve 326.30 kN yük seviyelerine ulaşmışlardır. Bu durumda, S-KSDE-3 deney elemanı, S-KSDE-2 ve KSDE-1 deney elemanlarından sırasıyla % 5.86 ve % 13.86 daha fazla yük taşımıştır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 332.77 kN, 355.60 kN ve 389.10 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-KSDE-3 deney elemanının nihai yük taşıma kapasitesi S-KSDE-2 ve S-KSDE-1 deney elemanından sırasıyla % 9.42 ve % 16.93 daha fazla olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.112.S-KDE tipi sönümleyici elemanların dayanım zarfı eğrileri

Konik şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 sönümleyici deney elemanlarında akmanın gerçekleştiği yük değerleri ise sırasıyla 77.45 kN, 81.60 kN ve 89.76 kN'dur. KSDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından elde edilen akma yüklerine benzer şekilde çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16 mm olan S-KDE-3 deney elemanının akma yükü, çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri sarasıyla 14 mm ve 12 mm olan S-KDE-2 ile S-KDE-1'in akma yükünden %10 ve % 15.8 daha fazla olarak elde edilmiştir. Özellikle deney elemanları on altıncı yerdeğiştirme adımında (≈80.9 mm), çelik çubukların dairesel yuvalı çelik bloklara mesnetlendiği bölgelerde hasar oluşumları gözlemlenmiştir. Bu durum, deney elemanlarının çevrimsel yükleme etkisi altında elde edilen dayanımlarında herhangi bir düşüşe sebep

olmamıştır. Söz konusu yerdeğiştirme adımında S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanları sırasıyla 268.53 kN, 270.84 kN ve 276.63 kN yük seviyelerine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KDE-3 deney elemanı, S-KDE-2 ve S-KDE-1 deney elemanlarından sırayla % 2.13 ve % 3.0 daha fazla yük taşımıştır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 çelik çubuklarda oluşan deney elemanlarından elde edilen nihai yük taşıma kapasiteleri ise 329.26 kN, 330.35 kN ve 334.91 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-KDE-3 deney elemanının nihai yük taşıma kapasitesi, S-KDE-2 ve S-KDE-1 deney elemanlarından sırayla % 1.71 ve % 1.38 daha fazla yük taşımıştır.

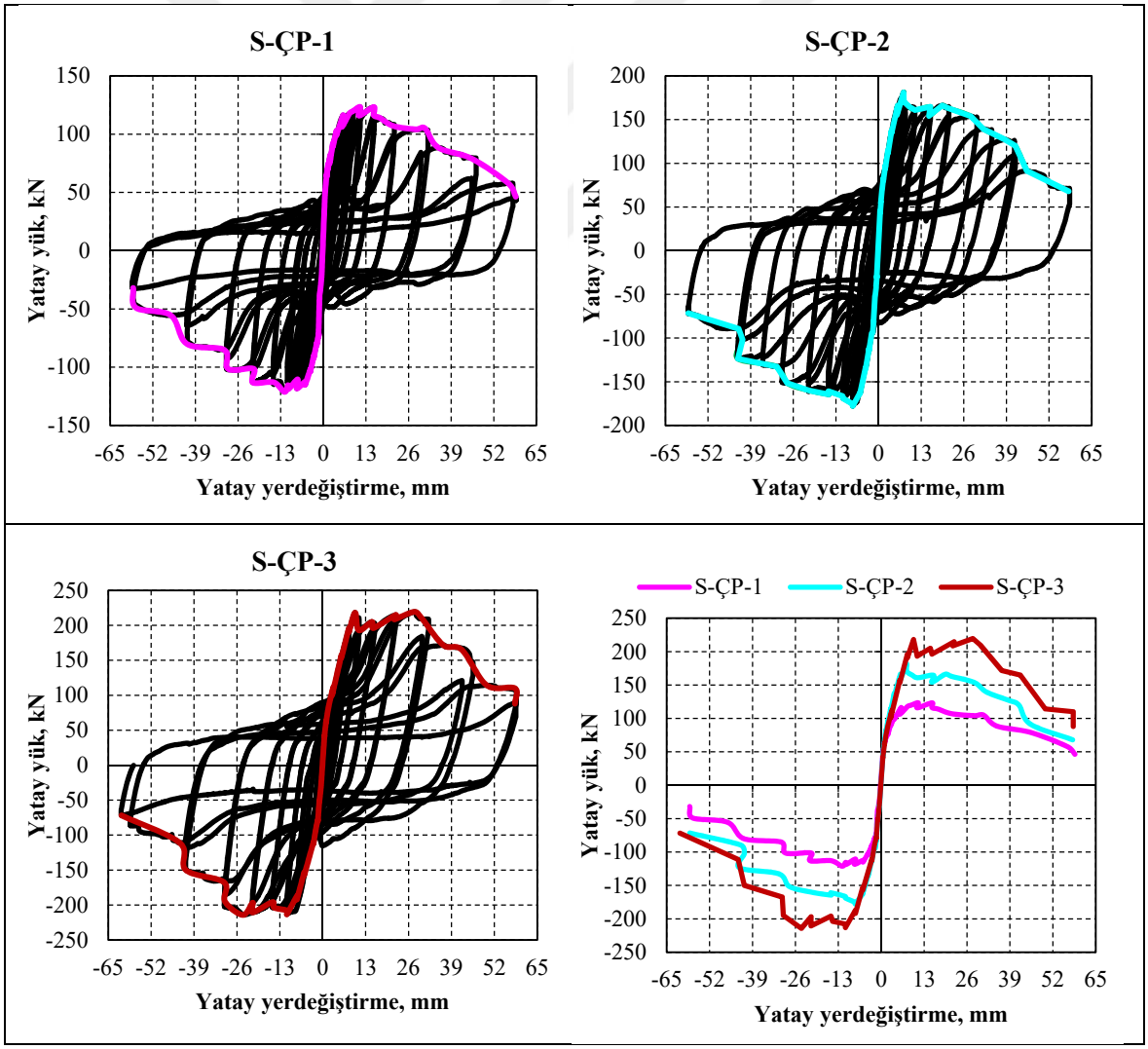
Söz konusu deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde özellikle KDE çelik çubuklardan üretilen deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasitelerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür.

Aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının akma yükü değerleri incelendiğinde KSDE çelik çubuklardan oluşan deney elemanlarının akma yükü değerlerinin KDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan ve KSDE çelik çubuklardan oluşan S-KSDE-1 deney elemanının akma yükü, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri sahip KDE çelik çubuklardan oluşan S-KDE-1 deney elemanın akma yükünden % 33.24 daha fazla olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 14 mm olan S-KSDE-2 deney elemanının akma yükü, S-KDE-2 deney elemanından % 45.95, 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının akma yükü ise, S-KDE-3 deney elemanından % 43.33 daha fazla olarak elde edilmiştir.

Aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde ise KSDE çelik çubuklardan oluşan deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasitelerinin KDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan ve KSDE çelik çubuklardan oluşan S-KSDE-1 deney elemanının nihai yük taşıma kapasitesi, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerine sahip KDE çelik çubuklardan oluşan S-KDE-1 deney elemanın nihai yük taşıma kapasitesinden % 1.0 daha fazla olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 14 mm olan S-KSDE-2 deney elemanının nihai yük taşıma kapasitesi, S-KDE-2 deney elemanından % 7.64, 16 mm olan S-KSDE-3 deney

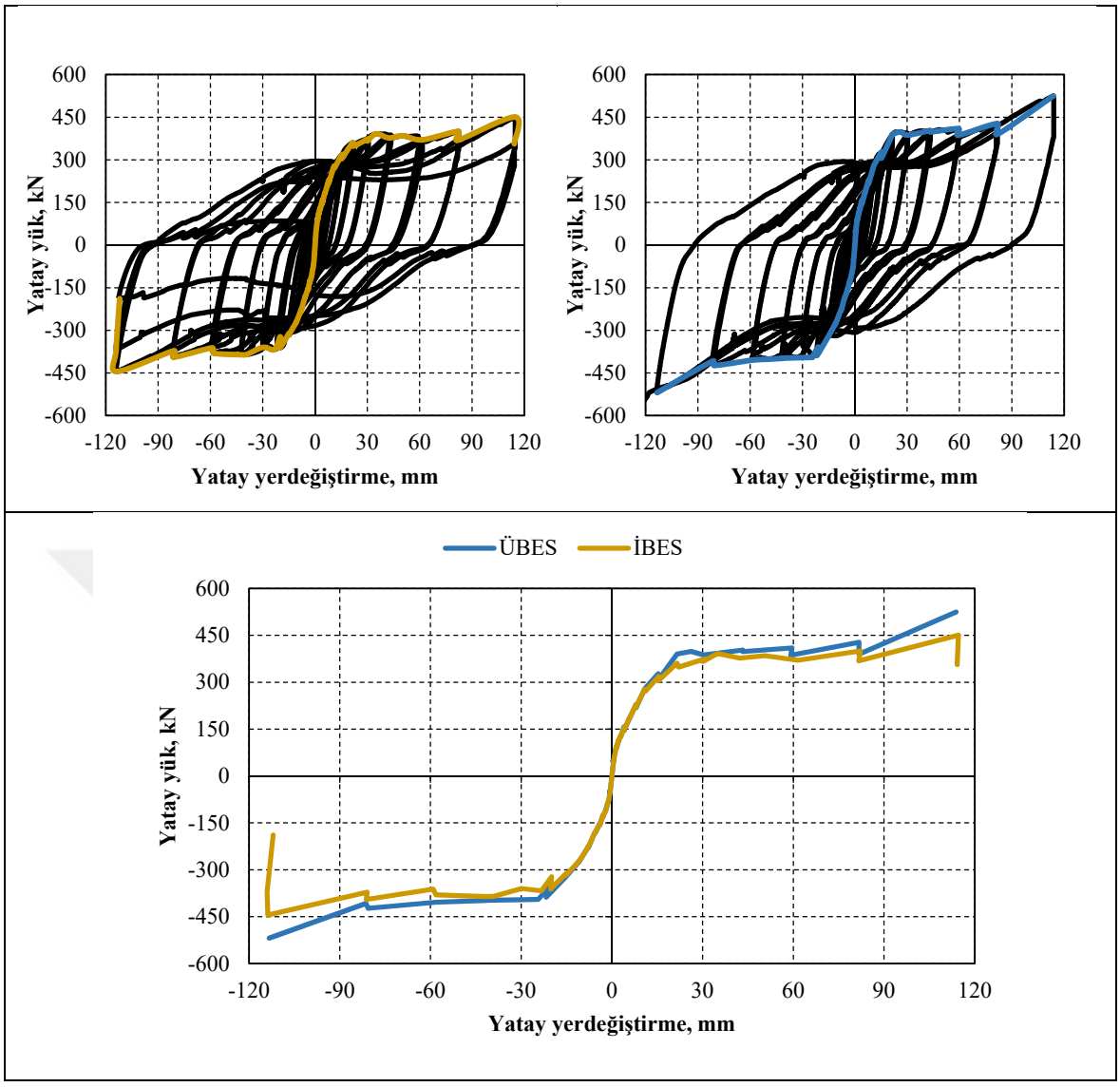
elemanının nihai yük taşıma kapasitesi ise, S-KDE-3 deney elemanından % 14.39 daha fazla yük taşımıştır.

Kum saati ve konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında, çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerinin artması ile nihai yük taşıma kapasitelerinin de arttığı görülmüştür. Ancak kum saati şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında bu artış belirgin iken konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarına ise söz konusu artış yok denecek kadar az olmuştur. Ayrıca, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerine sahip çubukların kullanıldığı deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri arasında farklar, çapın artması ile artmıştır. Çapın 12 mm olması durumunda deney elemanları benzer davranış gösterirken, çapın 14 mm ve 16 mm olması durumunda kum saati şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri daha fazla olmuştur.



Şekil 3.113.S-ÇP tipi sönümleyici elemanların dayanım zarfı eğrileri

Sadece çelik plakaların kullanıldığı S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarında elastik burkulmanın gerçekleştiği yük değerleri sırasıyla 75.34 kN, 97.0 kN ve111.30 kN'dur. Bu deney elemanları arasında, çelik plakalarının kalınlıkları 1.50 mm olan S-ÇP-1 deney elemanından en düşük elastik burkulma yükü elde edilmiştir. Çelik plakaların kullanıldığı deney elemanları arasında en yüksek elastik burkulma yüküne sahip olan eleman ise S-ÇP-3 deney elemanıdır. Plaka kalınlıkları 2.50 mm olan S-ÇP-1 deney elemanının elastik burkulma yükü, plaka kalınlıkları 2.00 mm ve 1.50 mm olan S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarının elastik burkulma yüklerinden sırasıyla % 14.74 ve % 47.73 daha fazla olarak elde edilmiştir. Deney elemanları elastik burkulma yüküne ulaşmasının ardından yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrilerinin eğimi azalmıştır. S.ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP deney elemanlarında yerdeğiştirmeler itmede sırasıyla 10.70 mm, 7.70 mm ve 9.80 mm'ye ulaşıncaya kadar pekleşme nedeniyle dayanım artışı göstermişlerdir. Bu yerdeğiştirme adımlarında deney elemanları sırasıyla 123.22 kN, 181.18 kN ve 218.13 nihai yük taşıma kapasitesine ulaşmışlardır. Nihai yük taşıma kapasitesi en yüksek olan S-ÇP-3 deney elemanı S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarından sırasıyla % 20.39 ve % 77.02 daha fazla yük taşımıştır. Söz konusu deney elemanları nihai yük taşıma kapasitelerine ulaştıktan sonra, plakaların elastik ötesi burkulma davranışı göstermesi ve çelik bloklara mesnetlendiği bağlantı deliklerinde genişlemeler oluşması nedeniyle dayanım azalmaya başlamıştır. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında bağlantı deliklerinde hasarlar artmış ve yerdeğiştirmeler sırasıyla 29.50 mm ve 41.30 mm'ye ulaştığında S-ÇP-1 ve S-ÇP-2 deney elemanlarının plaka gövdelerinde yorulma etkisiyle "X" şeklinde yırtılma gözlemlenmiştir. S-ÇP-3 deney elemanın plaka gövdelerinde ise yırtılma tipi bir hasar oluşmamıştır. On beşinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈57.80 mm) S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri sırasıyla itmede 46.37 kN, 68.10 kN ve 88.13 kN olarak elde edilmiştir. Bu durumda, söz konusu deney elemanlarının dayanımları nihai yük taşıma kapasitelerine göre sırasıyla % 165.73, % 166 ve % 147.50 azalmış ve deneyler sonlandırılmıştır. Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının artması ile nihai yük taşıma kapasitelerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 3.114. İBES ve ÜBES sönümleyici elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (1-17 yerdeğiştirme adımları arası)

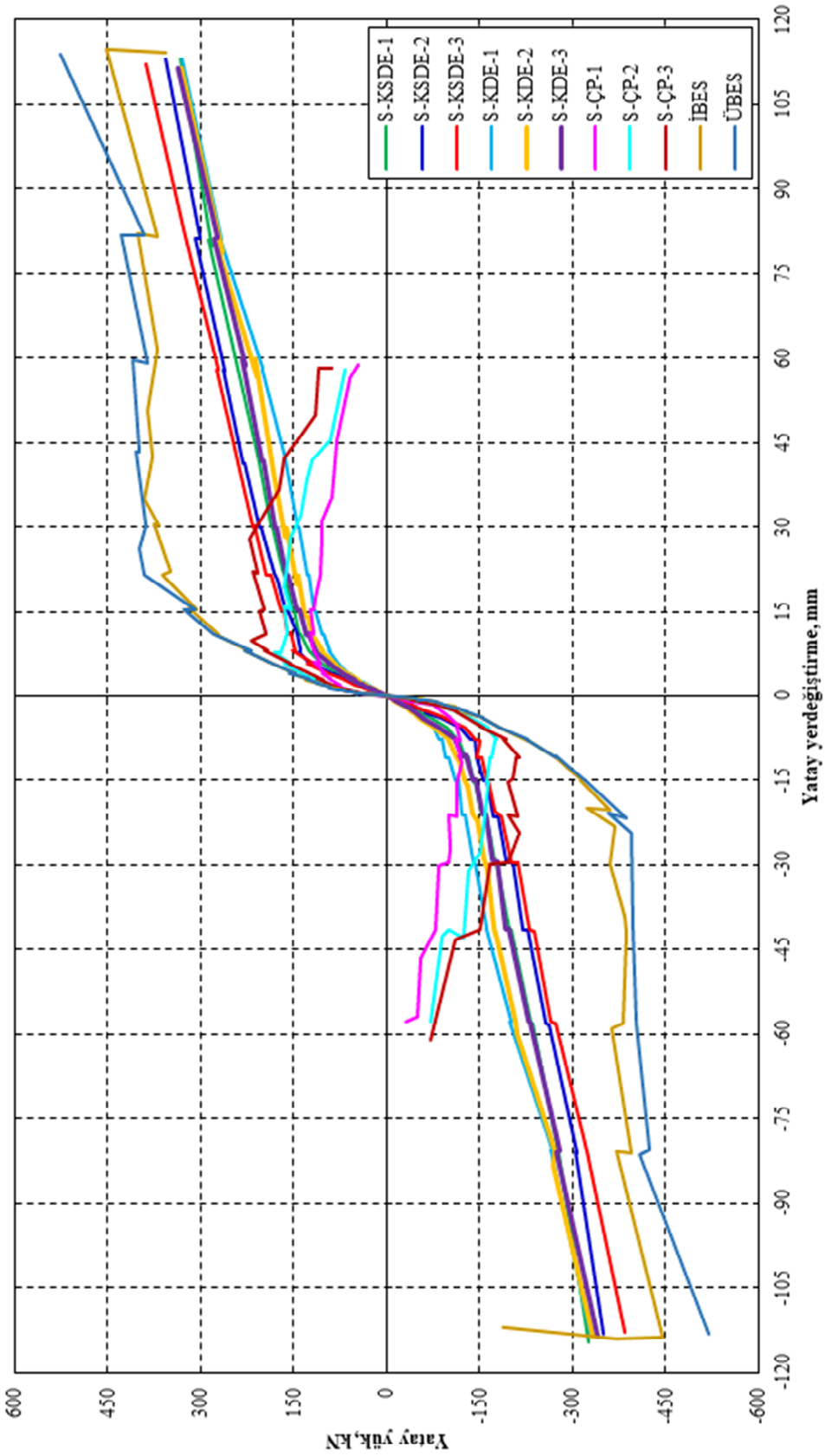
Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16.0 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların ve 2.50 mm kalınlığındaki çelik plakaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) deney elemanı ve İBES sönümleyici deney elemanının çelik plakalarının arasına sıvı olarak yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu oluşturulması ile üretilen üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) deney elemanı, çevrimsel yatay yükleme etkisi altında sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarının davranışlarına benzer olarak ilk olarak çelik plakalarda elastik burkulma davranışı gerçekleşmiştir. İBES ve ÜBES deney elemanlarının elastik burkulma yükleri sırasıyla itmede 109.90 kN ve 115.23 kN'dur. İBES ve ÜBES deney elemanlarında aynı

boyutlardaki çelik plakaların kullanılmasına rağmen, ÜBES deney elemanından elde edilen yük değeri, İBES deney elemanından elde edilen yükten % 4.80 daha fazladır. Bu durum, ÜBES deney elemanındaki çelik plakaların arasına sıvı halde dökülen poliüretan elastomer dolgunun sertleşmesi ile oluşan poliüretan bloğun çelik plakalarla arasında bir bağlanma yüzeyi oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Bu yük değerlerinde her iki deney elemanının yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrilerinin eğimi azalmıştır. İBES ve ÜBES deney elemanları, elastik burkulma davranışı ardından sırasıyla itmede 10.84 mm ve çekmede 9.57 mm yerdeğiştirme değerlerine kadar dayanım artışı göstermiş, söz konusu yerdeğiştirme adımlarında ise deney elemanlarında kullanılan çelik çubukların akması, sırasıyla 276.94 kN ve 279.13 kN yük değerlerinde meydana gelmiştir.

On ikinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (21.10 mm) her iki deney elemanının yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri yataylaşmaya başlamıştır. Bu yerdeğiştirme adımında, İBES ve ÜBES deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 361.58 kN ve 390.34 kN'dur. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, ÜBES deney elemanı, İBES deney elemanından % 8.0 daha fazla yük taşımıştır. Söz konusu yerdeğiştirme adımından, on altıncı yerdeğiştirme adımına kadar (80.90 mm), yatay yerdeğiştirmelerin artmasına rağmen her iki deney elemanının yük taşıma kapasitelerinde ciddi bir değişme olmamıştır. On altıncı yerdeğiştirme adımında İBES ve ÜBES deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 400.19 kN ve 427.55 kN olarak elde edilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, ÜBES deney elemanı, İBES deney elemanından % 6.80 daha fazla yük taşımıştır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (113.30 mm), İBES ve ÜBES deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 450.74 kN ve 524.79 kN'dur. Bu durumda ÜBES elemanı, İBES elemanından %16.42 daha fazla yük taşımıştır. Bu yerdeğiştirme adımında, çelik çubuklarda ve plakalarda önceki yerdeğiştirme adımlarında oluşan hasarların artması ile İBES deney elemanını oluşturan çelik çubuklar ve plakalar mesnet bölgelerinden ayrılmış ve deney sonlandırılmıştır. ÜBES elemanı ise son yerdeğiştirme adımına gelindiğinde yük taşıma kapasitesini kaybetmemiştir. Nihai yük taşıma kapasitesinin elde edilmesi amacıyla, ÜBES deney elemanına statik itme yükleme uygulanmış ve çekmede 134.45 mm yerdeğiştirmede 615.18 kN'luk yük elde edilmiştir. Bu yük değerinde, ÜBES elemanı yük taşıma kapasitesini kaybetmemesine rağmen deney düzeneğinden ve ölçüm sisteminden kaynaklanan sınırlamalar nedeniyle deney sonlandırılmıştır. Statik itme yüklemesi sonucunda elde edilen 615.18 kN'luk yük değeri,

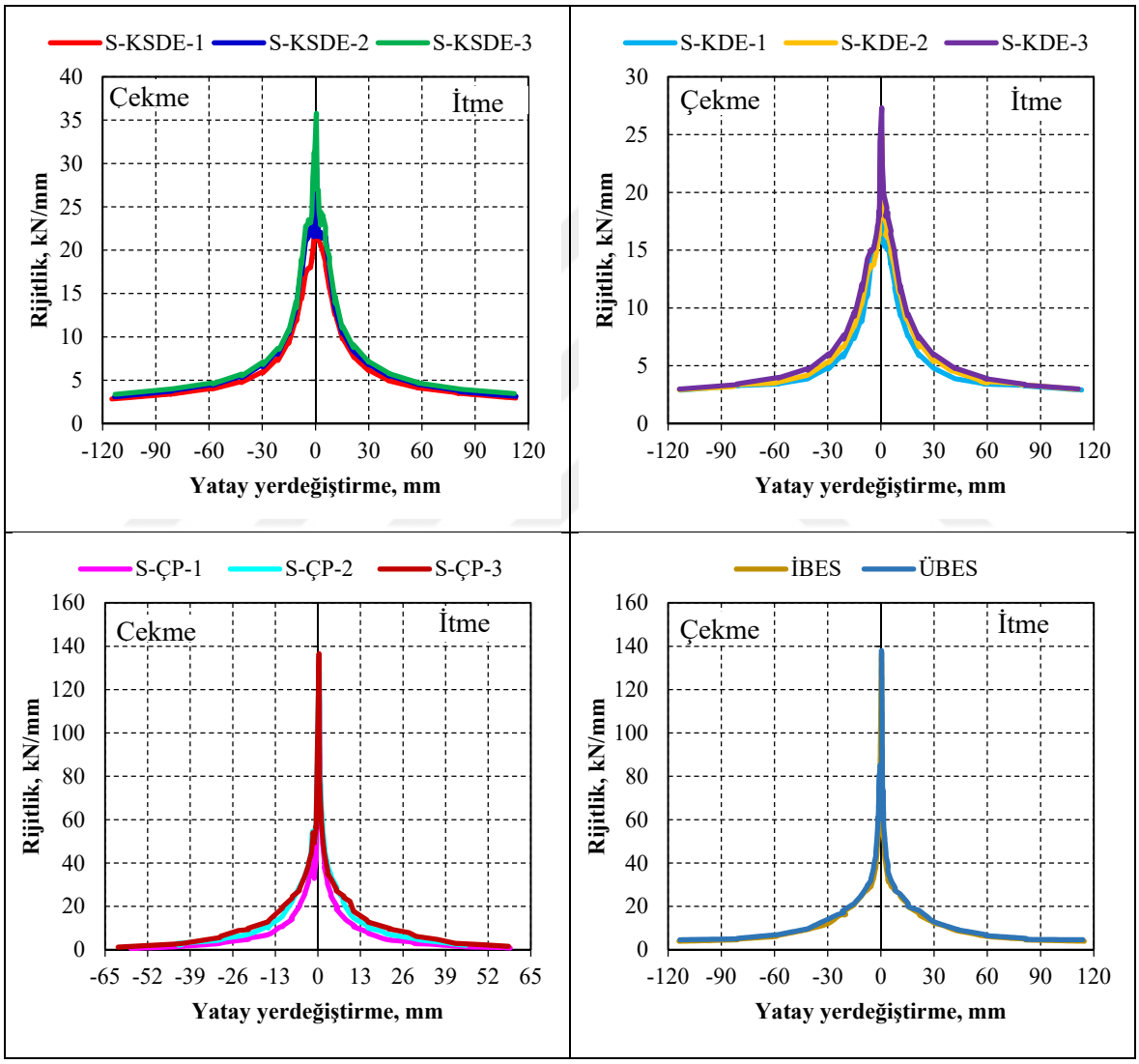
ÜBES elemanının nihai yük taşıma kapasitesi olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, ÜBES elemanı, İBES deney elemanından % 36.48 daha fazla yük taşımıştır. Görüldüğü gibi, yatay yerdeğiştirmeler arttıkça ÜBES ve İBES deney elemanlarının yük taşıma kapasiteleri arasındaki fark artmıştır. On altıncı (80.90 mm) ve on yedinci (113.30 mm) yerdeğiştirme adımlarında, farklar sırasıyla % 6.80 ve %16.42 iken, yerdeğiştirme 134.45 mm olduğunda ise fark %36.48 olmuştur. Bu durum, iki plaka arasına dökülen ve çelik çubukların yüzeyinin kaplanması ile oluşturulan poliüretan elastomer dolgunun, çelik çubukları sararak çubuklarda, düşey yüklemelerden dolayı oluşan, düzlem dışı hareketleri önlemesi ile % 36.48'lik dayanım artışı sağladığı gözlemlenmiştir.



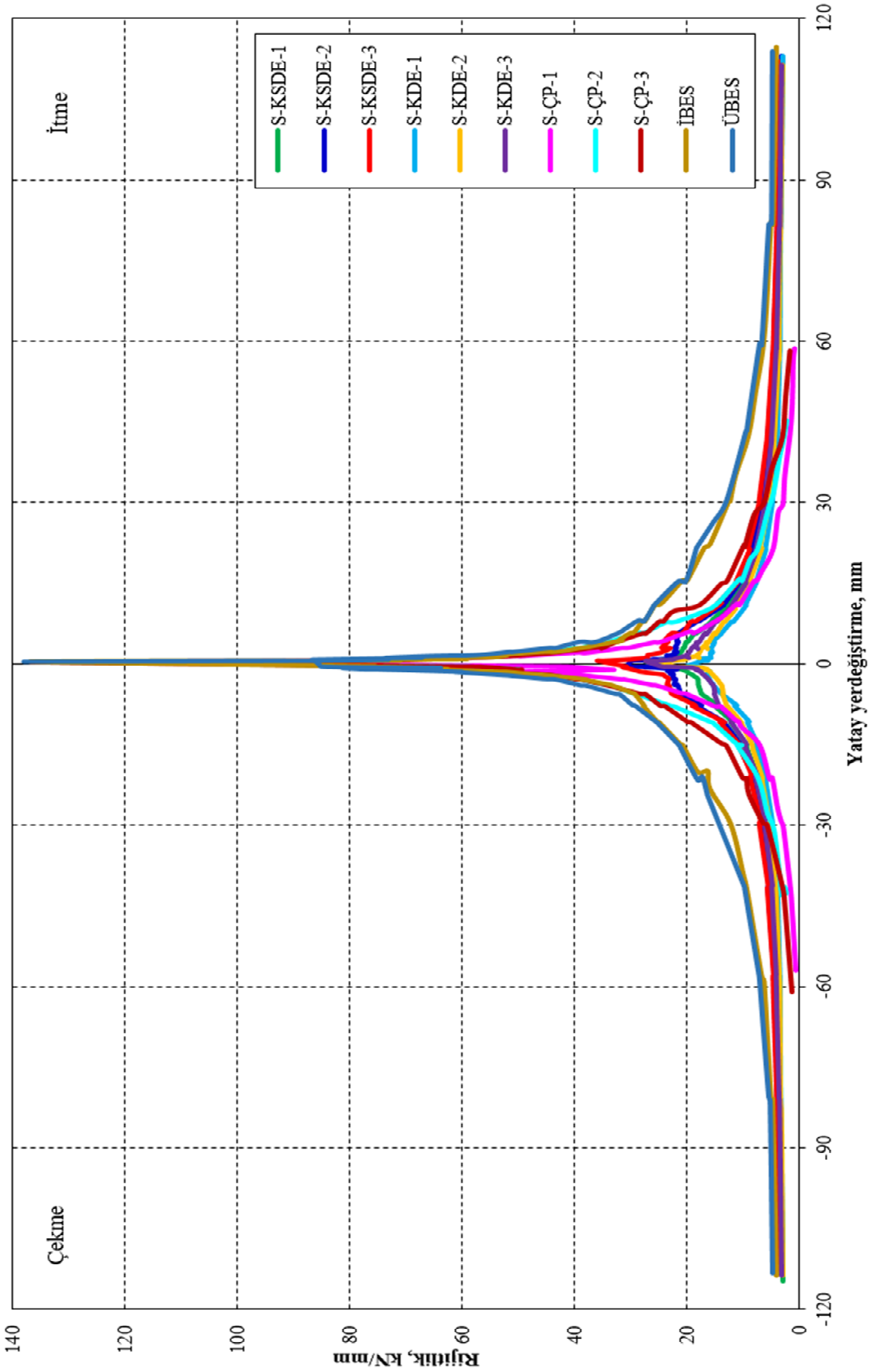
Şekil 3.115. Deney elemanlarından elde edilen dayanım zarfı eğrileri

3.3.2. Rijitlik Değişimleri

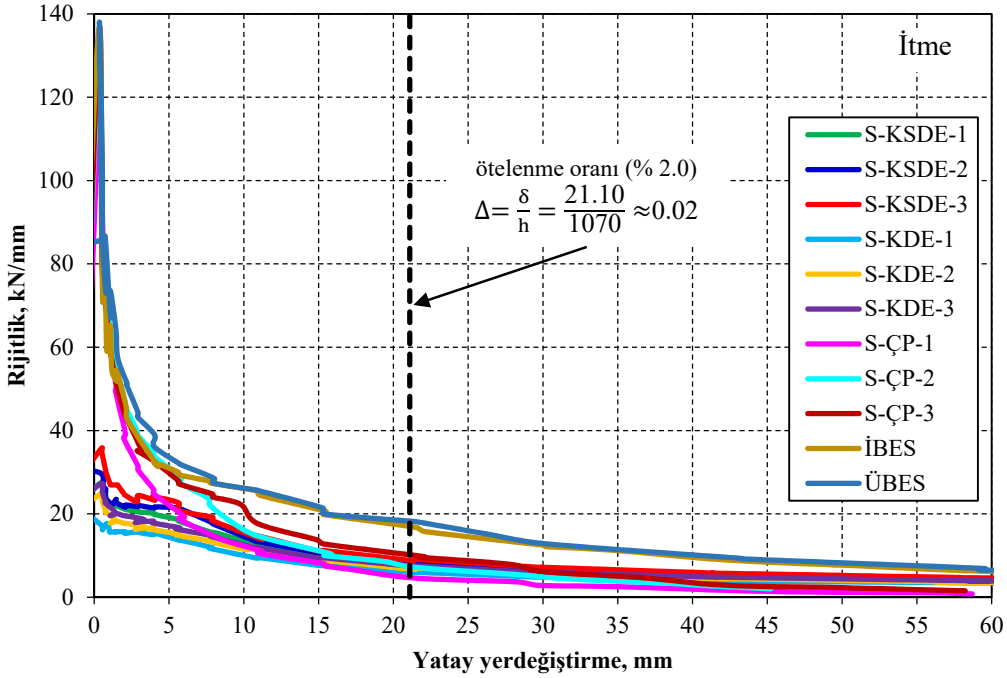
Çevrimsel yüklemeye tabi tutulan deney elemanlarının rijitliklerinin yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak değişimini gösteren eğriler Şekil 3.116'da, tüm sönümleyicilere ait rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri 3.117'de ve 0-60.0 mm arasındaki yerdeğiştirmelere karşılık gelen rijitlik değişimi eğrileri ise Şekil 3.118'de verilmiştir.



Şekil 3.116. Deney elemanlarının rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.117. Tüm deney elemanlarının rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.118.Tüm deney elemanlarının rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri (0-60 mm)

Kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 sönümleyici deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri sırasıyla 27.50 kN/mm, 32.30 kN/mm ve 35.78 kN/mm'dir. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan KSDE çelik çubuklardan oluşan S-KSDE-1 deney elemanından en düşük başlangıç rijitliği elde edilmiştir. KSDE çelik çubuklarının kullanıldığı deney elemanları arasında en yüksek başlangıç rijitliğine sahip olan eleman ise S-KSDE-3 deney elemanıdır. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının başlangıç rijitliği, yükseklik ortası enkesit çapı değeri sırasıyla 14 mm ve 12 mm olan S-KSDE-2 ile S-KSDE-1'in başlangıç rijitliklerinden sırasıyla % 10.77 ve % 30.10 daha fazla olarak elde edilmiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının rijitlikleri azalmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 12.85 kN/mm, 13.42 kN/mm ve 14.76 kN/mm değerlerine gerilemiştir. S-KSDE-3 deney elemanı, S-KSDE-2 ve KSDE-1 deney elemanlarından sırasıyla % 10 ve % 14.86 daha rijit davranmıştır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 elemanlarının rijitlikleri

sırasıyla 7.65 kN/mm, 8.58 kN/mm ve 9.06 kN/mm olarak elde edilmiştir. S-KSDE-3 deney elemanının rijitliği, S-KSDE-2 ve KSDE-1 deney elemanlarından sırasıyla % 5.55 ve % 18.43 daha rijit davranmıştır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının nihai rijitlikleri sırasıyla 2.94 kN/mm, 3.14 kN/mm ve 3.47 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-KSDE-3 deney elemanının nihai durumdaki rijitliği, S-KSDE-2 ve S-KSDE-1 deney elemanından sırasıyla % 10.50 ve % 18 daha fazla olarak elde edilmiştir (bk. Şekil 3.116-118).

Konik şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 sönümleyici deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri sırasıyla 17.18 kN/mm, 24.84 kN/mm ve 27.32 kN/mm'dir. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan KDE çelik çubuklardan oluşan S-KDE-1 deney elemanından en düşük başlangıç rijitliği elde edilmiştir. KDE çelik çubuklarının kullanıldığı deney elemanları arasında en yüksek başlangıç rijitliğine sahip olan eleman ise S-KDE-3 deney elemanıdır. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının başlangıç rijitliği, yükseklik ortası enkesit çapı değeri sırasıyla 14 mm ve 12 mm olan S-KSDE-2 ile S-KSDE-1'in başlangıç rijitliklerinden sırasıyla % 10 ve % 59.02 daha fazla olarak elde edilmiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının rijitlikleri azalmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 9.52 kN/mm, 11.96 kN/mm ve 11.94 kN/mm değerlerine gerilemiştir. Bu aşamada, S-KDE-3 deney elemanının rijitliği ile S-KDE-2 elemanının rijitliği yaklaşık olarak aynı seviyede iken ve KDE-1 deney elemanından ise % 25.42 daha rijit davranmıştır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 6.00 kN/mm, 7.32 kN/mm ve 7.60 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-KDE-3 deney elemanının rijitliği ile S-KDE-2 elemanının rijitliği yaklaşık olarak aynı seviyede iken ve KDE-1 deney elemanından ise % 26.66 daha rijit davranmıştır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının nihai rijitlikleri sırasıyla 3.26 kN/mm, 3.37 kN/mm ve 3.33 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu aşamada, söz konusu deney elemanlarının nihai durumdaki rijitlikleri arasındaki farkların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür (bk. Şekil 3.116-118).

Aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının başlangıç rijitlik değerleri incelendiğinde KSDE çelik çubuklardan oluşan deney elemanlarının başlangıç rijitlik değerlerinin KDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan ve KSDE çelik çubuklardan oluşan S-KSDE-1 deney elemanının başlangıç rijitliği, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri sahip KDE çelik çubuklardan oluşan S-KDE-1 deney elemanın başlangıç rijitliğinden % 60 daha fazla olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 14 mm olan S-KSDE-2 deney elemanının başlangıç rijitliği, S-KDE-2 deney elemanından % 30, 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının başlangıç rijitliği ise, S-KDE-3 deney elemanından % 30.96 daha fazla olarak elde edilmiştir.

Aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının nihai rijitlikleri incelendiğinde ise KDE çelik çubuklardan oluşan deney elemanlarının nihai rijitlikleri KSDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından 16 mm çap değeri hariç daha yüksek olduğu görülmüştür. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan ve KSDE çelik çubuklardan oluşan S-KSDE-1 deney elemanının nihai rijitliği, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerine sahip KDE çelik çubuklardan oluşan S-KDE-1 deney elemanın nihai rijitliğinden % 10.88 daha az olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 14 mm olan S-KSDE-2 deney elemanının nihai rijitliği ise, S-KDE-2 deney elemanından % 7.32 daha az olarak elde edilmiştir. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının nihai rijitliği ise çelik çubukların kullanıldığı diğer deney elemanlarından farklı olarak, S-KDE-3 deney elemanından % 4.20 daha fazla olarak elde edilmiştir (bk. Şekil 3.116-118).

Kum saati ve konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında, çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerinin artması ile başlangıç rijitlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Çubuk yüksekli ortası çap değeri artışının, başlangıç rijitliği üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu elemanlar konik şekilli çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarıdır. Bu duruma ek olarak, nihai rijitlik değerleri incelendiğinde çubuk yükseklik ortası çap değeri 16 mm olan deney elemanı hariç, konik şekilli çubukların nihai rijitlikleri daha fazladır. Bu iki durum, kum saati şekilli dairesel enkesitli çelik çubukların şekildeğiştirmelerin kesit boyunca homojen dağılmasını sağlayan geometrik özelliklerinin, bir sönümleyiciden beklenen kararlı rijitlik azalımı davranışı göstermesine yardımcı olduğu

görülmektedir. Ancak, çubuk yükseklik ortası çap değerinin artması ile kum saati şekilli geometrik formun sağladığı kararlı rijitlik azalımı davranışı azalma eğilimi göstermektedir.

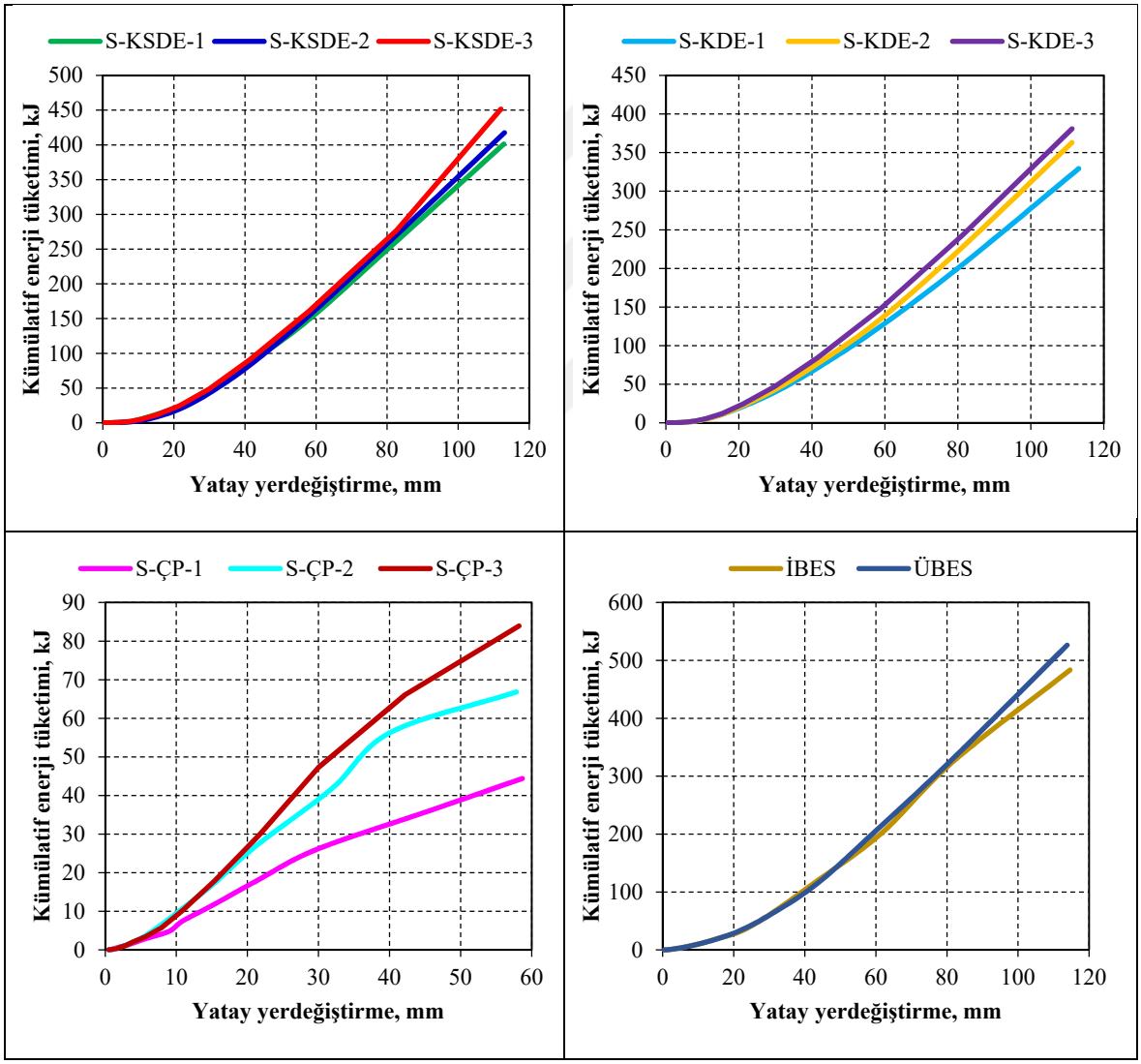
Sadece çelik plakaların kullanıldığı S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri sırasıyla 117.80 kN/mm, 129.50 kN/mm ve 136.57 kN/mm'dir. Bu deney elemanları arasında, çelik plakalarının kalınlıkları 1.50 mm olan S-ÇP-1 deney elemanından en düşük başlangıç rijitliği değeri elde edilmiştir. Çelik plakaların kullanıldığı deney elemanları arasında en yüksek başlangıç rijitliğine sahip olan eleman ise S-ÇP-3 deney elemanıdır. Plaka kalınlıkları 2.50 mm olan S-ÇP-1 deney elemanının başlangıç rijitliği plaka kalınlıkları 2.00 mm ve 1.50 mm olan S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarının elastik burkulma yüklerinden sırasıyla % 5.45 ve % 15.93 daha fazla olarak elde edilmiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının rijitlikleri azalmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu seviyede, S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 11.00 kN/mm, 17.55 kN/mm ve 22.26 kN/mm değerlerine gerilemiştir. Bu durumda, S-ÇP-3 deney elemanı, S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarından sırasıyla % 26.83 ve % 98.64 daha rijit davranmıştır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 6.62 kN/mm, 8.54 kN/mm ve 9.73 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu aşamada, S-ÇP-3 deney elemanı, S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarından sırasıyla % 13.93 ve % 46.97 daha rijit davranmıştır. Yükleme protokolünün on beşinci yerdeğiştirme adımına (≈57.80 mm) gelindiğinde ise S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının nihai rijitlikleri sırasıyla 1.02 kN/mm, 2.02 kN/mm ve 2.30 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-ÇP-3 deney elemanının nihai durumdaki rijitliği, S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanından sırasıyla % 13.86 ve % 125.49 daha fazla olarak elde edilmiştir. Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının artması ile başlangıç rijitliklerinin de arttığı görülmüştür.

Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16.0 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların ve 2.50 mm kalınlığındaki çelik plakaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) deney elemanı ve İBES sönümleyici deney elemanının çelik plakalarının arasına sıvı olarak yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu dökülmesi ile üretilen üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) deney elemanı, çevrimsel yatay yükleme etkisi altında sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarının davranışlarına benzer şekilde ilk olarak çelik plakalarda elastik burkulma davranışı gerçekleşmiştir. İBES ve ÜBES deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri sırasıyla

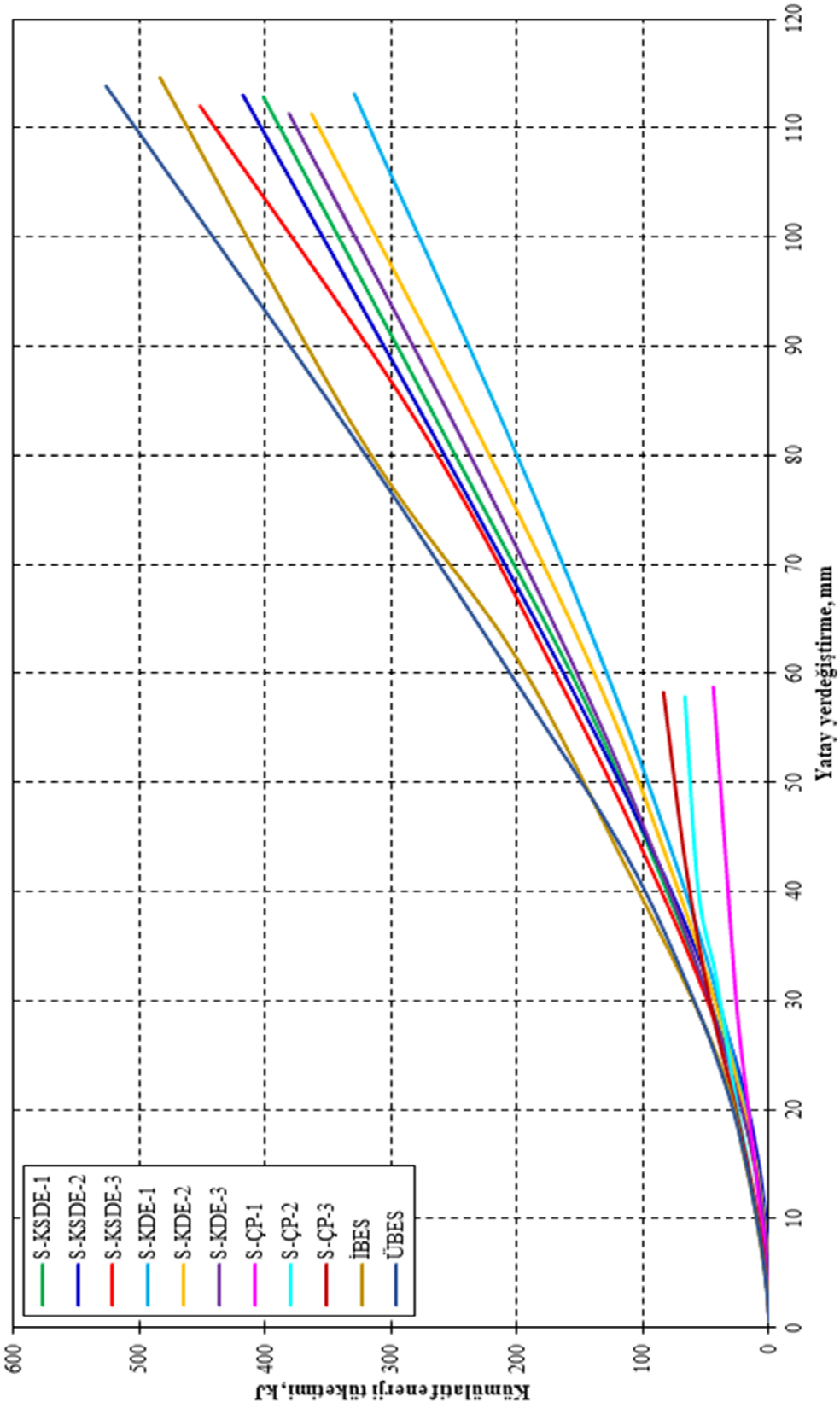
136.57 kN ve 136.86 kN'dur. Görüldüğü gibi İBES ve ÜBES deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, ÜBES deney elemanındaki çelik plakaların arasına sıvı halde dökülen poliüretan elastomer dolgunun başlangıç rijitliği üzerinde etkisinin olmadığını göstermiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının rijitlikleri azalmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, İBES ve ÜBES deney elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 24.53 kN/mm ve 25.71 kN/mm değerlerine gerilemiştir. Bu aşamada elde edilen rijitlikler, söz konusu deney elemanlarının başlangıç rijitlik değerlerine benzer olarak yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, başlangıç aşamasında ortaya çıkan duruma benzer olarak, ötelenme oranı % 1.0 seviyesinde iken poliüretan elastomer dolgunun rijitlik üzerinde ciddi bir katkısı olmamıştır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) İBES ve ÜBES elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 16.74 kN/mm ve 18.13 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu aşamada, ÜBES deney elemanı, İBES elemanından % 8.30 daha rijit davranış göstermiştir. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.30 mm) gelindiğinde ise İBES ve ÜBES deney elemanlarının nihai rijitlikleri sırasıyla 3.93 kN/mm, 4.61 kN/mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ÜBES deney elemanının nihai durumdaki rijitliği, İBES deney elemanından % 17.30 daha fazla olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, yatay yerdeğiştirmeler arttıkça ÜBES ve İBES deney elemanlarının rijitlikleri arasındaki fark artmıştır. Bu durum, ÜBES elemanındaki iki plaka arasına dökülen ve çelik çubukların yüzeyinin kaplanması ile oluşturulan poliüretan elastomer dolgu çelik çubukları sararak, çubuklarda düşey yüklemelerden dolayı oluşan, düzlem dışı hareketleri önlemesi ile nihai durumdaki rijitliğe katkı sağladığını göstermiştir.

3.3.3 Enerji Tüketme Kapasiteleri

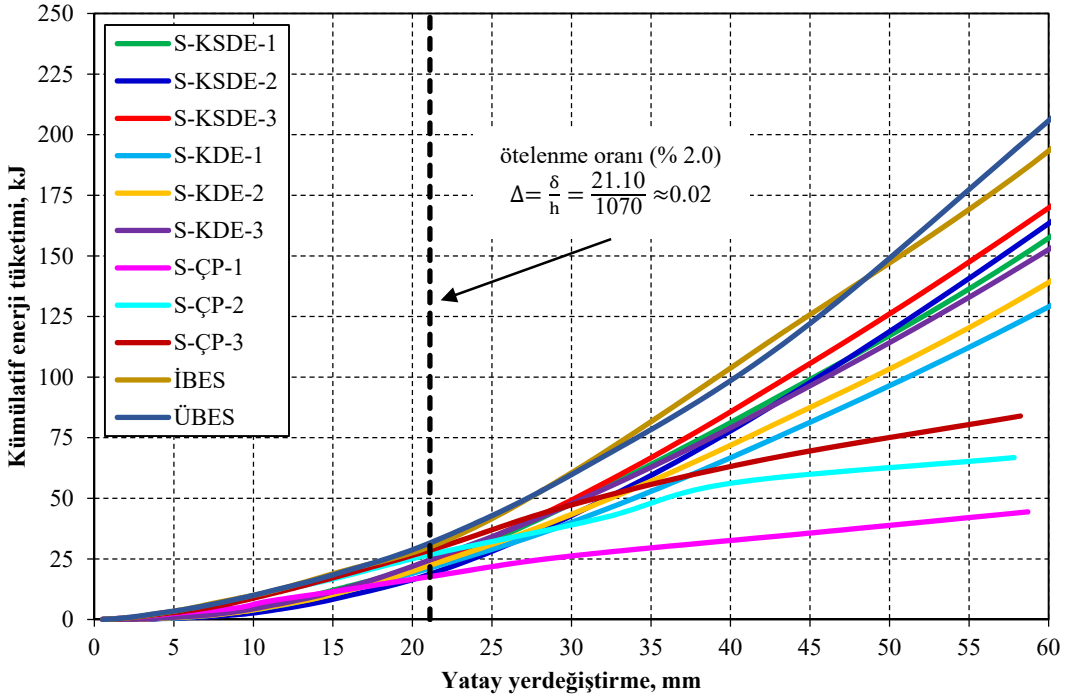
Yapı sistemlerinin ve/veya elemanlarının çevrimsel yüklemeler altındaki etkinliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan ve en önemli parametrelerden biri olan kümülatif enerji tüketme kapasitelerinin yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak değişimini gösteren eğriler Şekil 3.119'da, tüm deney elemanlarına ait kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.120'de ve 0-60.0 mm arasındaki yerdeğiştirmelere karşılık gelen kümülatif enerji değişimi eğrileri ise Şekil 3.121'de verilmiştir.



Şekil 3.119. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.120. Tüm deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.121. Tüm deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme eğrileri (0-60 mm)

Şekillerden görüldüğü gibi kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 sönümleyici deney elemanlarının yedinci yerdeğiştirme adımına kadar (≈3.90 mm) tükettikleri enerjiler yaklaşık olarak aynıdır. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının tükettiği enerji miktarı artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 5.56 kJ, 5.50 kJ ve 5.44 kJ değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada, söz konusu deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları arasındaki farkların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 elemanlarının tükettikleri enerjiler sırasıyla 25.26 kJ, 25.15 kJ ve 24.75 kJ olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu duruma benzer olarak söz konusu deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları arasındaki farkların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının nihai tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 401.34 kJ, 417,60 kJ, 451.61 kJ olarak elde

edilmiştir. Bu durumda, S-KSDE-3 deney elemanının nihai durumdaki enerji tüketim kapasitesi, S-KSDE-2 ve S-KSDE-1 deney elemanından sırasıyla % 8.14 ve % 12.52 daha fazla olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, % 1.0 ve % 2.0 ötelenme oranlarında söz konusu deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri yaklaşık olarak aynıdır. Yatay yerdeğiştirmelerin artması ile tüketilen enerji miktarları arasındaki farklar da artmıştır (bk. Şekil 3.120). Şekillerden görüldüğü gibi kum saati şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 sönümleyici deney elemanlarının yedinci yerdeğiştirme adımına kadar (≈3.90 mm) tükettikleri enerjiler yaklaşık olarak aynıdır. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının tükettiği enerji miktarı artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 5.00 kJ, 4.87 kJ ve 5.39 kJ değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada, söz konusu deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları arasındaki farkların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 elemanlarının tükettikleri enerjiler sırasıyla 21.57 kJ, 22.22 kJ ve 24.48 kJ olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu durumdan farklı olarak söz konusu deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları arasındaki farklar artmıştır. S-KDE-3 deney elemanının enerji tüketimi S-KDE-2 ve S-KDE-1 deney elemanlarından sırasıyla %10.17 ve % 13.49 daha fazladır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının nihai tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 329.24 kJ, 363.18 kJ, 380.97 kJ olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-KDE-3 deney elemanının nihai durumdaki enerji tüketim kapasitesi, S-KDE-2 ve S-KDE-1 deney elemanından sırasıyla % 4.89 ve % 15.71 daha fazla olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, % 1.0 ve % 2.0 ötelenme oranlarında söz konusu deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri yaklaşık olarak aynıdır. Yatay yerdeğiştirmelerin artması ile tüketilen enerji miktarları arasındaki farklar da artmıştır (bk. Şekil 3.119, Şekil 3.120 ve Şekil 3.121).

Aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının nihai enerji tüketme kapasiteleri incelendiğinde KSDE çelik çubuklardan oluşan deney elemanlarının nihai enerji tüketme kapasiteleri KDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 12 mm olan ve KSDE çelik çubuklardan oluşan S-

KSDE-1 deney elemanının nihai enerji tüketme kapasitesi, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerine sahip KDE çelik çubuklardan oluşan S-KDE-1 deney elemanın enerji tüketme kapasitesinden % 21.89 daha fazladır. Benzer şekilde çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 14 mm olan S-KSDE-2 deney elemanının nihai enerji tüketimi, S-KDE-2 deney elemanından % 14.98, 16 mm olan S-KSDE-3 deney elemanının nihai enerji tüketimi ise, S-KDE-3 deney elemanından % 18.54 daha fazla olarak artmıştır (bk. Şekil 3.119, Şekil 3.120 ve Şekil 3.121).

Kum saati ve konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında, çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerinin artması enerji tüketim kapasitelerinin de arttığı görülmüştür. Kum saati şekilli dairesel enkesitli çelik çubukların şekildeğiştirmelerin kesit boyunca homojen dağılmasını sağlayan geometrik özelliklerinin, bir sönümleyiciden beklenen yüksek enerji tüketimi kapasitesi sergilemesine katkı sağladığı görülmektedir.

Şekillerden görüldüğü gibi sadece çelik plakaların kullanıldığı S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının altıncı yerdeğiştirme adımına kadar (≈ 2.80 mm) tükettikleri enerjiler yaklaşık olarak aynıdır. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarı artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 7.55 kJ, 10.23 kJ ve 11.02 kJ değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada, S-ÇP-3 deney elemanının enerji tüketimi S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarından sırasıyla % 7.72 ve %45.96 daha fazladır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 elemanlarının tükettikleri enerjiler sırasıyla 18.02 kJ, 27.06 kJ ve 29.85 kJ olarak elde edilmiştir.

Bu durumda, ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu duruma benzer olarak, S-ÇP-3 deney elemanının enerji tüketimi S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanlarından sırasıyla % 10.31 ve % 65.64 daha fazladır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının nihai tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 44.39 kJ, 66.81 kJ, 83.92 kJ olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-ÇP-3 deney elemanının nihai durumdaki enerji tüketim kapasitesi, S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanından sırasıyla % 25.60 ve % 89.05 daha fazla olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, yatay yerdeğiştirmelerin artması ile tüketilen enerji miktarları arasındaki farklar da artmıştır. Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının artması ile enerji tüketim kapasitelerinin de arttığı görülmektedir (bk. Şekil 3.119, Şekil 3.120 ve Şekil 3.121).

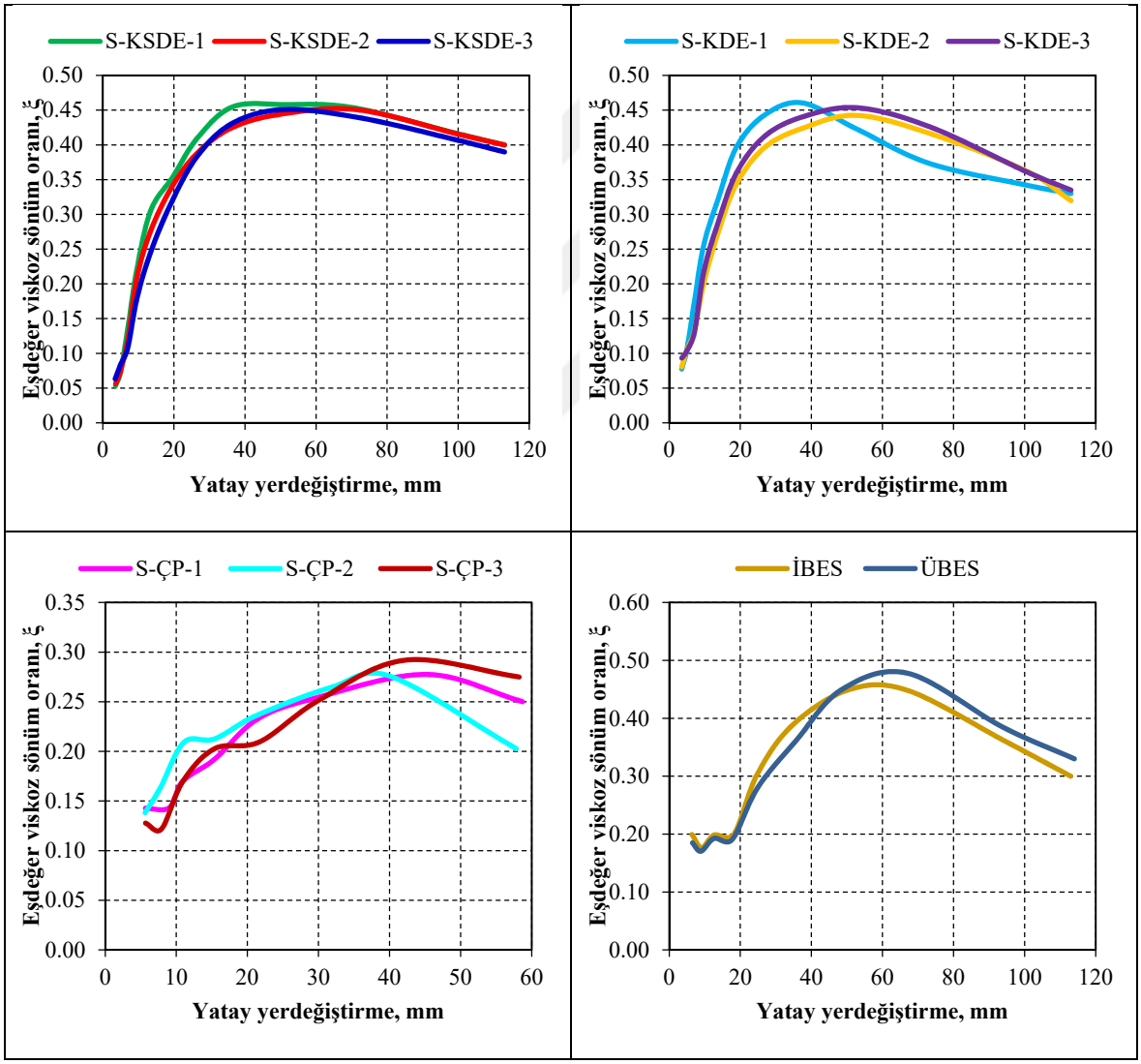
Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16.0 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların ve 2.50 mm kalınlığındaki çelik plakaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) deney elemanı ve İBES sönümleyici deney elemanının çelik plakalarının arasına sıvı olarak yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu dökülmesi ile üretilen üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) deney elemanı, çevrimsel yatay yükleme etkisi altında sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarının davranışlarına benzer şekilde ilk olarak çelik plakalarda elastik burkulma davranışı gerçekleşmiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının enerji tüketimleri artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, İBES ve ÜBES deney elemanlarının enerji tüketimleri sırasıyla 11.36 kJ ve 11.60 kJ değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada söz konusu deney elemanlarından elde edilen enerji tüketimleri yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, poliüretan elastomer dolgunun bu yerdeğiştirme seviyesinde enerji tüketimi üzerinde ciddi bir katkısı olmamıştır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) İBES ve ÜBES elemanlarının rijitlikleri sırasıyla 32.56 kJ ve 32.73 kJ olarak elde edilmiştir. Bu aşamada da ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu duruma benzer olarak İBES ve ÜBES deney elemanlarının enerji tüketimleri yaklaşık olarak aynıdır.

Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise İBES ve ÜBES deney elemanlarının nihai durumda tükettikleri enerji miktarları sırasıyla 483.50 kJ, 526.32 kJ olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ÜBES deney elemanının nihai durumdaki enerji tüketim kapasitesi, İBES deney elemanından sırasıyla % % 8.85 daha fazladır.

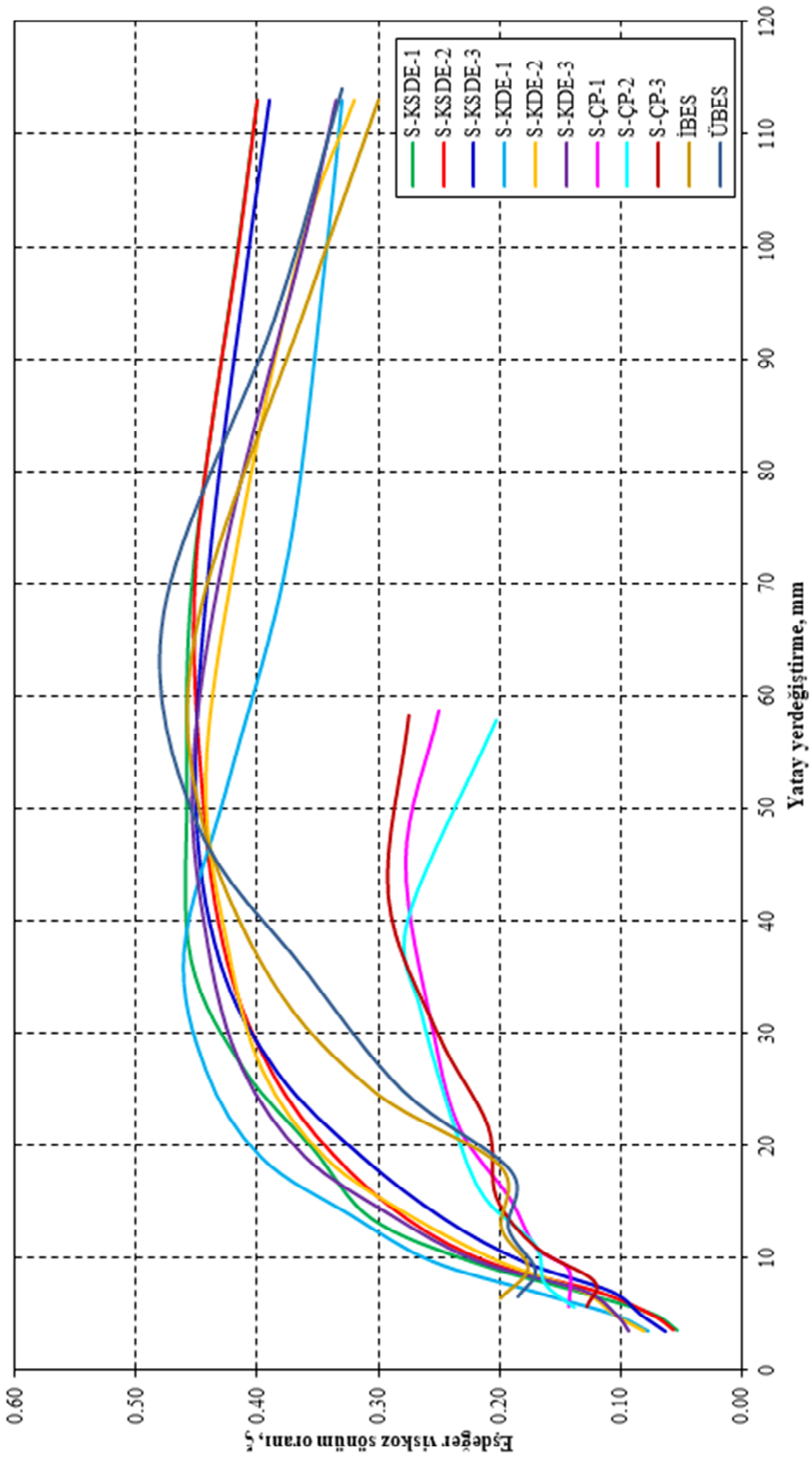
Görüldüğü gibi, yatay yerdeğiştirmeler arttıkça ÜBES ve İBES deney elemanlarının enerji tüketimleri arasındaki fark artmıştır. Bu durum, ÜBES elemanındaki iki plaka arasına dökülen ve çelik çubukların yüzeyinin kaplanması amacı ile oluşturulan poliüretan elastomer dolgu çelik çubukları sararak, çubuklarda düşey yüklemelerden dolayı oluşan, düzlem dışı hareketleri önlemesi ile nihai durumdaki enerji tüketimine yaklaşık olarak 43.0 kJ katkı sağlamıştır.

3.3.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranları

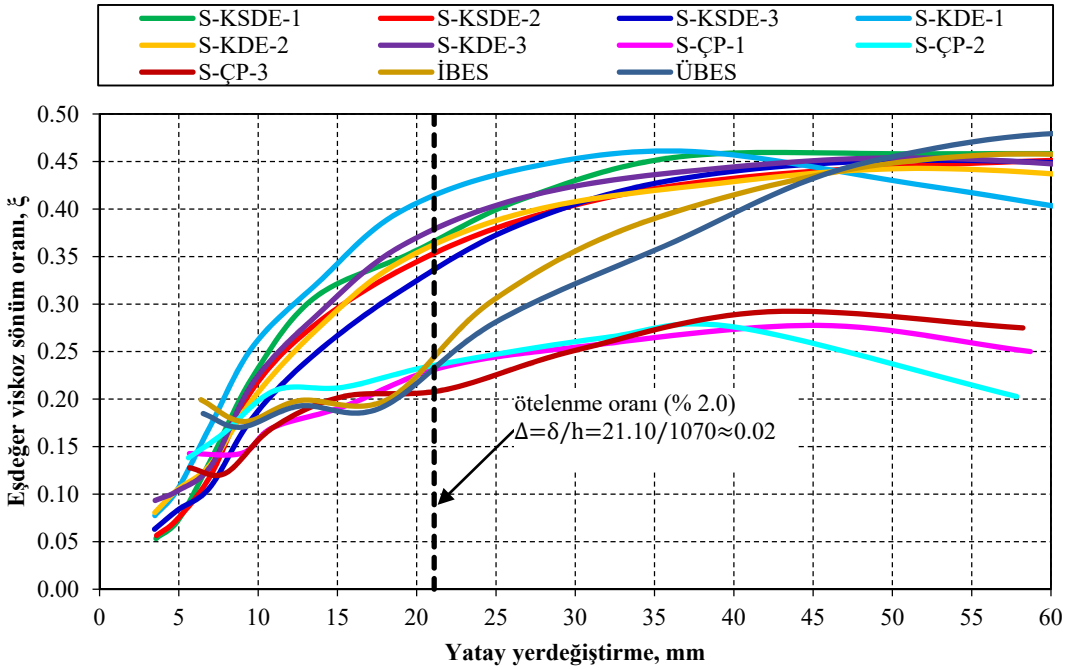
Yapı sistemlerinin ve/veya elemanlarının çevrimsel yüklemeler altındaki etkinliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan ve en önemli parametrelerden biri olan viskoz sönüm oranlarının yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak değişimini gösteren eğriler Şekil 3.122'de, tüm deney elemanlarına ait eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.123'de ve 0-60.0 mm arasındaki yerdeğiştirmelere karşılık gelen kümülatif eşdeğer viskoz sönüm oranı değişimi eğrileri ise Şekil 3.124'de verilmiştir.



Şekil 3.122. Deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.123. Tüm deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.124. Tüm deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranı-yatay yerdeğiştirme eğrileri (0-60 mm)

Şekillerden görüldüğü gibi kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 sönümleyici deney elemanlarının yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranlarının (ξ) değişimleri yaklaşık olarak aynıdır.

Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının viskoz sönüm oranları sırasıyla % 22.25, % 20.81 ve % 17.97 değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada, söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları arasındaki farkların düşük seviyede olduğu görülmüştür. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları % 35.41, % 33.78 ve % 31.45 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu duruma benzer olarak söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları arasındaki farkların düşük seviyede olduğu görülmüştür. Söz konusu deney elemanları, ötelenme oranının yaklaşık olarak % 5.0 seviyesine ulaştığında, en yüksek eşdeğer viskoz sönüm oranları elde edilmiştir. Bu durumda, S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 45.58, %

45.06 ve % 45.11 olarak elde edilmiştir. Görüldüğü KSDE çelik çubukların, yükseklik ortası çap değerlerinin eşdeğer viskoz sönüm oranları üzerinde etkisi yoktur.

Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-KSDE-1, S-KSDE-2 ve S-KSDE-3 deney elemanlarının nihai eşdeğer viskoz sönümleme oranları sırasıyla % 41.61, % 41.55 ve % 40.77 olarak elde edilmiştir. Bu durumda da söz konusu deney elemanlarının maksimum sönüm oranlarına ulaştıkları % 5.0 ötelenme oranına ulaştığındaki duruma benzer olarak söz konusu deney elemanlarının nihai viskoz sönüm oranları yaklaşık olarak aynıdır.

Şekil 3.123 ve Şekil 3.124'ten görüldüğü gibi kum saati şekilli dairesel enkesitli (KDE) çelik çubukların kullanıldığı S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 sönümleyici deney elemanlarının yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranlarının (ξ) değişimleri yaklaşık olarak aynıdır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının viskoz sönüm oranları sırasıyla % 25.62, % 20.11 ve % 21.93 değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada, söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları arasındaki farkların düşük seviyede olduğu görülmüştür. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları % 39.68, % 34.41 ve % 36.10 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu duruma benzer olarak söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları arasındaki farkların düşük seviyede olduğu görülmüştür. Söz konusu deney elemanları, ötelenme oranının yaklaşık olarak % 4.0-% 5.0 seviyesine ulaştığında, en yüksek eşdeğer viskoz sönüm oranları elde edilmiştir. Bu durumda, S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 46.04, % 44.26 ve % 45.34 olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi KDE çelik çubukların, yükseklik ortası çap değerlerinin eşdeğer viskoz sönümleme oranları üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.30 mm) gelindiğinde ise S-KDE-1, S-KDE-2 ve S-KDE-3 deney elemanlarının nihai eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 34.26, % 36.37 ve % 36.13 olarak elde edilmiştir. Bu durumda da söz konusu deney elemanlarının maksimum sönüm oranlarına ulaştıkları %4.0-%5.0 ötelenme oranına ulaştığındaki duruma benzer olarak söz konusu deney elemanlarının nihai viskoz sönüm oranları yaklaşık olarak aynıdır.

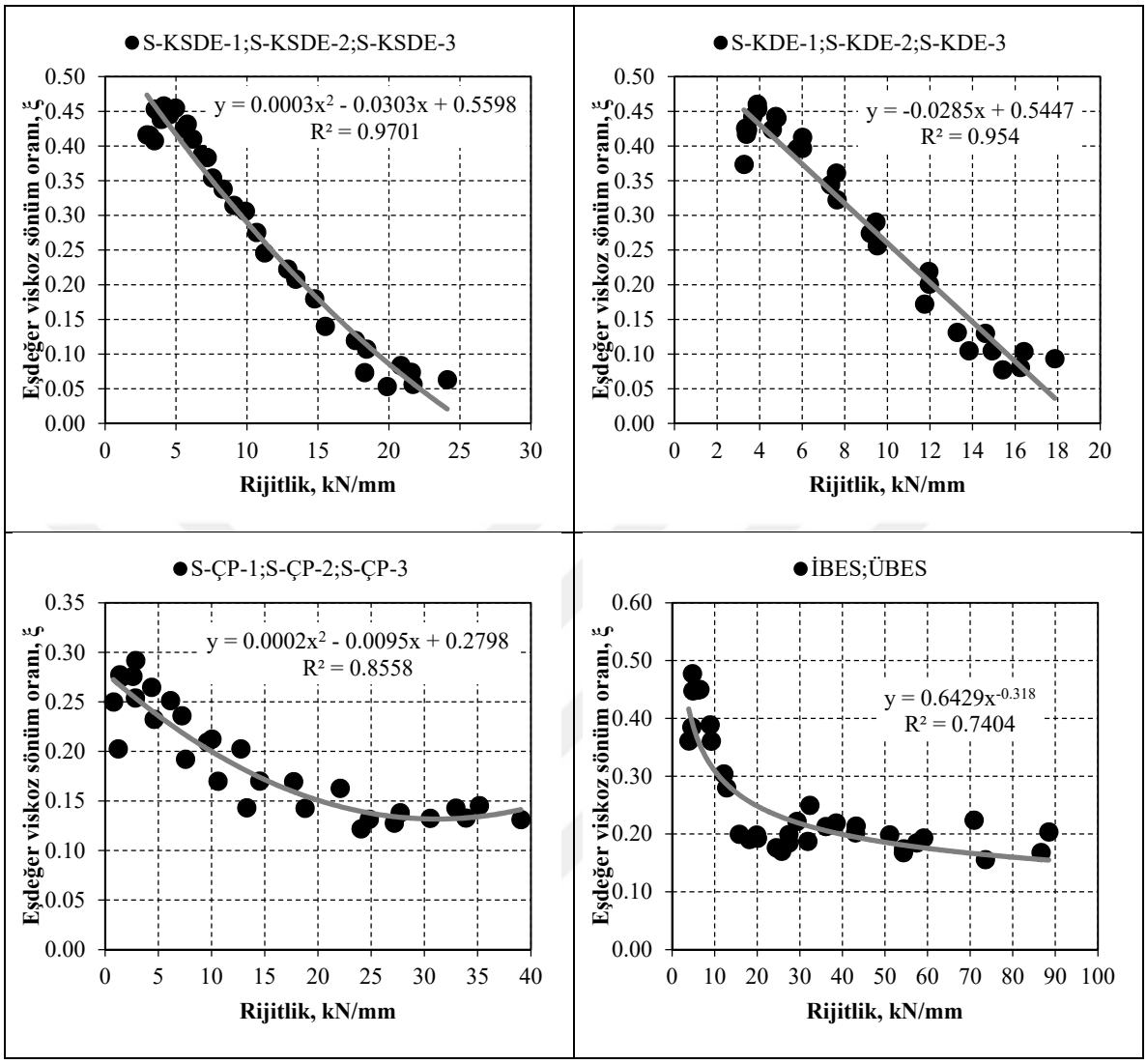
Görüldüğü gibi, aynı çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan KSDE ve KDE çelik çubuklardan oluşan deney elemanlarının en yüksek eşdeğer viskoz sönüm oranları yaklaşık olarak aynıdır. Ayrıca, deney elemanlarından elde edilen viskoz sönüm oranları incelendiğinde ise kum saati şekilli dairesel enkesitli çelik çubuklar, konik şekilli çelik çubukların kullanıldığı elemanlara göre daha karalı davranmıştır. KSDE çelik çubukların şekildeğiştirmelerin kesit boyunca homojen dağılmasını sağlayan geometrik özelliklerinin, bir sönümleyiciden beklenen sönümlemeyi sağlamasına katkı sağladığı görülmektedir.

Şekillerden görüldüğü gibi sadece çelik plakaların kullanıldığı S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının altıncı yerdeğiştirme adımına kadar (≈ 2.80 mm) eşdeğer viskoz sönüm oranları yaklaşık olarak aynıdır. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları artmıştır. Onuncu yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈10.70 mm) kat ötelenme oranı % 1.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 17.01, % 17.03 ve % 16.96 değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada, söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları yaklaşık olarak aynıdır. Ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaştığında (≈21.10 mm) S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 23.25, % 23.61 ve % 20.96 olarak elde edilmiştir.

Bu durumda, ötelenme oranının % 1.0 seviyesinde olduğu duruma benzer olarak, söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları yaklaşık olarak aynıdır. Söz konusu deney elemanları, ötelenme oranının yaklaşık olarak % 4.0 seviyesine ulaştığında, en yüksek eşdeğer viskoz sönüm oranları elde edilmiştir. Bu durumda, S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 27.75, % 27.59 ve % 29.18 olarak elde edilmiştir. Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise S-ÇP-1, S-ÇP-2 ve S-ÇP-3 deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 25, % 20.27 ve % 27.49 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, S-ÇP-3 deney elemanının nihai durumdaki eşdeğer viskoz sönüm oranı, S-ÇP-2 ve S-ÇP-1 deney elemanından daha fazla olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi sönüm oranındaki en fazla düşüş, plaka kalınlıkları 2.0 mm olan S-ÇP-2 deney elemanında gerçekleşmiştir. Başka bir ifadeyle, S-ÇP-1 ve S-ÇP-3 deney elemanları daha kararlı bir sönümleme sergilemiştir. Ayrıca, sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının eşdeğer viskoz sönümleme oranları üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır.

Çubuk yükseklik ortası enkesit çapı değeri 16.0 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların ve 2.50 mm kalınlığındaki çelik plakaların beraber kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) deney elemanı ve İBES sönümleyici deney elemanının çelik plakalarının arasına sıvı olarak yerinde döküm poliüretan elastomer dolgu dökülmesi ile üretilen üç bileşenli enerji sönümleyici (ÜBES) deney elemanının ötelenme oranlarının % 1.0 olması durumunda (≈ 10.70 mm) eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla %17.64 ve %17.04 olarak elde edilmiştir. İlerleyen yerdeğiştirme adımlarında söz konusu deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları artmıştır. On ikinci yerdeğiştirme adımına gelindiğinde (≈20.10 mm) kat ötelenme oranı % 2.0 seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda, İBES ve ÜBES deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla %19 ve %20 olarak değerlerine ulaşmıştır. Bu aşamada söz konusu deney elemanlarından elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranları ötelenme oranının % 1.0 olması durumuna benzer olarak yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, poliüretan elastomer dolgunun bu yerdeğiştirme seviyelerinde sönüm oranı üzerinde ciddi bir katkısı olmadığını göstermiştir. Söz konusu deney elemanları, ötelenme oranının yaklaşık olarak % 5.0 seviyesine ulaştığında, en yüksek eşdeğer viskoz sönüm oranları elde edilmiştir. Bu durumda, İBES ve ÜBES deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 44.80 % 47.75 olarak elde edilmiştir.

Yükleme protokolünün son yerdeğiştirme adımı olan on yedinci adıma (≈113.3 mm) gelindiğinde ise İBES ve ÜBES deney elemanlarının nihai durumda eşdeğer viskoz sönüm oranları sırasıyla % 30.0 ve % 33.0 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, ÜBES deney elemanının nihai durumdaki eşdeğer viskoz sönüm oranı, İBES deney elemanından daha fazladır. Bu durum, ÜBES elemanındaki iki plaka arasına dökülen ve çelik çubukların yüzeyinin kaplanması amacı ile oluşturulan poliüretan elastomer dolgu çelik çubukları sararak, çubuklarda düşey yüklemelerden dolayı oluşan, düzlem dışı hareketleri önlemesi ile hem maksimum sönüm oranına % 6.58 katkı sağlamıştır. Ayrıca KSDE çelik çubukların ve çelik plakaların beraber kullanıldığı İBES elemanının maksimum eşdeğer viskoz sönüm oranı, sadece KSDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarından elde edilen maksimum sönüm oranları ile yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, çelik plakalıların İBES deney elemanına sönüm oranı bakımından herhangi bir katkı sağlamadığını göstermektedir. Şekil 3.125'te deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları (ξ) ile etkin rijitlik değerleri (k_{etkin}) arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler verilmiştir.



Şekil 3.125. Deney elemanlarının eşdeğer viskoz sönüm oranları (ξ) ile etkili rijitlik değerleri (k_{etkin}) arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler

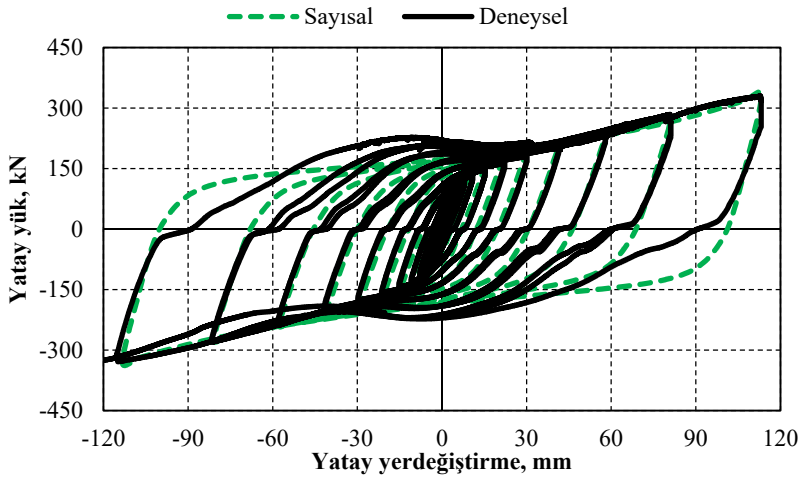
Şekillerden görüldüğü gibi tüm deney elemanlarında etkili rijitliklerin artması ile eşdeğer viskoz sönüm oranları azalmıştır. Söz konusu bu iki parametre arasındaki ilişki, KSDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarında ikinci dereceden, KDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarında doğrusal, sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında KSDE çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarına benzer olarak ikinci derecen ve İBES ile ÜBES deney elemanlarında ise üsteldir.

3.4. Deneysel Bulguların Sayısal Çalışmalılardan Elde Edilen Veriler ile Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi

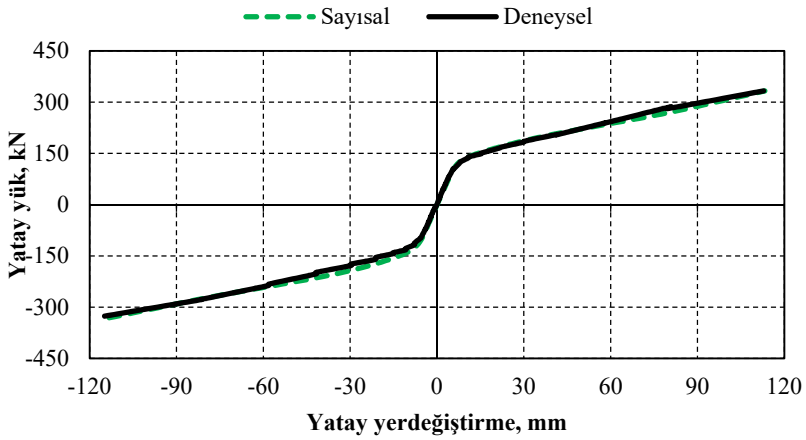
Bu başlık altında, deney elemanlarının çevrimsel yatay yükleme etkisi altında elde edilen bulguların, uygun yöntem, sınır ve yükleme koşulları altında gerçekleştirilen sayısal çalışmalardan elde edilen veriler ile karşılaştırılması verilmektedir. Sayısal çalışmalarda kullanılan yöntem, yapılan kabuller, sınır ve yükleme koşulları ikinci bölümde detaylı şekilde anlatılmıştır.

3.4.1. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-1)

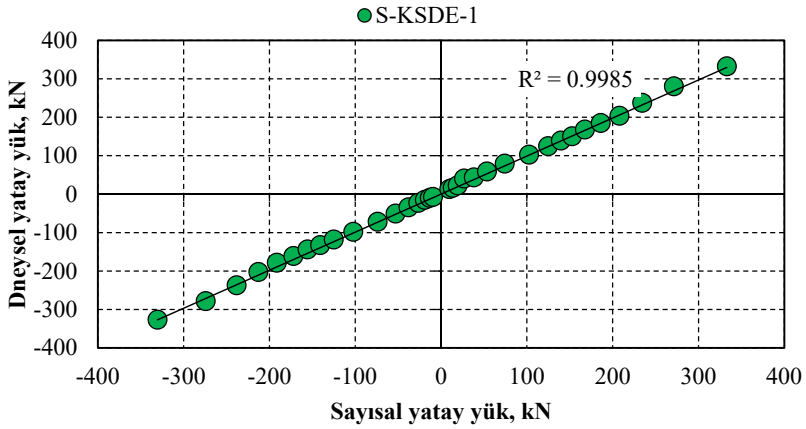
Kum saati şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 12 mm olan, çelik çubuklu enerji sönümleyici deney elemanının (S-KSDE-1) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.126'da, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.127'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.128'de, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.129'da ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.130'da verilmiştir. Tablo 3.1'de ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



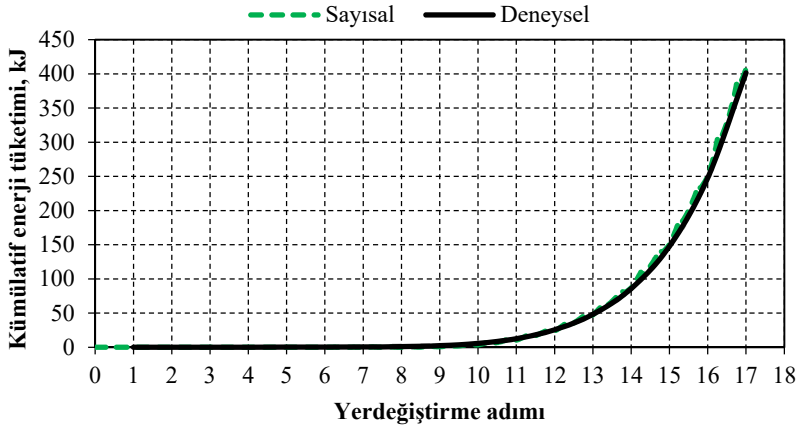
Şekil 3.126. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



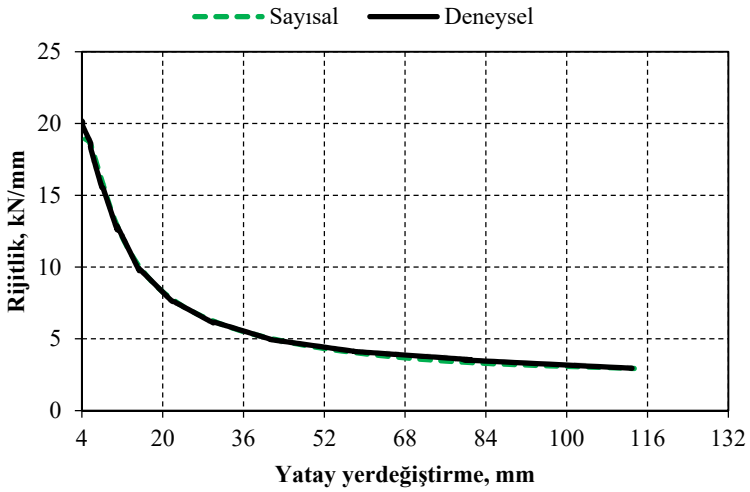
Şekil 3.127. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.128. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.129. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.130. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

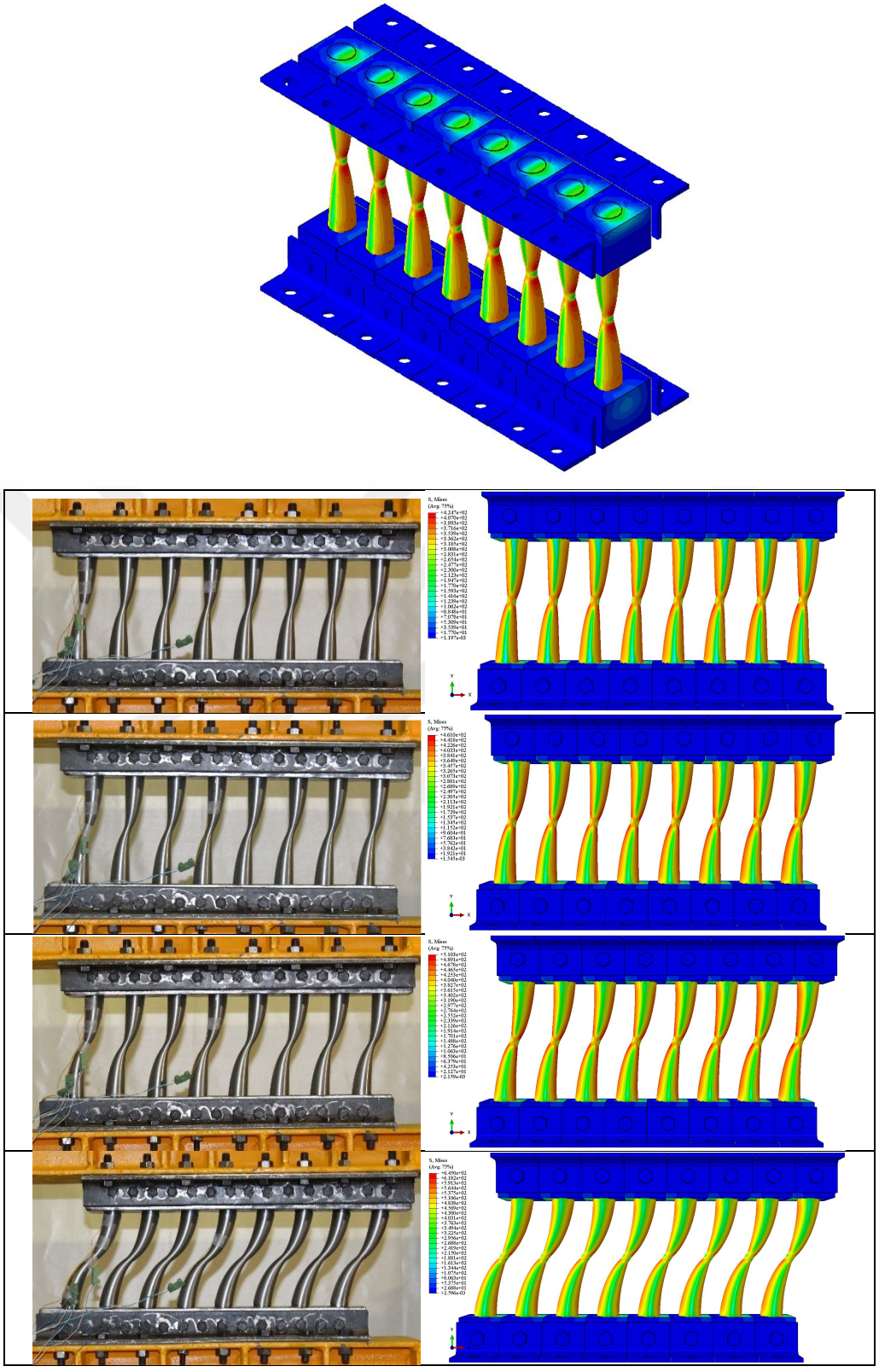
Tablo 3.1. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KSDE-1)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	139.83	132.40	139.46	141.16
11	15.0	1.4	150.77	143.40	152.54	155.78
12	21.10	**2.0**	168.49	160.43	167.54	172.32
13	29.50	2.8	185.46	178.13	185.93	191.57
14	41.30	3.9	205.14	202.33	207.83	213.08
15	57.80	5.4	238.79	236.84	234.18	238.49
16	80.90	7.6	280.97	277.83	271.20	274.49
17	113.30	10.6	332.77	326.30	332.91	330.57

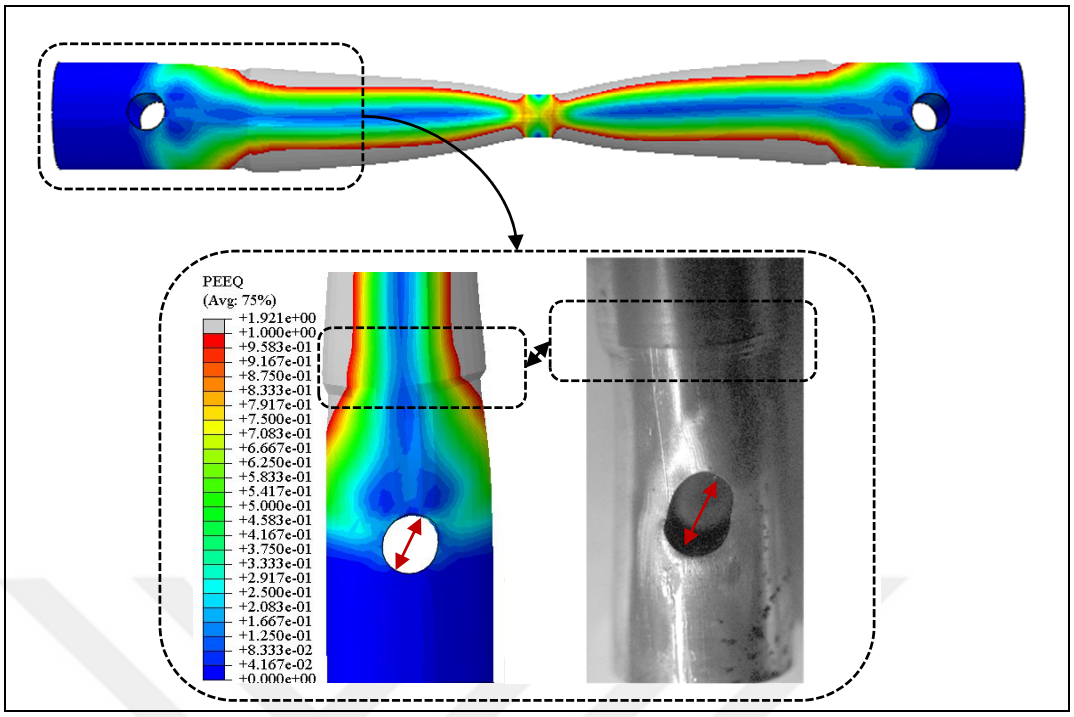
Şekillerden ve Tablo 3.1'den görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 139.83 kN ve 139.46 kN, çekmede ise 132.40 kN ve 141.16 kN'dur. Bu durumda itmede deneysel ve sayısal yük değerleri arasındaki fark % 1.0'in altındadır. Çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmalardan elde edilen yükten % 6.61 daha fazla olarak elde edilmiştir. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 168.49 kN ve 167.54 kN, çekmede ise 160.43 kN ve 172.32 kN'dur. Bu durumda itmede deneysel ve sayısal yük değerleri arasındaki fark % 5.0'dir. Çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışamadan elde edilen

yükten % 7.41 daha fazla olarak elde edilmiştir. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede yaklaşık olarak aynı iken, çekmede ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri arasındaki fark % 2.0'in altındadır. Ayrıca, Şekil 3.128 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9985). Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (Şekil 3.129 ve Şekil 3.130).

S-KSDE-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.126). Bu durum hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.126). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsallarda boşlukların mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumun oluşmasının diğer bir sebebi ise deneysel çalışmalarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.131'de, S-KSDE-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak dört farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.132'de ise tek bir KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgesindeki hasar oluşumları, sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumludur.



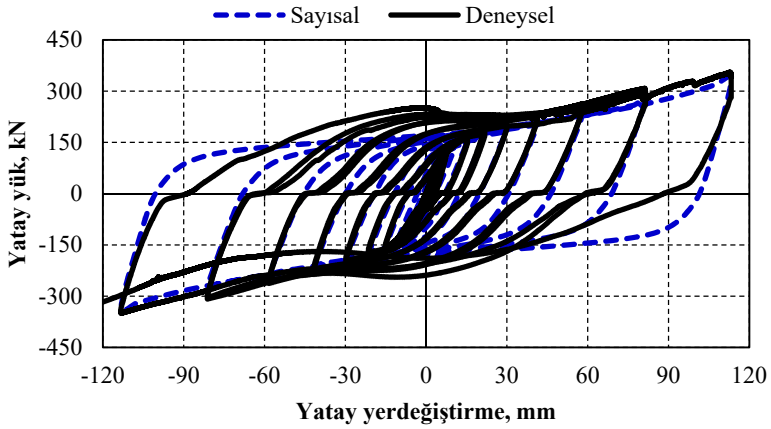
Şekil 3.131. S-KSDE-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler



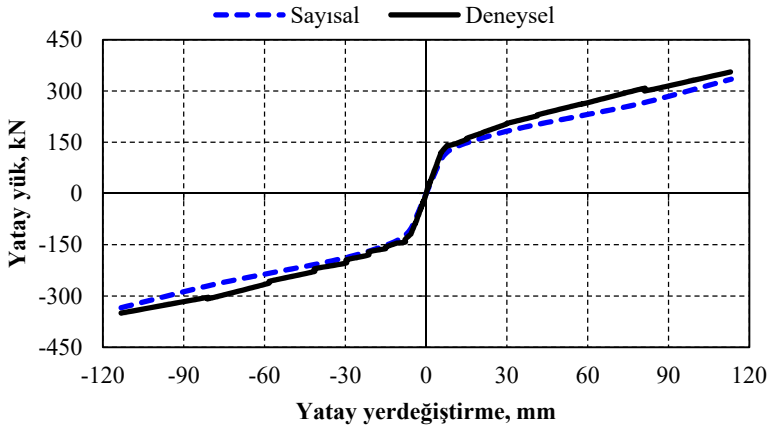
Şekil 3.132. KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri

3.4.2. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-2)

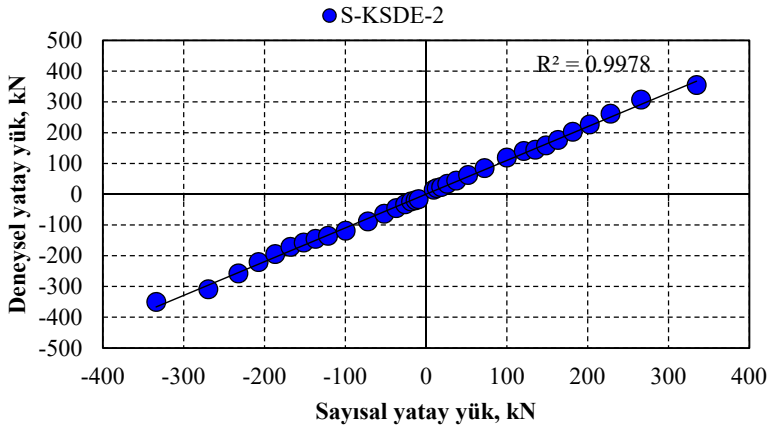
Kum saati şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 14 mm olan, çelik çubuklu enerji sönümleyici deney elemanının (S-KSDE-2) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.133'te, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.134'te deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.135'te, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.136'da ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.137'de verilmiştir. Tablo 3.2'de ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



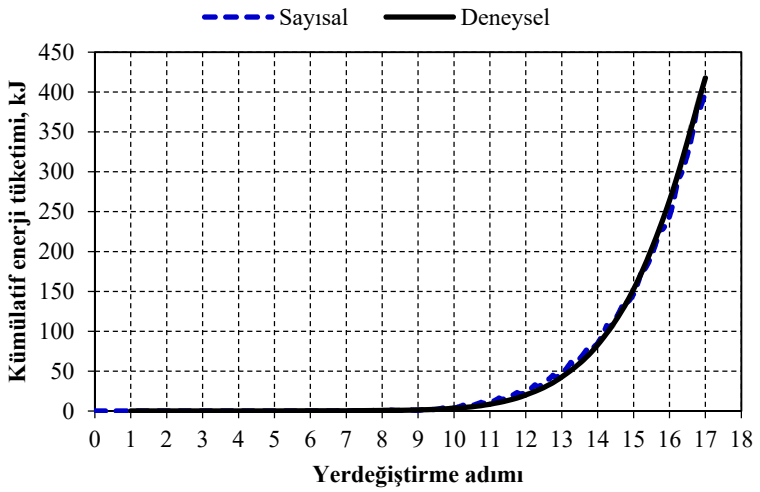
Şekil 3.133. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



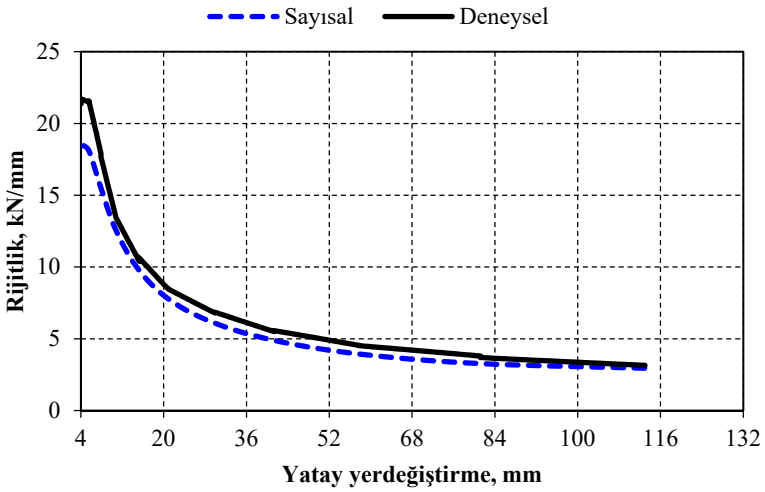
Şekil 3.134. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.135. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.136. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.137. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

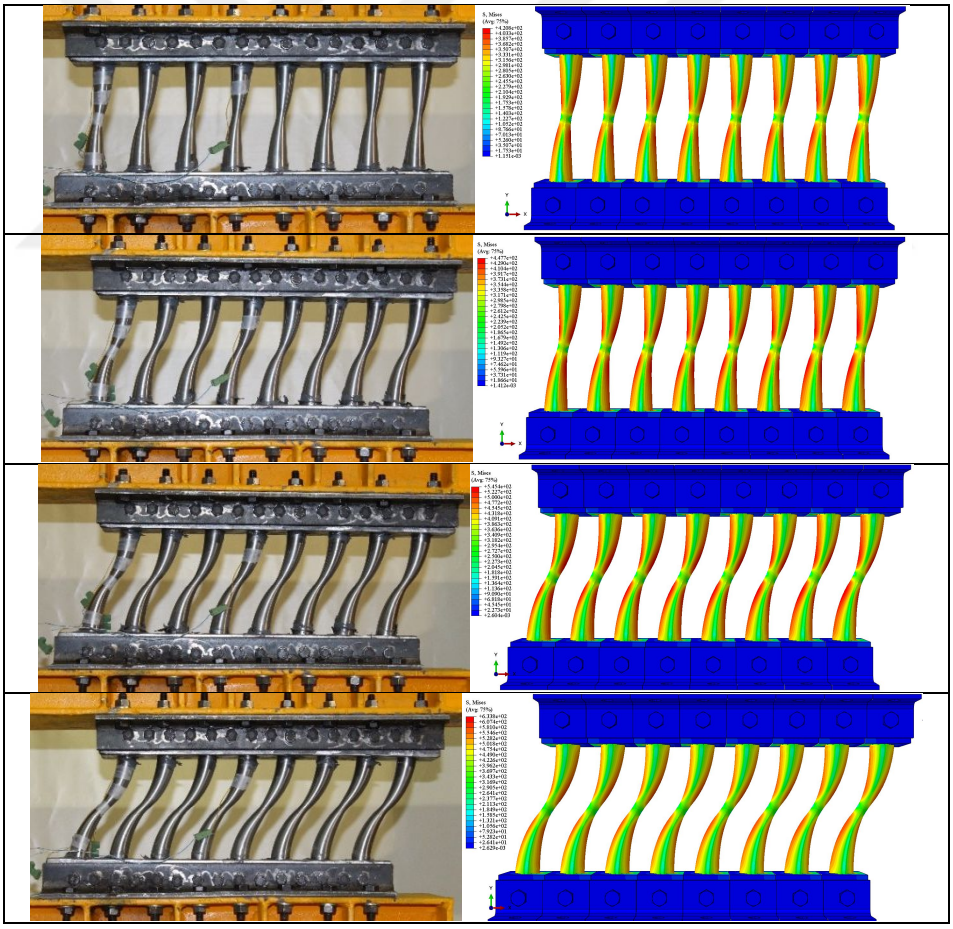
Tablo 3.2. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KSDE-2)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	145.0	145.0	136.94	135.10
11	15.0	1.4	161.4	161.29	151.62	148.31
12	21.10	**2.0**	180.4	179.95	167.95	163.19
13	29.50	2.8	204.81	203.39	186.84	181.45
14	41.30	3.9	230.06	228.31	207.41	202.43
15	57.80	5.4	262.14	262.63	232.49	228.12
16	80.90	7.6	308.21	308.45	269.77	266.04
17	113.30	10.6	355.60	349.92	334.08	334.79

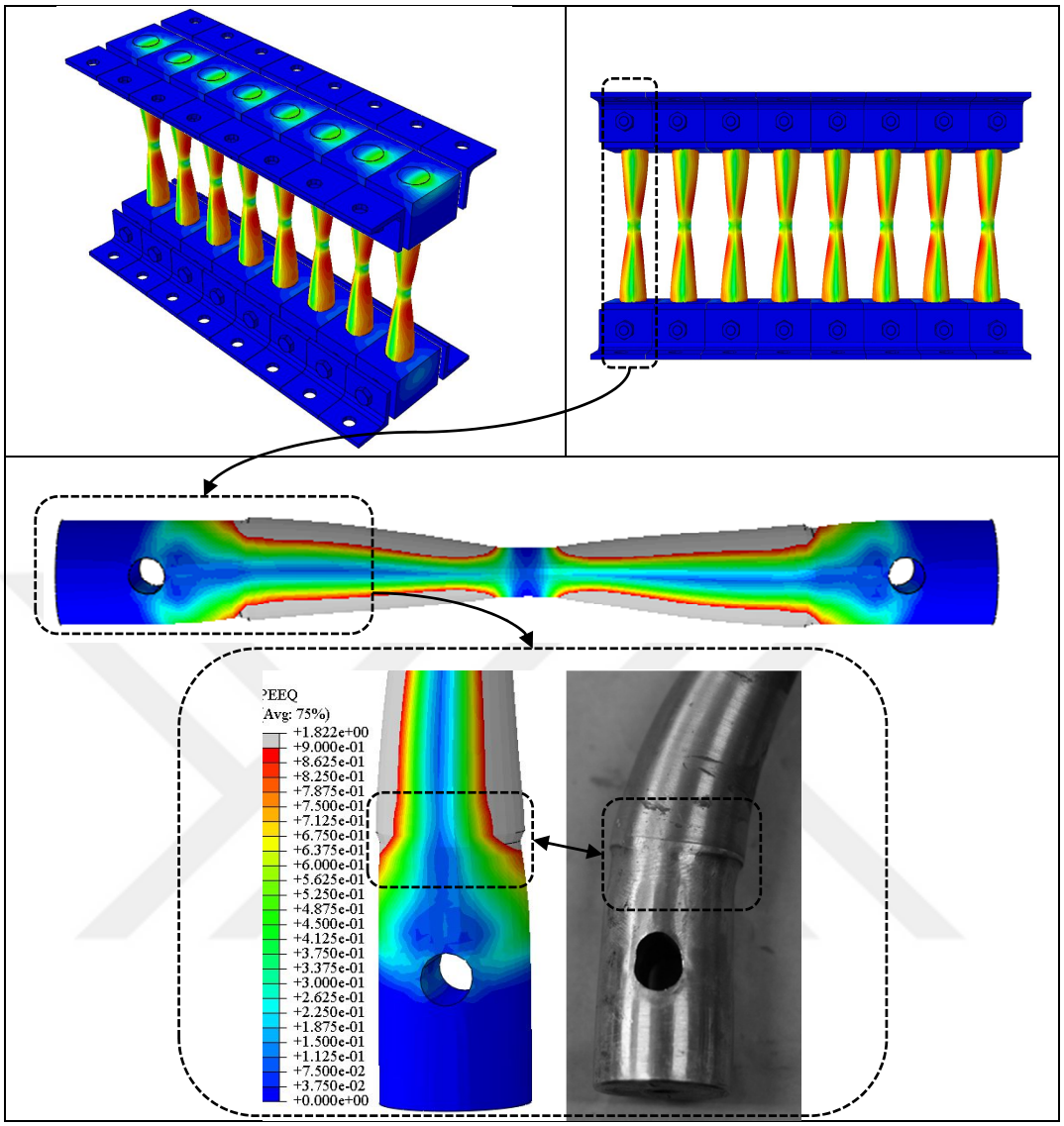
Şekillerden ve Tablo 3.2'den görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 145.0 kN ve 136.94 kN, çekmede ise 145.0 kN ve 135.10 kN'dur. Bu durumda itmede deneysel yük değeri, sayısal yük değerlerinden yaklaşık olarak % 6.0 daha fazla olarak elde edilmiştir. Çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yükle arasındaki fark % 2.0'den daha azdır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 180.40 kN ve 167.95 kN, çekmede ise 179.95 kN ve 163.19 kN'dur. Bu durumda itmede deneysel yük değeri ile sayısal olarak elde edilen yük değerinden % 7.41 daha fazladır. Çekmede ise deneysel çalışmadan elde edilen yük değeri, sayısal çalışmadan elde edilen yükten % 10.27 daha fazla olarak elde edilmiştir. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 355.60 kN ve 334.08 kN, çekmede ise 349.92 kN ve 334.79 kN'dur. Bu durumda, deneysel olarak elde edilen maksimum yük değeri, sayısal çalışmadan elde edilen yük değerinden % 6.44 daha fazladır. Çekmede ise deneysel olarak elde edilen yük değeri, sayısal olarak elde edilen yük değerinden % 4.50 daha fazladır. Görüldüğü gibi son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal yük değerleri arasındaki fark % 10.0 ve/veya daha azdır. Ayrıca, Şekil 3.135 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9978). Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (Şekil 3.136 ve Şekil 3.137).

S-KSDE-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.134). Bu durum hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE-1 elemanından elde edilen sonuçlara benzer olarak çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.133). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsallarda boşlukların

mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumun oluşumunun diğer bir sebebi ise deneysel çalışımlarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.138'de, S-KSDE-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak dört farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.139'da ise tek bir KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgesindeki hasar oluşumları, sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumludur.



Şekil 3.138. S-KSDE-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler

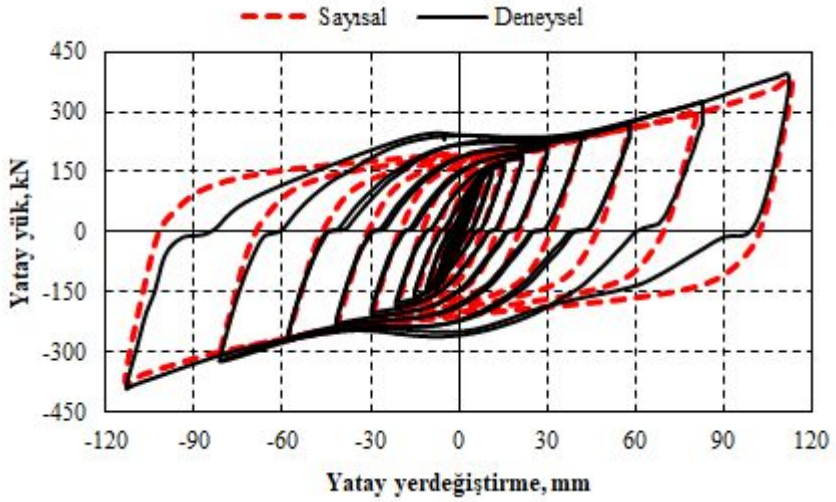


Şekil 3.139. KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri

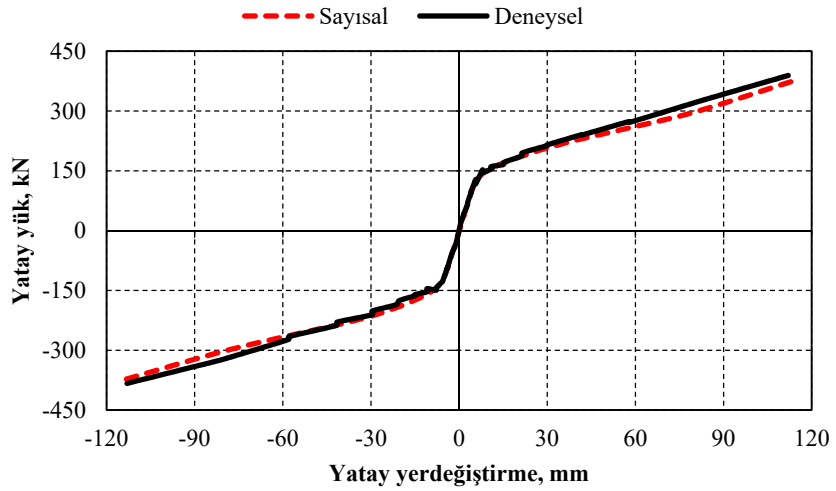
3.4.3. Kum Saati Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KSDE-3)

Kum saati şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 16 mm olan, çelik çubuklu enerji sönümleyici deney elemanının (S-KSDE-3) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.140'da, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.141'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.142'de, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.143'te ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.144'te verilmiştir. Tablo 3.3'te ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu

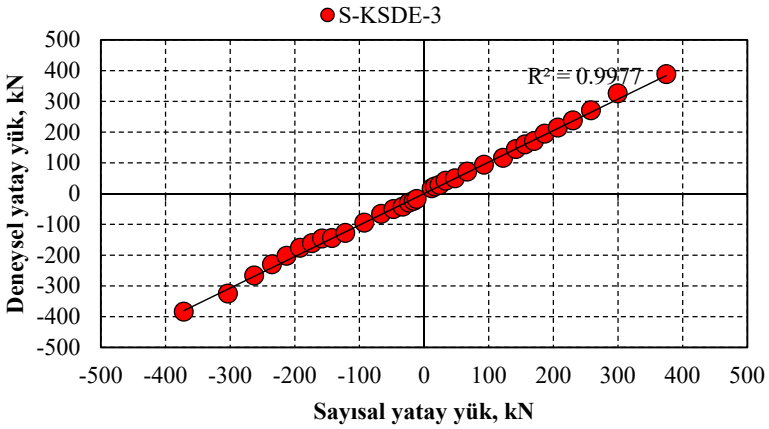
son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



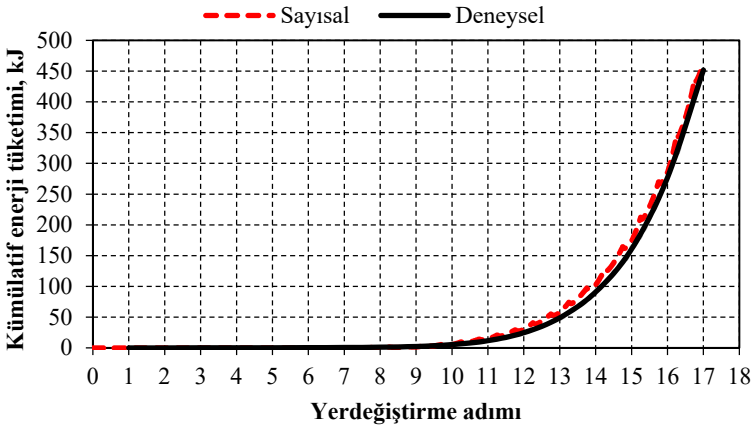
Şekil 3.140. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



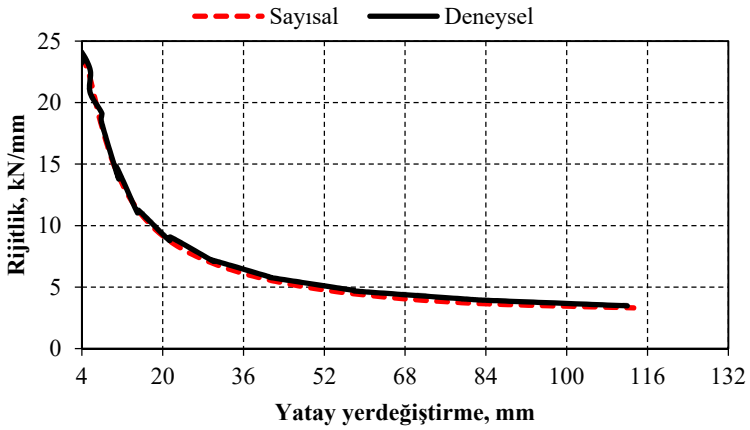
Şekil 3.141. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.142. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.143. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.144. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

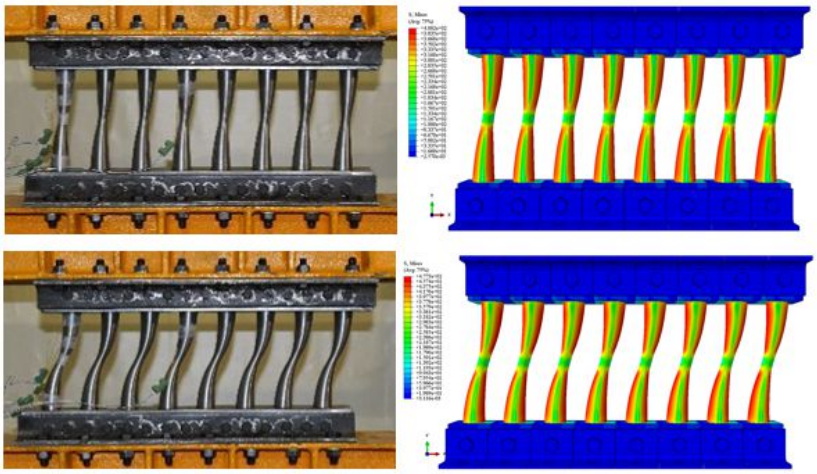
Tablo 3.3. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KSDE-3)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	160.42	153.31	158.16	155.93
11	15.0	1.4	171.23	163.48	173.79	169.78
12	21.10	**2.0**	195.13	185.74	192.11	186.43
13	29.50	2.8	214.88	210.76	213.05	206.68
14	41.30	3.9	239.96	237.72	235.58	229.89
15	57.80	5.4	273.56	273.21	263.00	257.82
16	80.90	7.6	326.30	324.42	303.59	299.31
17	113.30	10.6	389.10	383.13	372.12	374.63

Şekillerden ve Tablo 3.3'den görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 160.42 kN ve 158.16 kN, çekmede ise 153.31 kN ve 155.93 kN'dur. Bu durumda itme ve çekmede deneysel ve sayısal yük değerleri arasındaki fark % 2.0'in altındadır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 195.13 kN ve 192.11 kN, çekmede ise 185.74 kN ve 186.43 kN'dur. Bu durumda da ötelenme oranının % 1.0 olması durumuna benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri arasındaki fark % 2.0'ın altındadır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 389.10 kN ve 372.12 kN, çekmede ise 383.13 kN ve 374.63 kN'dur. Bu durumda, deneysel olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, sayısal çalışmadan elde edilen yük değerinden % 4.56 daha fazladır. Çekmede ise deneysel olarak elde edilen yük değeri, sayısal olarak elde edilen yük değerinden % 2.26 daha fazladır. Görüldüğü gibi son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal yük değerleri arasındaki fark yaklaşık % 5.0'dan daha azdır. Ayrıca, Şekil 3.143 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9977).Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (Şekil 3.144 ve Şekil 3.145).

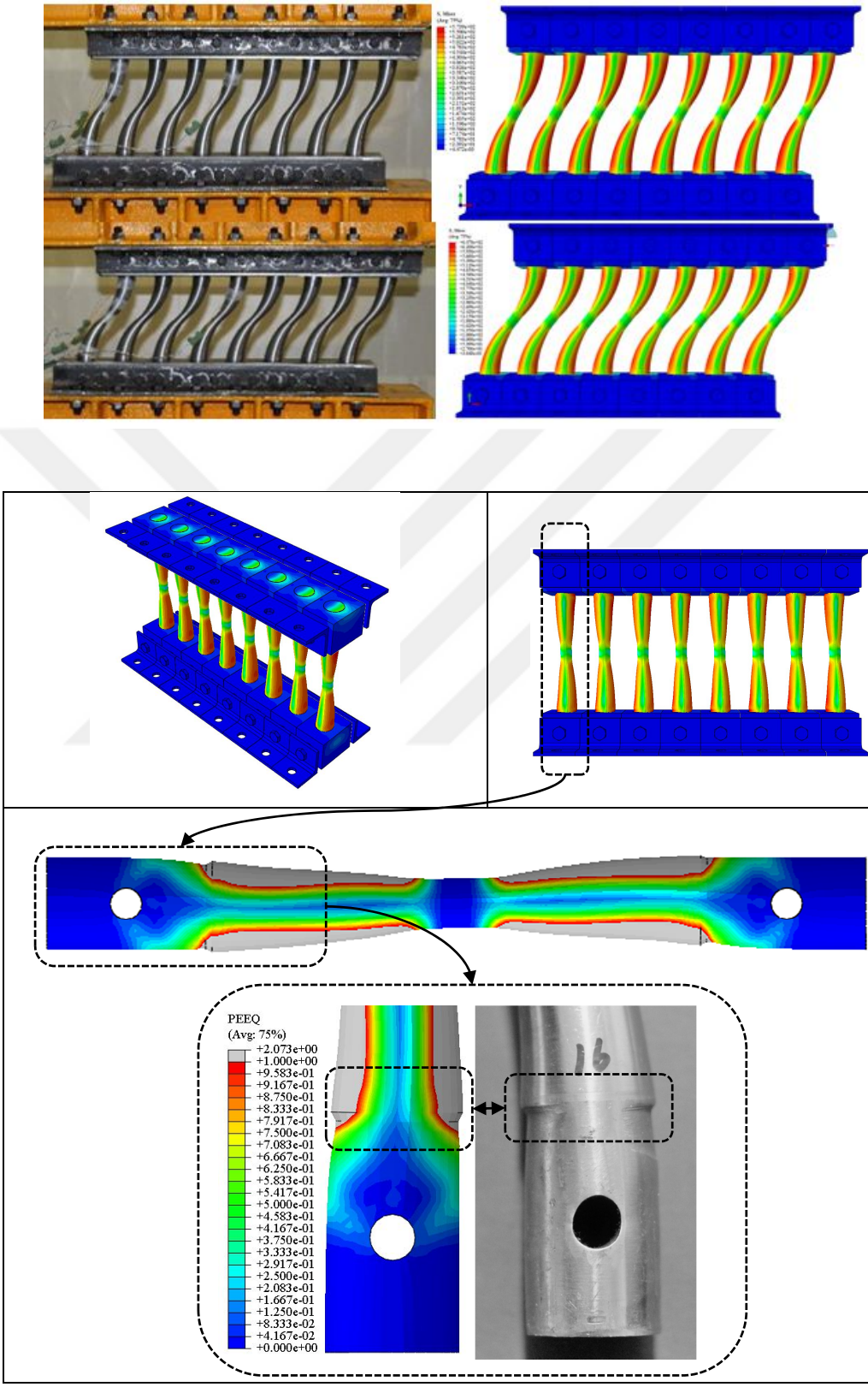
S-KSDE-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.141). Bu durum

hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE-1 ve S-KSDE-2 elemanından elde edilen sonuçlara benzer olarak çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.140). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsallarda boşlukların mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumun oluşmasının diğer bir sebebi ise deneysel çalışımlarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.145'te, S-KSDE-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak dört farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.146'da ise tek bir KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgesindeki hasar oluşumları, sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumludur.



Şekil 3.145. S-KSDE-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler

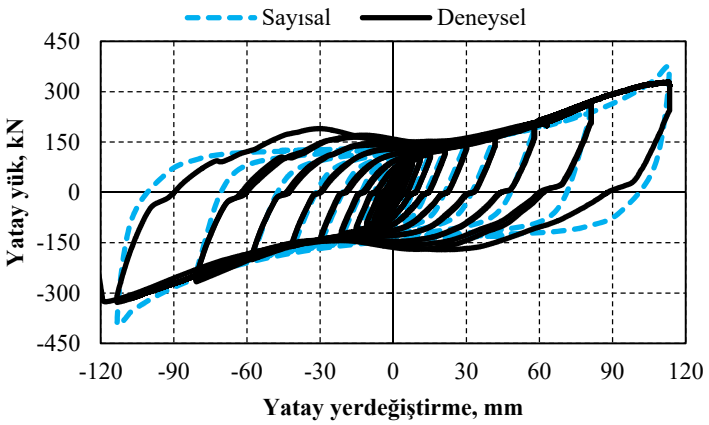
Şekil 3.145'in devamı



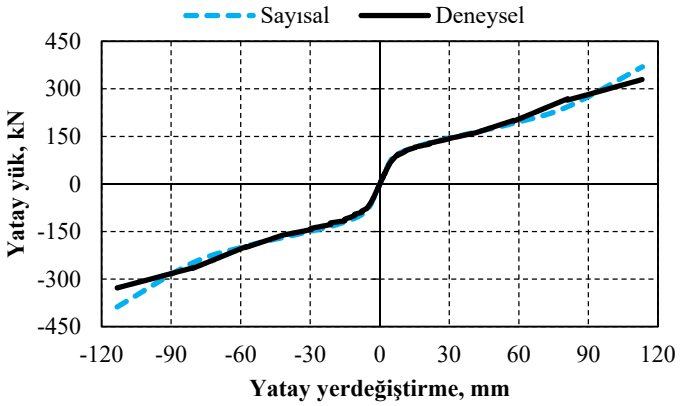
Şekil 3.146. KSDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri

3.4.4. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 12 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-1)

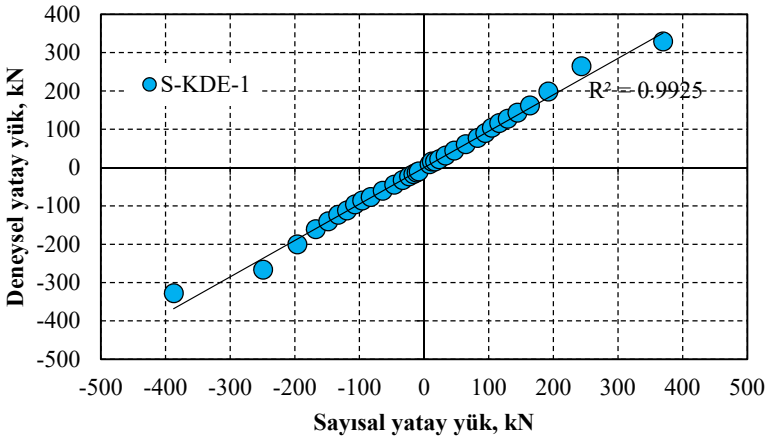
Konik şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 12 mm olan, çelik çubuklu enerji sönümleyici deney elemanının (S-KDE-1) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.147'de, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.148'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.149'da, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.150'de ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.151'de verilmiştir. Tablo 3.4'te ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



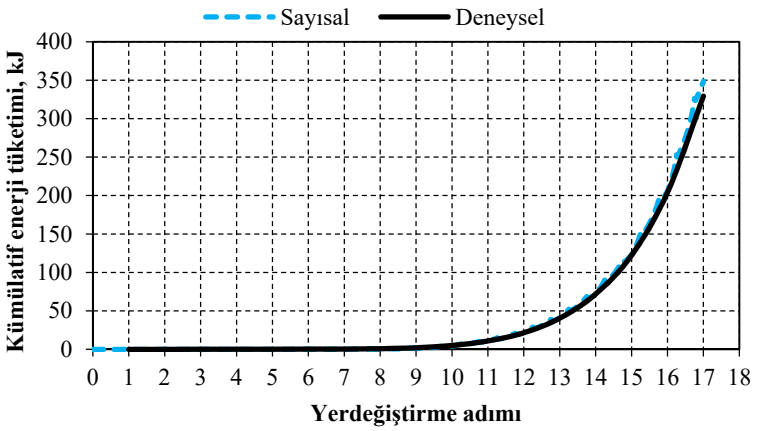
Şekil 3.147. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



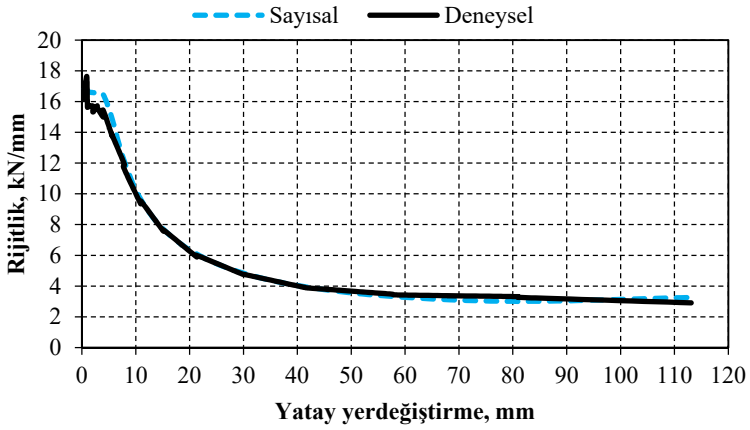
Şekil 3.148. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.149. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.150. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.151. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

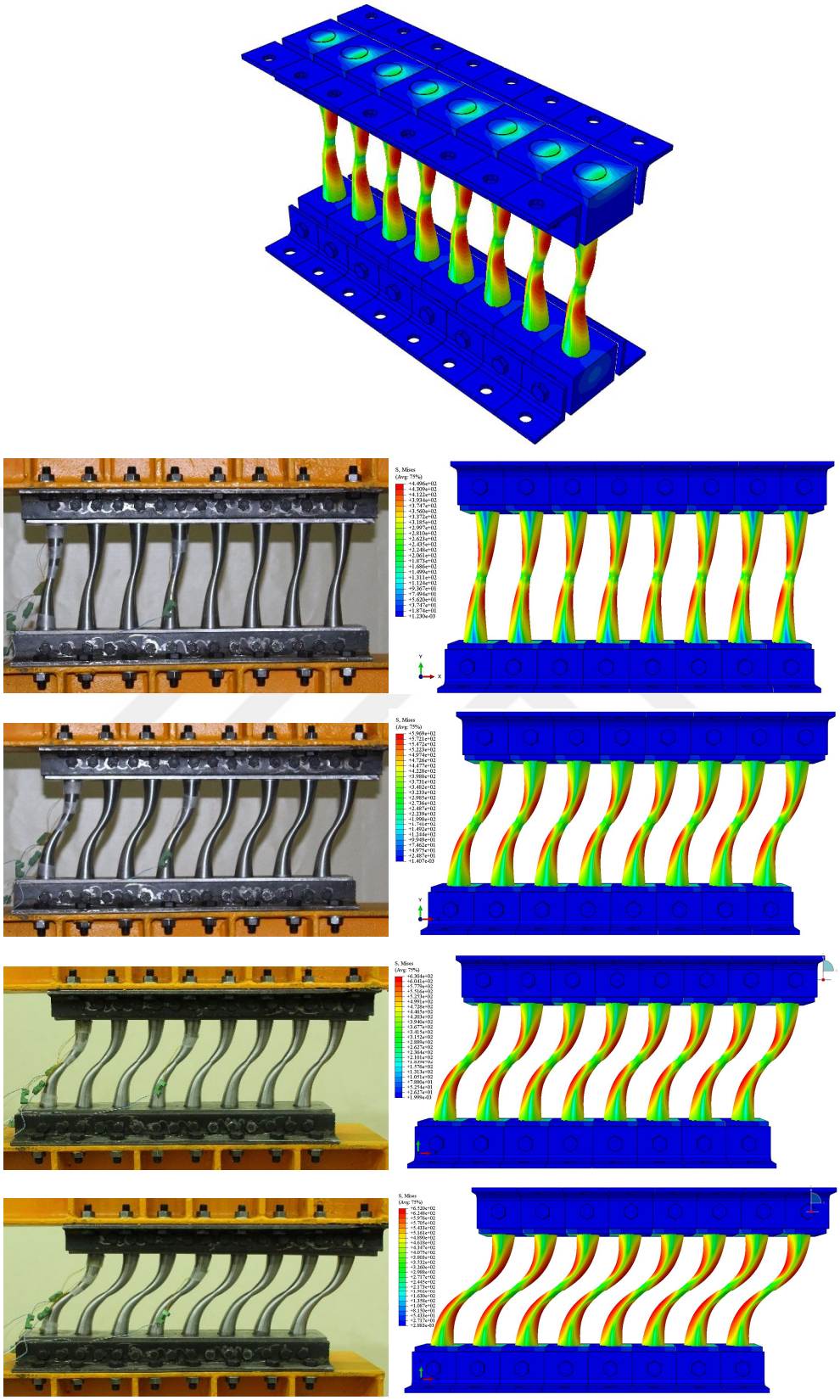
Tablo 3.4. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KDE-1)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	104.50	99.77	104.60	107.20
11	15.0	1.4	116.30	116.08	116.15	119.55
12	21.10	**2.0**	127.82	127.61	129.25	133.11
13	29.50	2.8	143.47	143.53	144.27	148.29
14	41.30	3.9	162.30	160.60	163.66	167.65
15	57.80	5.4	200.20	200.16	192.17	196.19
16	80.90	7.6	268.54	266.22	243.40	249.23
17	113.30	10.6	329.27	327.68	369.67	387.48

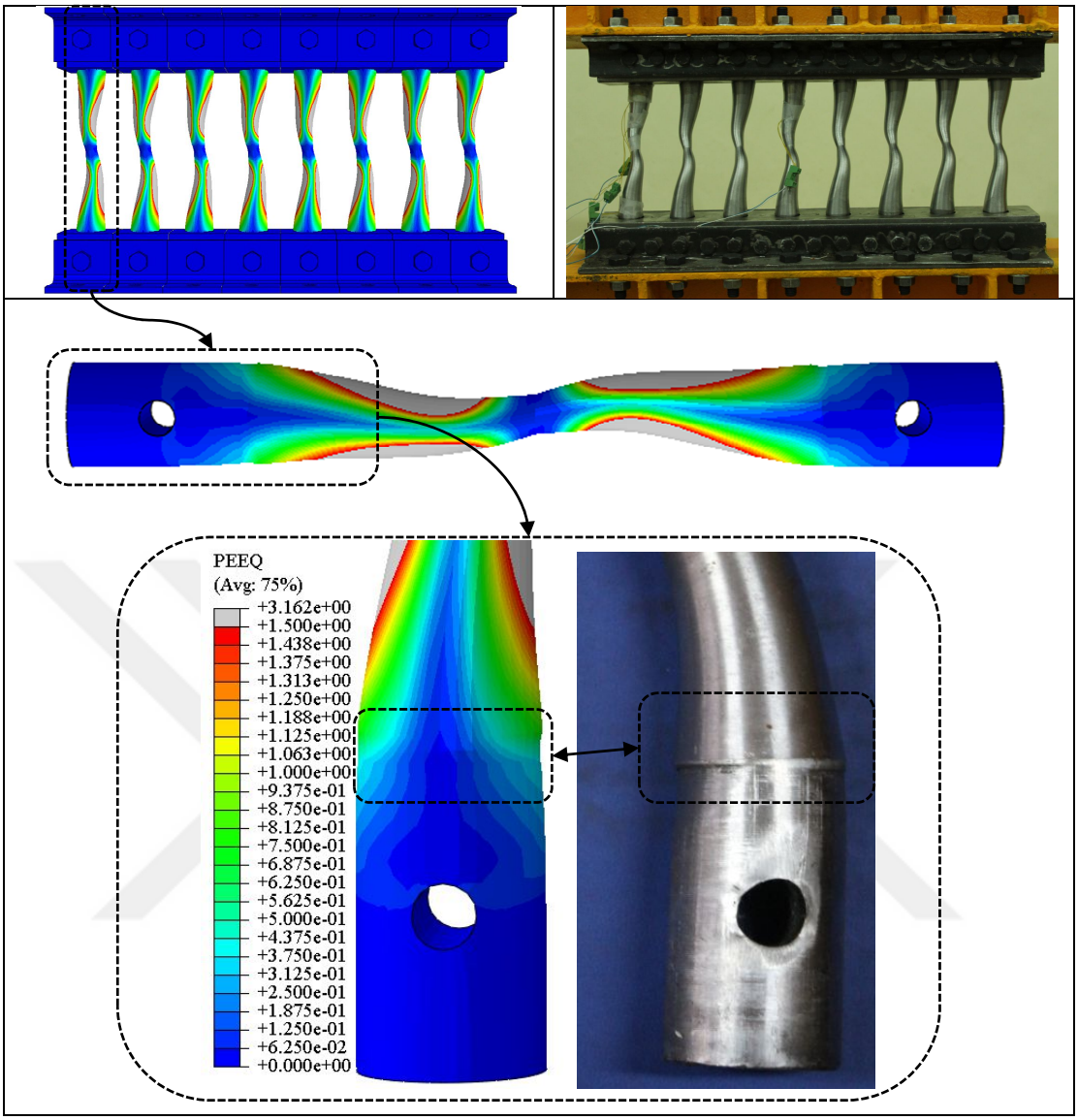
Şekillerden ve Tablo 3.4'den görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 104.50 kN ve 104.60 kN, çekmede ise 99.77 kN ve 107.20 kN'dur. Bu durumda itmede deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük değeri yaklaşık olarak aynı iken, çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 7.44 daha fazladır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 127.82 kN ve 129.25 kN, çekmede ise 127.61 kN ve 133.11 kN'dur. Bu durumda da ötelenme oranının % 1.0 olması durumuna benzer olarak itmede deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri yaklaşık olarak aynı iken, çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 4.31 daha fazladır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 329.27 kN ve 369.67kN, çekmede ise 327.68 kN ve 387.48 kN'dur. Bu durumda, sayısal olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 12.27 daha fazladır. Çekmede ise sayısal olarak elde edilen yük değeri, deneysel olarak elde edilen yük değerinden % 18.24 daha fazladır. Görüldüğü gibi S-KDE-1 deney elemanında, S-KSDE tipi sönümleyicilerden farklı olarak, yerdeğiştirme seviyesinin artması ile nihai durumda deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki fark %10'nun üzerine çıkmıştır. Ancak, Şekil 3.149 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir

(R^2=0.9925).Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (Şekil 3.150 ve Şekil 3.151).

S-KDE-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.147). Bu durum hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE tipi sönümleyici elemanlarından elde edilen sonuçlara benzer olarak çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.147). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsal boşluklarının mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumun oluşmasının diğer bir sebebi ise deneysel çalışımlarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.152'de, S-KDE-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak dört farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.153'te ise tek bir KDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgesindeki hasar oluşumlarının, sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumludur.



Şekil 3.152. S-KDE-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler

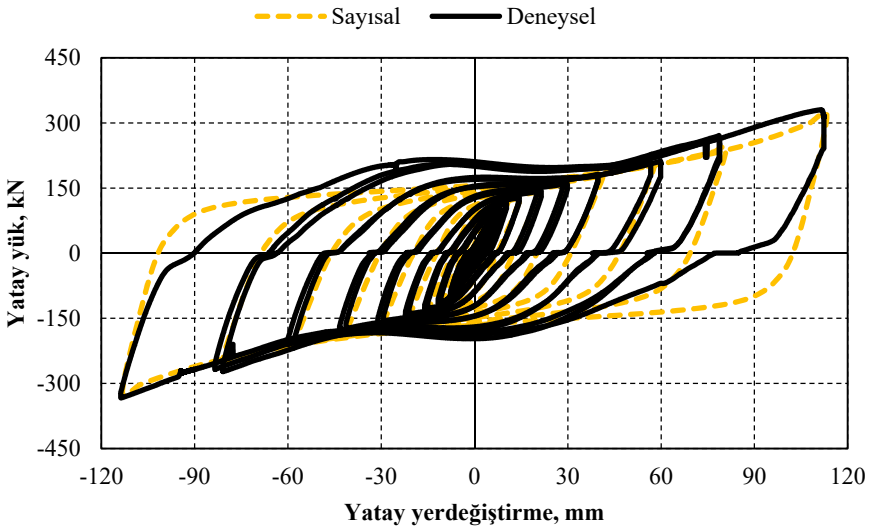


Şekil 3.153. KDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri

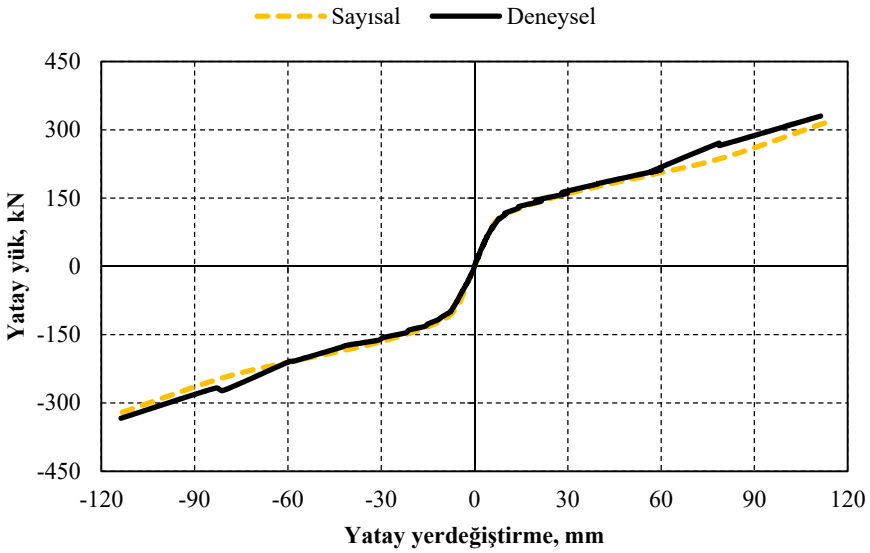
3.4.5. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 14 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-2)

Konik şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 14 mm olan, çelik çubuklu enerji sönümleyici deney elemanının (S-KDE-2) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.154'te, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.155'te deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.156'da, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.157'de ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.158'de verilmiştir.

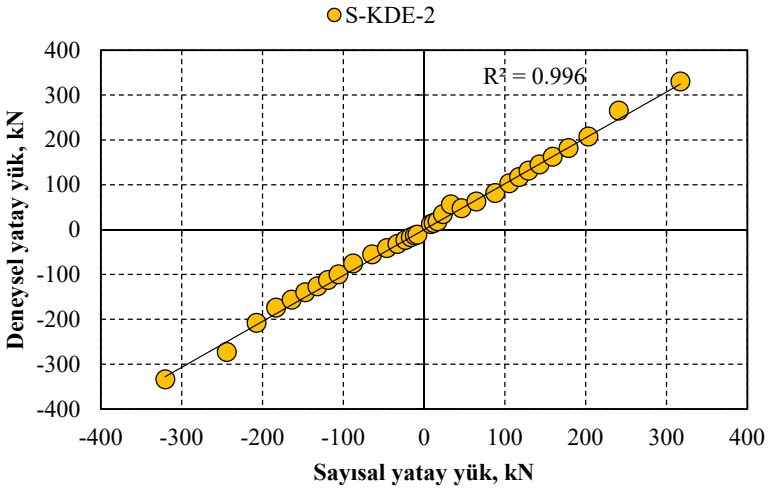
Tablo 3.5'te ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



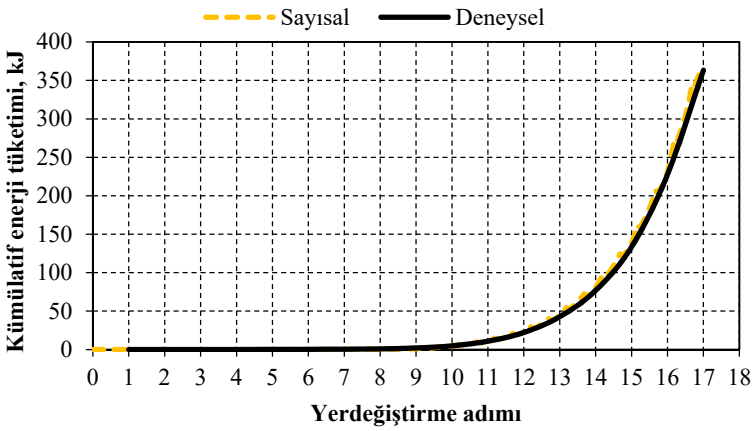
Şekil 3.154. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



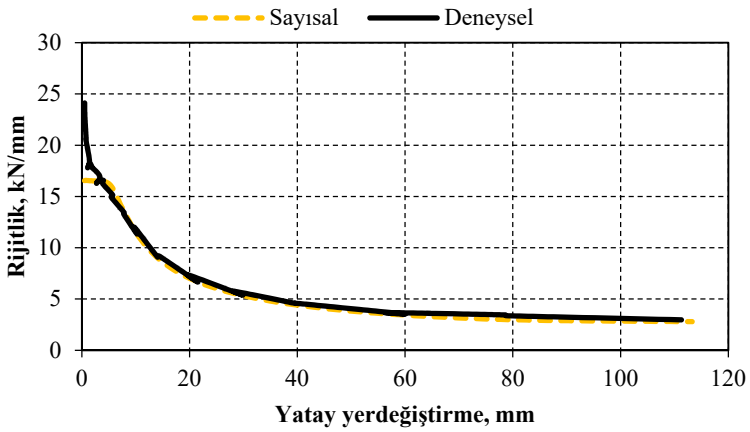
Şekil 3.155. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.156. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.157. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.158. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

Tablo 3.5. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KDE-2)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	117.28	116.91	117.33	119.19
11	15.0	1.4	131.78	131.70	128.99	132.22
12	21.10	**2.0**	145.48	145.97	142.79	147.25
13	29.50	2.8	162.68	162.15	159.08	164.18
14	41.30	3.9	181.91	178.59	178.58	183.4
15	57.80	5.4	211.97	210.14	203.09	207.39
16	80.90	7.6	270.85	272.72	240.89	244.4
17	113.30	10.6	330.35	333.51	317.13	320.34

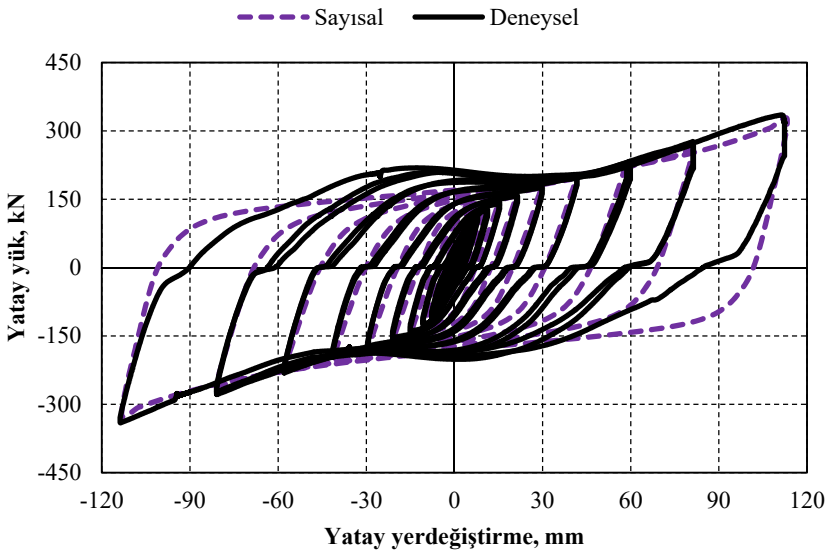
Şekillerden ve Tablo 3.5'ten görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 117.28 kN ve 117.33 kN, çekmede ise 116.91 kN ve 119.19 kN'dur. Bu durumda hem itmede hem de çekmede deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük değeri arasındaki fark %2 'nin altındadır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 145.48 kN ve 142.79 kN, çekmede ise 145.97 kN ve 147.25 kN'dur. Bu durumda da ötelenme oranının % 1.0 olması durumuna benzer olarak itmede deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri yaklaşık olarak aynı iken, çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 3.12 daha fazladır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 330.35 kN ve 317.13 kN, çekmede ise 333.51 kN ve 320.34 kN'dur. Bu durumda, deneysel olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, sayısal çalışmadan elde edilen yük değerinden % 4.16 daha fazladır. Çekmede ise deneysel olarak elde edilen yük değeri, sayısal olarak elde edilen yük değerinden % 4.11 daha fazladır. Görüldüğü gibi S-KDE-2 elemanı, S-KDE-1 sönümleyici elemanından farklı olarak, yerdeğiştirme seviyesinin artması ile nihai durumda deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki fark %5'in altındadır. Şekil 3.156 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9960).Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme

ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (bk. Şekil 3.157 ve Şekil 3.158).

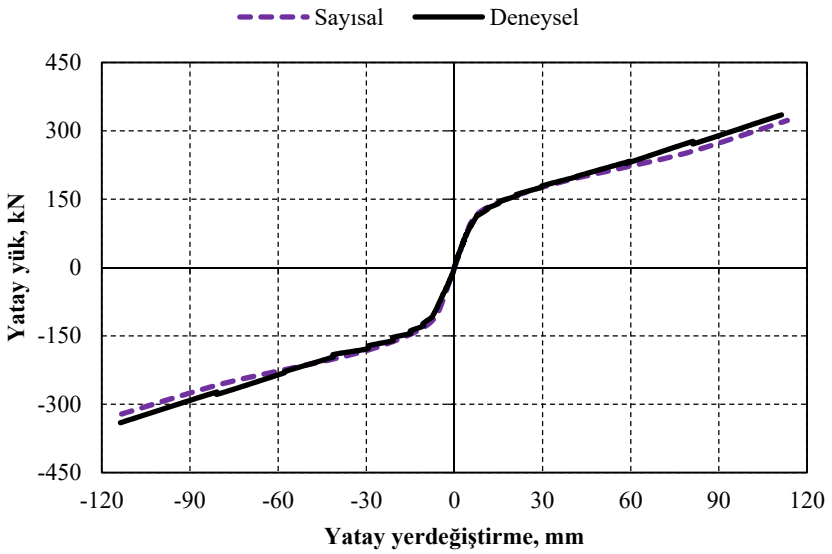
S-KDE-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.154). Bu durum hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleştirilmiş pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE tipi sönümleyici elemanlarından elde edilen sonuçlara benzer olarak çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.154). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsallarda boşlukların mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumunu oluşumunun diğer bir sebebi ise deneysel çalışımlarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur.

3.4.6. Konik Şekilli Dairesel Enkesitli, Yükseklik Ortası Çapı 16 mm Olan, Çelik Çubuklu Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-KDE-3)

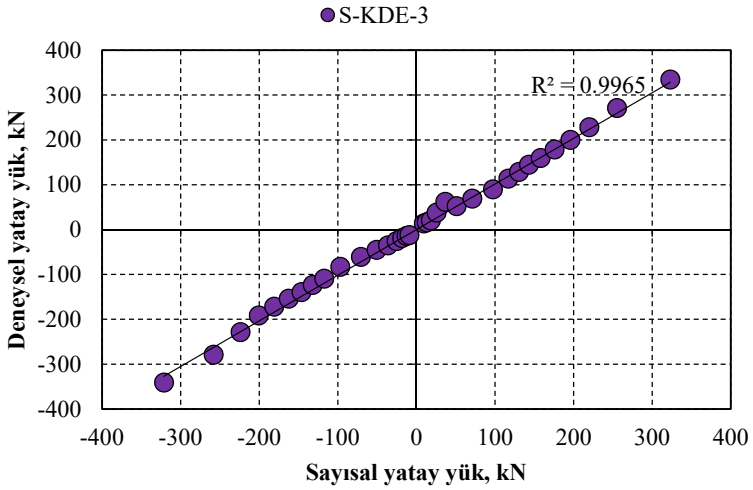
Konik şekilli dairesel enkesitli, yükseklik ortası çapı 16 mm olan, çelik çubuklu enerji sönümleyici deney elemanının (S-KDE-3) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.159'da, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.160'da deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.161'de, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.162'de ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.163'de verilmiştir. Tablo 3.6'da ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son sekiz yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



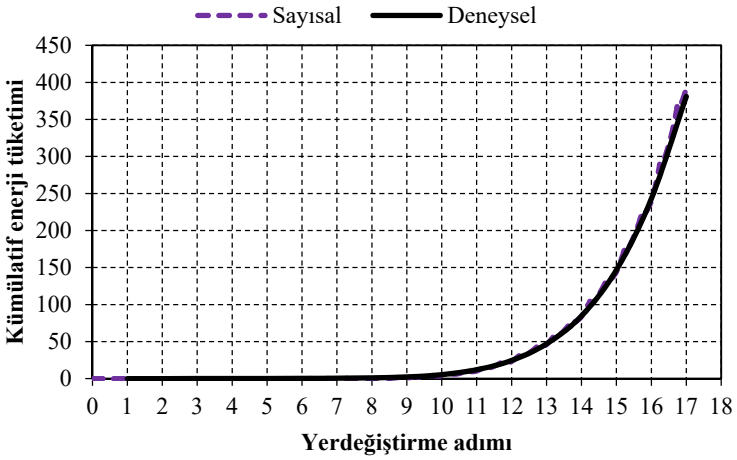
Şekil 3.159. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



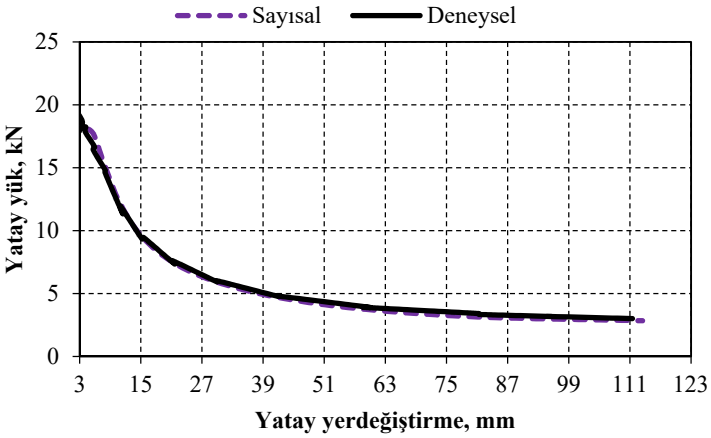
Şekil 3.160. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.161. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.162. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.163. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

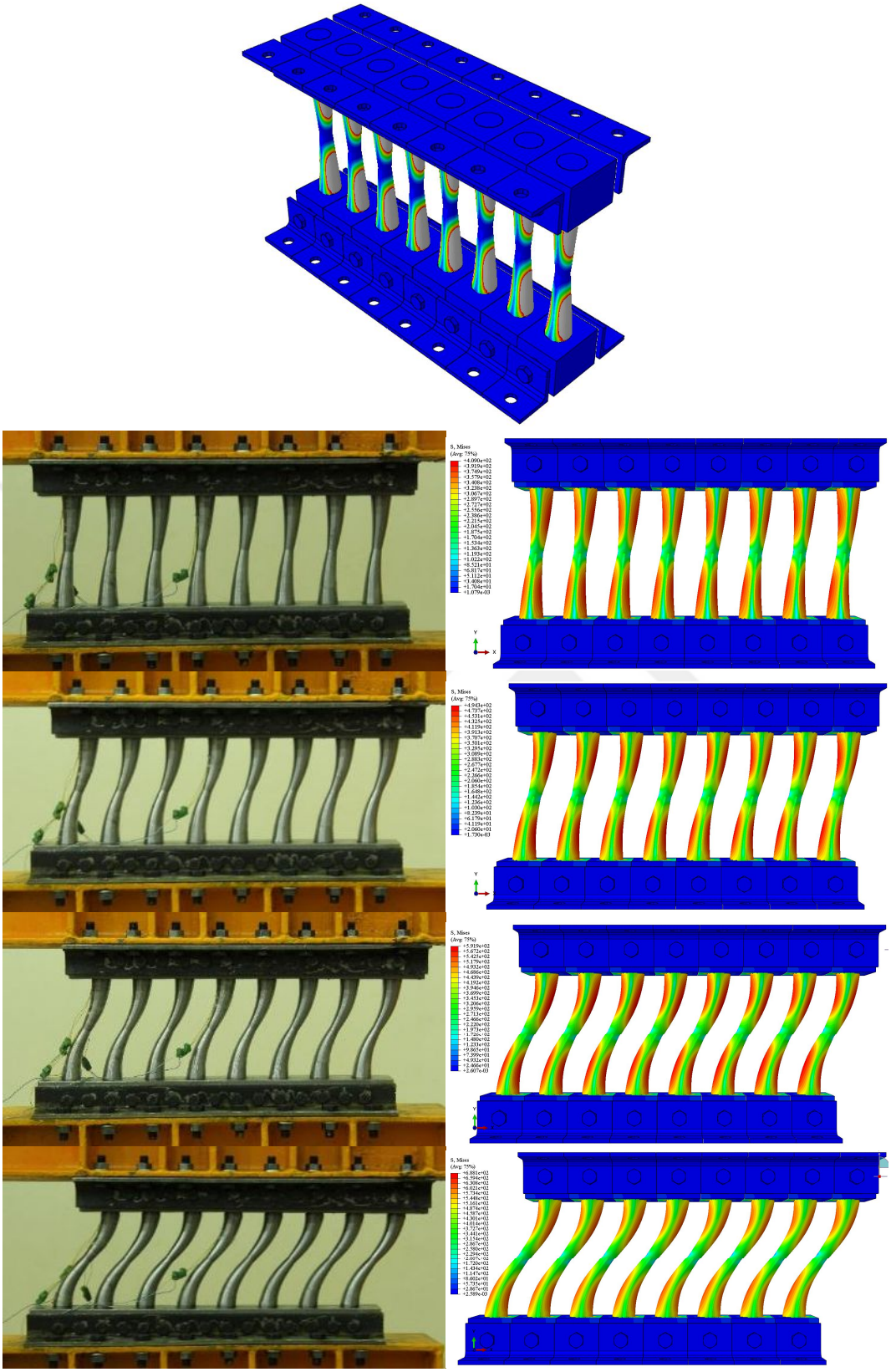
Tablo 3.6. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-KDE-3)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	129.01	128.61	130.34	132.19
11	15.0	1.4	144.96	144.87	142.96	146.36
12	21.10	**2.0**	160.03	160.57	157.86	162.75
13	29.50	2.8	178.95	178.37	175.65	181.27
14	41.30	3.9	200.10	196.45	195.76	200.86
15	57.80	5.4	233.17	231.15	219.68	224.09
16	80.90	7.6	276.63	278.54	255.06	258.23
17	113.30	10.6	334.92	340.63	322.75	321.32

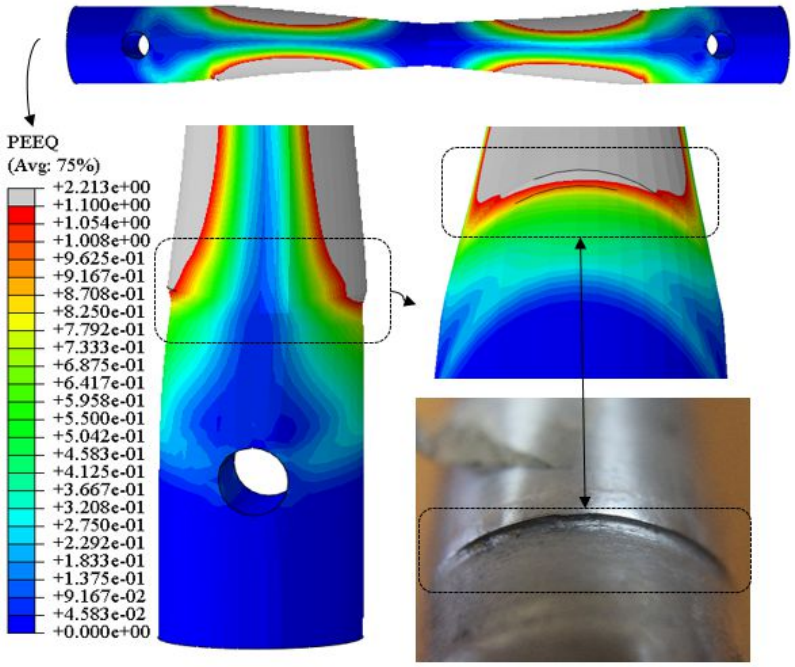
Şekillerden ve Tablo 3.6'dan görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 129.01 kN ve 130.14 kN, çekmede ise 128.61kN ve 132.19 kN'dur. Bu durumda hem itmede hem de çekmede deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük değeri arasındaki fark %3'ün altındadır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 160.03 kN ve 157.86 kN, çekmede ise 160.57kN ve 162.25 kN'dur. Bu durumda da ötelenme oranının % 1.0 olması durumuna benzer olarak itmede deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri yaklaşık olarak aynı iken, çekmede ise sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 2.78 daha fazladır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 334.92 kN ve 322.75kN, çekmede ise 340.63 kN ve 321.32 kN'dur. Bu durumda, deneysel olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, sayısal çalışmadan elde edilen yük değerinden % 3.77 daha fazladır. Çekmede ise deneysel olarak elde edilen yük değeri, sayısal olarak elde edilen yük değerinden % 6.00 daha fazladır. Görüldüğü gibi S-KDE-3 elemanı, S-KDE-1 ve S-KDE-2 sönümleyici elemanından farklı olarak, yerdeğiştirme seviyesinin artması ile nihai durumda deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki fark %5 ile %10 arasındadır. Şekil 3.161 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerleri arasında da güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir (R^2=0.9965).Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde

edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (bk. Şekil 3.162 ve Şekil 3.163).

S-KDE-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.159). Bu durum hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleştirilmiş pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE tipi sönümleyici elemanlarından elde edilen sonuçlara benzer olarak çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.159). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsal boşluklarının mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumun oluşumunun diğer bir sebebi ise deneysel çalışmalarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.164'te, S-KDE-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak dört farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.165'te ise tek bir KDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgesindeki hasar oluşumları sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumludur.



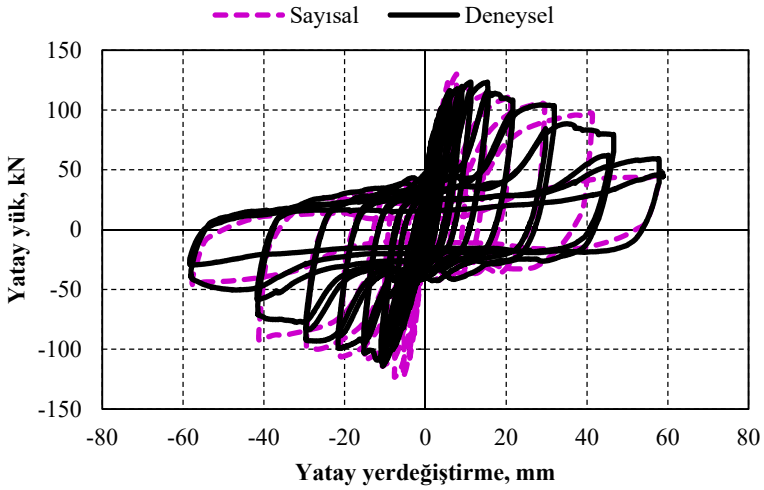
Şekil 3.164. S-KDE-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler



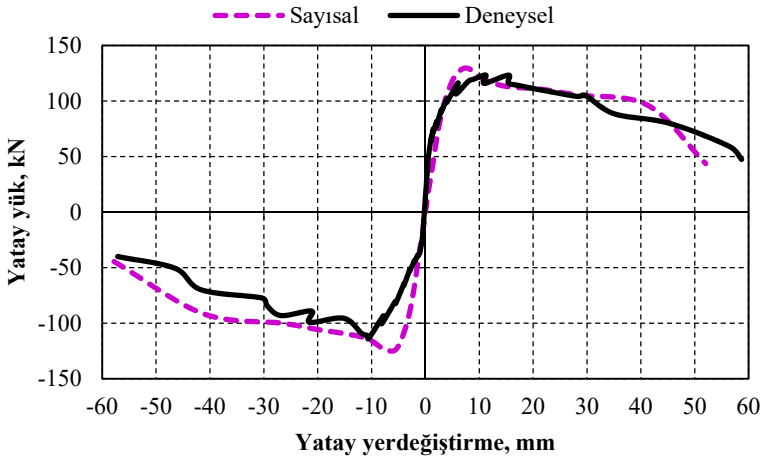
Şekil 3.165. KDE çelik çubuğun deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen mesnet bölgesindeki hasarların görünümleri

3.4.7. Kalınlığı 1.50 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-1)

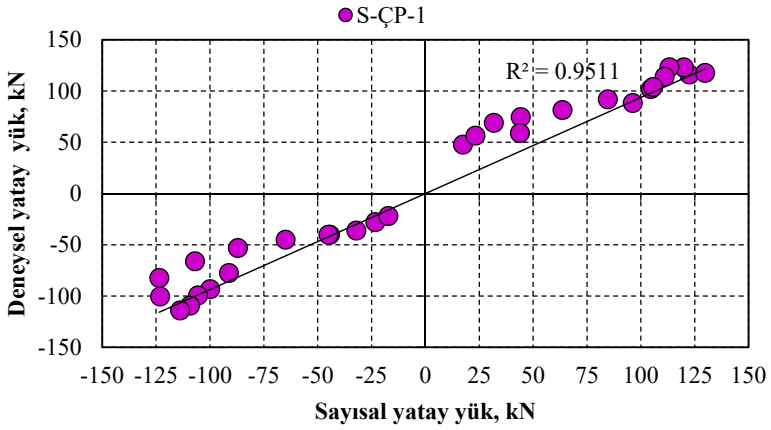
Kalınlığı 1.50 mm olan çelik plakaların kullanıldığı enerji sönümleyici deney elemanının (S-ÇP-1) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.166'da, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.167'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği ise Şekil 3.168'de verilmiştir. Tablo 3.7'de ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son on yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



Şekil 3.166. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.167. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.168. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği

Tablo 3.7. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-ÇP-1)

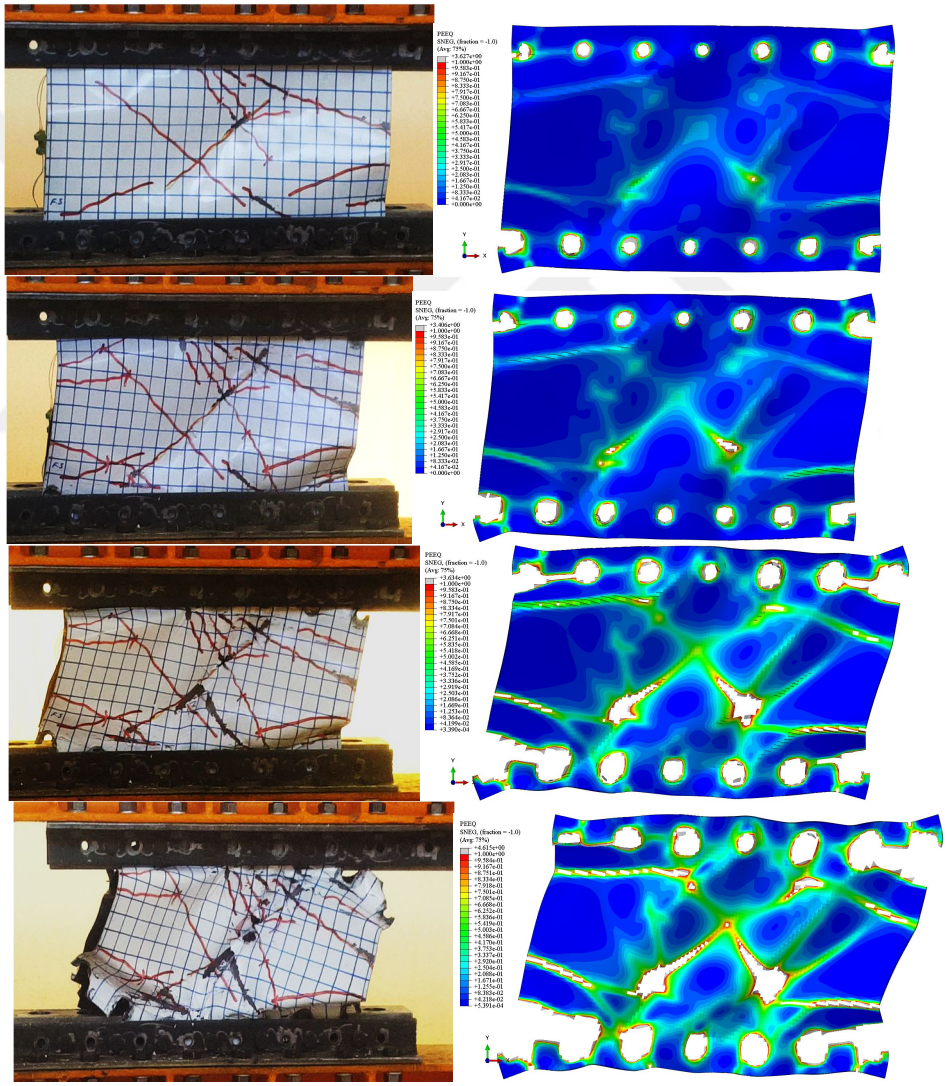
Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
6	2.8	<1.0	92.06	91.99	84.62	87.08
7	3.9	<1.0	102.76	103.81	104.57	107.01
8	5.5	<1.0	116.26	114.93	122.50	123.54
9	7.7	<1.0	119.71	118.29	129.79	123.16
10	10.7	1.0	123.35	118.50	119.87	113.92
11	15.0	1.4	123.32	121.15	113.23	109.26
12	21.10	**2.0**	114.06	113.13	110.98	105.56
13	29.50	2.8	104.16	102.44	105.63	99.91
14	41.30	3.9	88.51	85.09	96.21	91.2
15	57.80	5.4	57.84	55.50	43.79	44.39

Şekillerden ve Tablo 3.7'den görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 123.35 kN ve 119.87 kN, çekmede ise 118.50 kN ve 113.92 kN'dur. Bu durumda hem itmede hem de çekmede deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük değeri arasındaki fark %5'in altındadır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 114.06 kN ve 110.98 kN, çekmede ise 113.13 kN ve 105.56 kN'dur. Bu durumda da ötelenme oranının % 1.0 olması durumuna benzer olarak itmede deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri % 5'in altındadır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 123.35 kN ve 129.79 kN, çekmede ise 121.15 kN ve 123.54 kN'dur. Bu durumda, sayısal olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 5.22 daha fazladır. Çekmede ise sayısal olarak elde edilen yük değeri, deneysel olarak elde edilen yük değerinden % 2.00 daha fazladır. Şekil 3.168 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9511).

S-ÇP-1 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.166). Bu durum hem plaka üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil

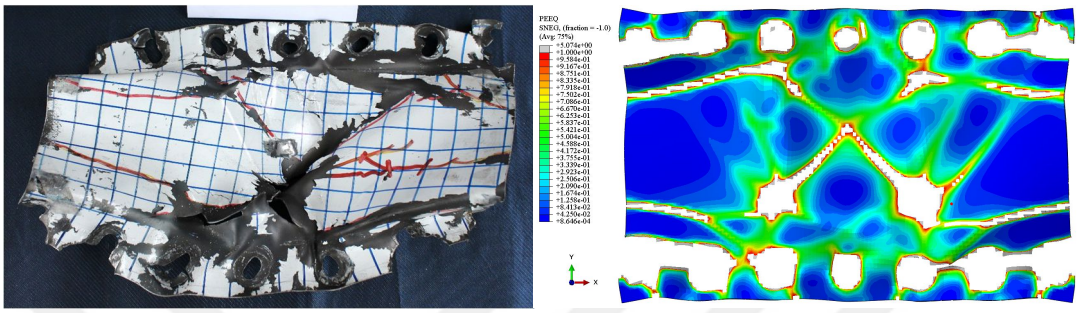
ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ayrıca yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyici elemanlarından elde edilen sonuçlardan farklı olarak yüklemenin yön değiştirdiği bölgelerde çevrimsel eğriler arasındaki fark oldukça azdır (bk. Şekil 3.166).

Şekil 3.169'da, S-ÇP-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak dört farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir.



Şekil 3.169. S-ÇP-1 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler

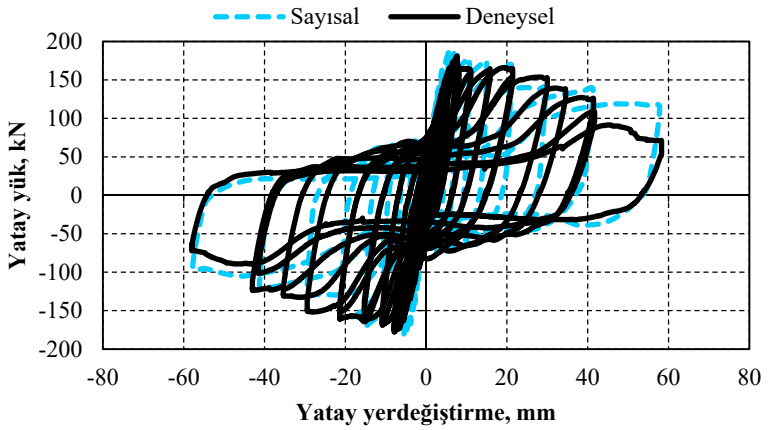
Tek bir çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarlarının görünümleri Şekil 3.170'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi çelik plakaların farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş halleri ve nihai durumdaki hasar oluşumları birbiriyle uyumludur.



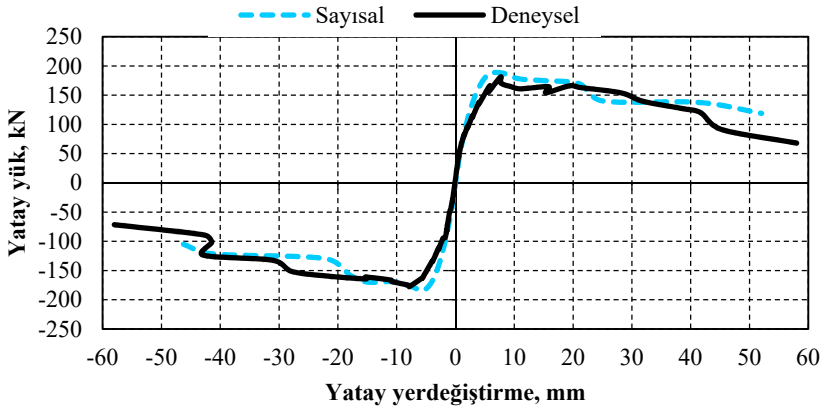
Şekil 3.170. Çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri

3.4.8. Kalınlığı 2.00 mm olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-2)

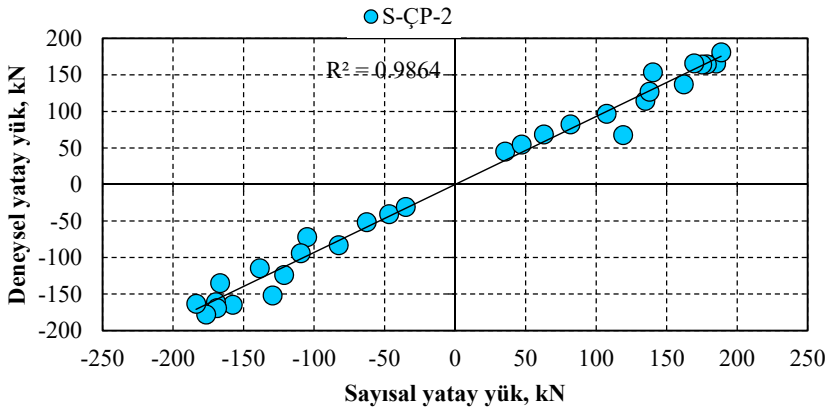
Kalınlığı 2.00 mm olan çelik plakaların kullanıldığı enerji sönümleyici deney elemanının (S-ÇP-2) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.171'de, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.172'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği ise Şekil 3.173'de verilmiştir. Tablo 3.8'de ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son on yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



Şekil 3.171. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.172. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.173. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği

Tablo 3.8. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-ÇP-2)

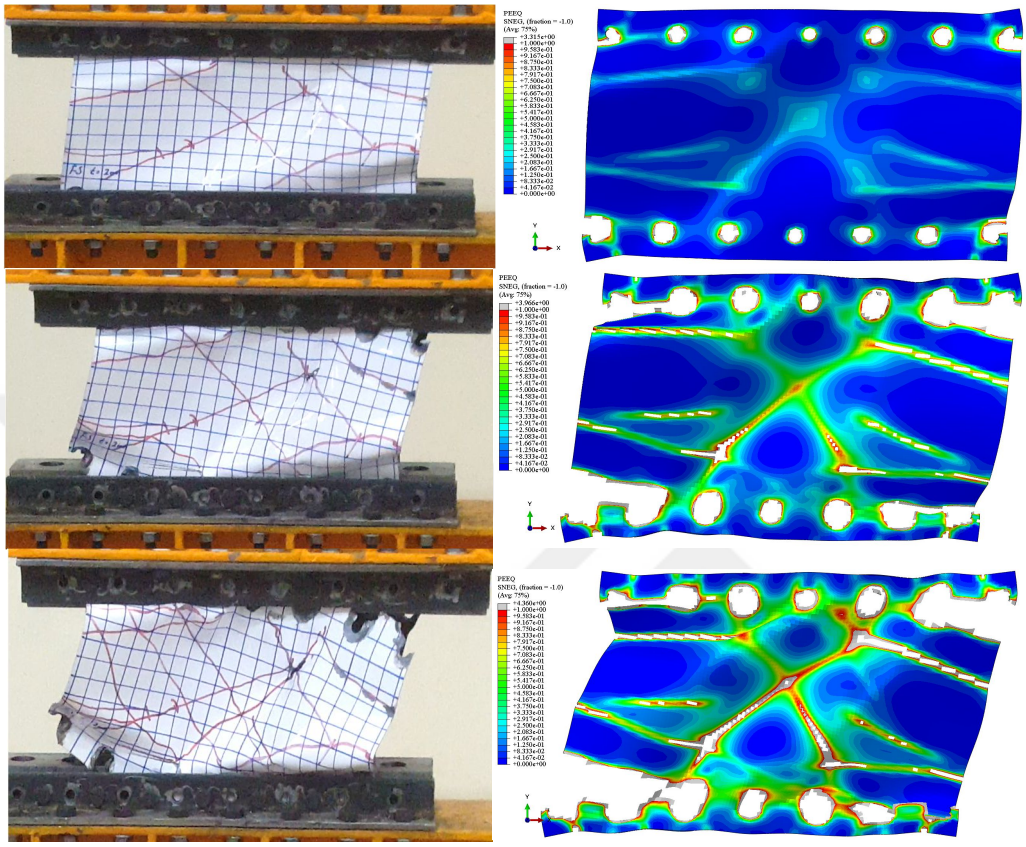
Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
6	2.8	<1.0	114.71	114.34	134.78	138.65
7	3.9	<1.0	137.44	134.80	161.95	166.77
8	5.5	<1.0	165.87	163.00	184.88	183.65
9	7.7	<1.0	181.18	177.66	188.53	176.62
10	10.7	1.0	164.76	164.94	178.32	168.98
11	15.0	1.4	164.65	160.92	175.02	169.68
12	21.10	**2.0**	166.17	164.46	169.41	157.81
13	29.50	2.8	153.83	151.63	140.14	129.56
14	41.30	3.9	127.21	123.68	137.76	121.39
15	57.80	5.4	91.42	89.38	119.00	105.03

Şekillerden ve Tablo 3.8'den görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 164.76 kN ve 178.32 kN, çekmede ise 164.94 kN ve 168.98 kN'dur. Bu durumda itmede sayısal çalışmadan elde edilen maksimum yük değeri, deneysel olarak elde edilen yük değerinden %8.23 daha fazladır. Çekmede ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki fark % 3'ün altındadır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 166.17 kN ve 169.41 kN, çekmede ise 164.46 kN ve 157.81 kN'dur. Bu durumda, itmede deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki fark yaklaşık olarak %2.0'dir.Çekmede ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki fark %5.0'ın altındadır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 181.18 kN ve 188.53 kN, çekmede ise 177.66 kN ve 183.65 kN'dur. Bu durumda, sayısal olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 4.00 daha fazladır. Çekmede ise sayısal olarak elde edilen yük değeri, deneysel olarak elde edilen yük değerinden % 3.37 daha fazladır. Ayrıca Şekil 3.173 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9864).

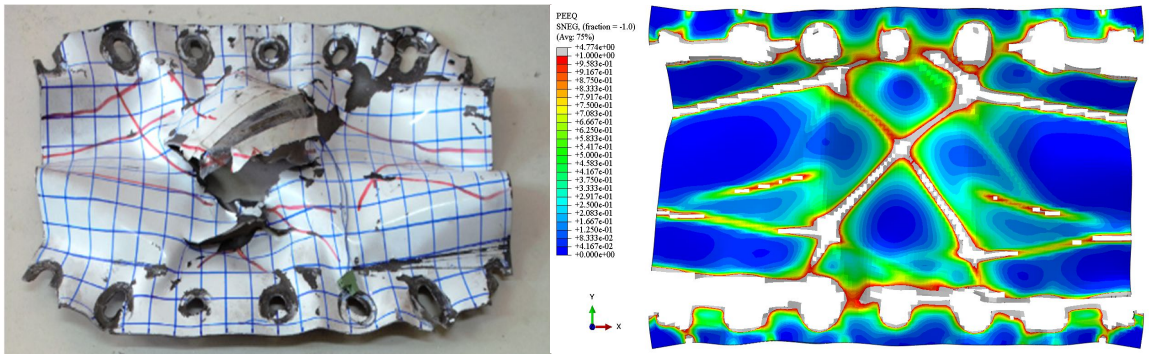
S-ÇP-2 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.171). Bu durum hem plaka üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleştirilmiş pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ayrıca yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyici elemanlarından elde edilen sonuçlardan farklı olarak yüklemenin yön değiştirdiği bölgelerde çevrimsel eğriler arasındaki fark oldukça azdır (bk. Şekil 3.171).

Şekil 3.174'te, S-ÇP-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak üç farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.175'te ise tek bir çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi çelik plakaların farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel ve sayısal

çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş halleri ve nihai durumdaki hasar oluşumları birbiriyle uyumludur.



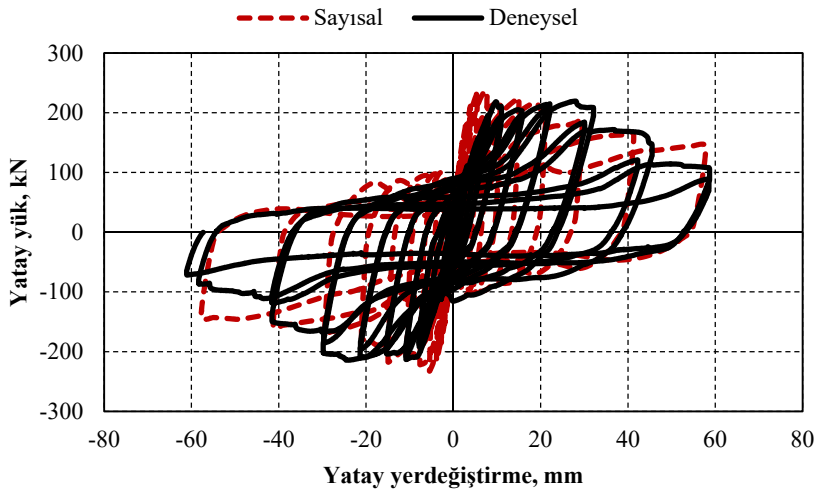
Şekil 3.174. S-ÇP-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler



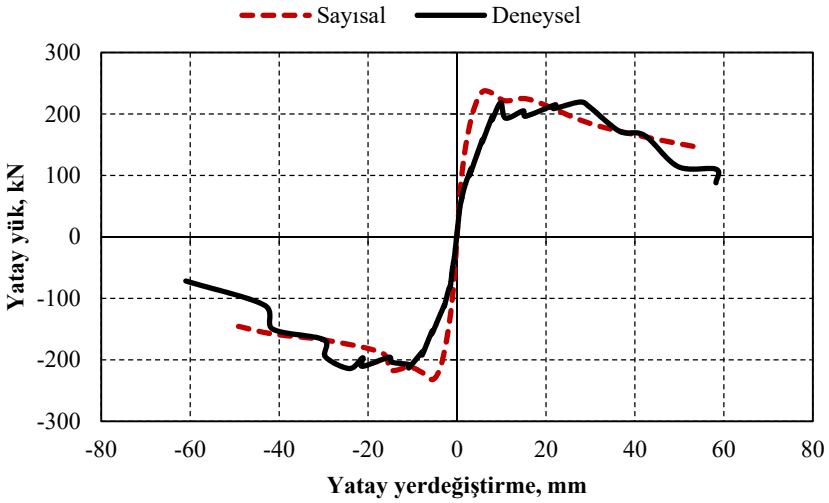
Şekil 3.175. Çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri

3.4.9. Kalınlığı 2.50 mm Olan Çelik Plakaların Kullanıldığı Enerji Sönümleyici Deney Elemanı (S-ÇP-3)

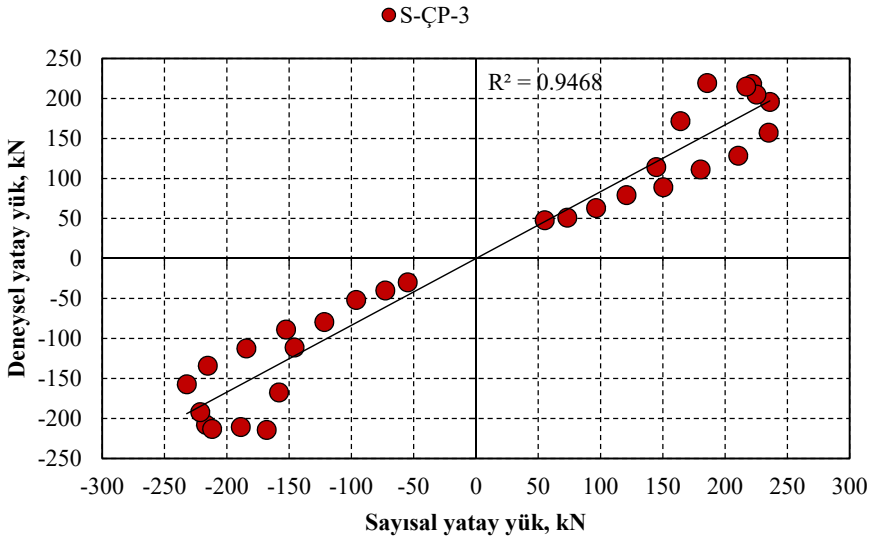
Kalınlığı 2.50 mm olan çelik plakaların kullanıldığı enerji sönümleyici deney elemanının (S-ÇP-3) sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.176'da, dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.177'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği ise Şekil 3.178'de verilmiştir. Tablo 3.9'da ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son on yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



Şekil 3.176. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.177. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.178. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği

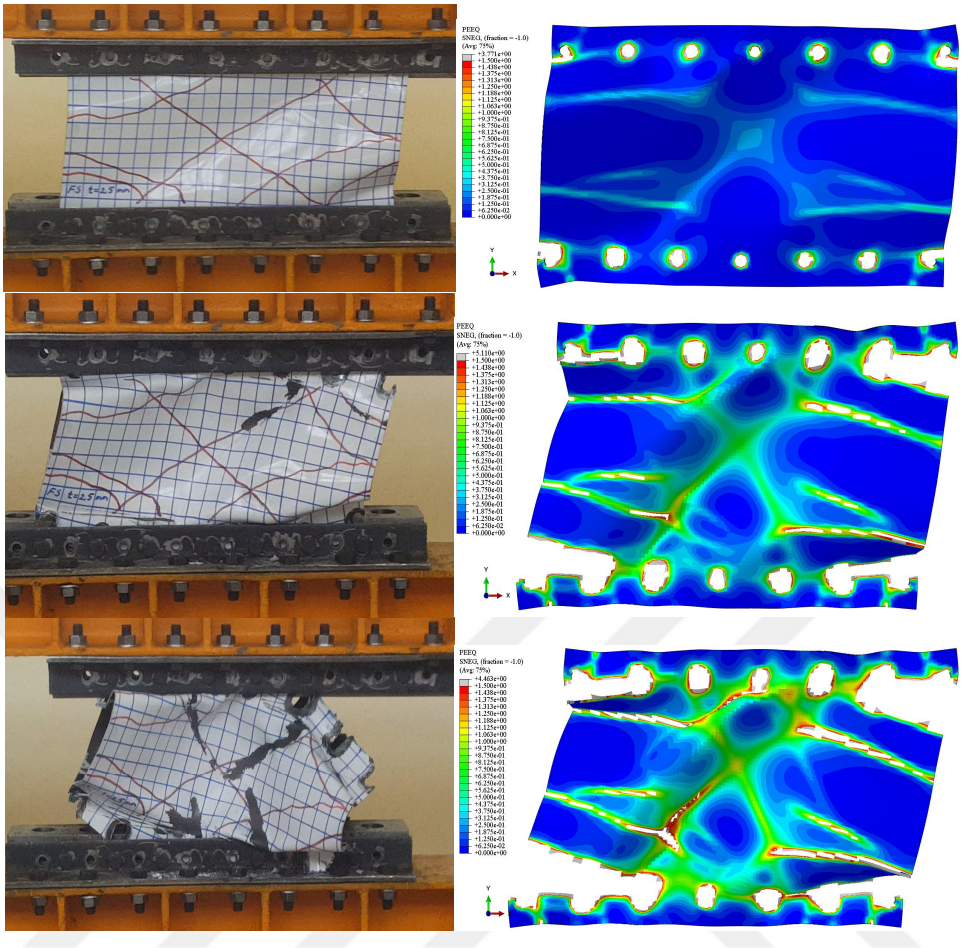
Tablo 3.9. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (S-ÇP-3)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
6	2.8	<1.0	111.26	112.44	180.26	184.43
7	3.9	<1.0	128.50	134.00	210.38	215.41
8	5.5	<1.0	157.43	157.21	234.77	232.16
9	7.7	<1.0	195.85	191.96	235.85	221.38
10	10.7	1.0	218.13	213.08	221.59	211.87
11	15.0	1.4	205.02	207.87	225.09	216.73
12	21.10	**2.0**	214.89	210.65	216.79	188.96
13	29.50	2.8	219.41	214.27	185.45	168.05
14	41.30	3.9	171.79	167.42	164.09	158.13
15	57.80	5.4	114.31	111.19	144.69	145.74

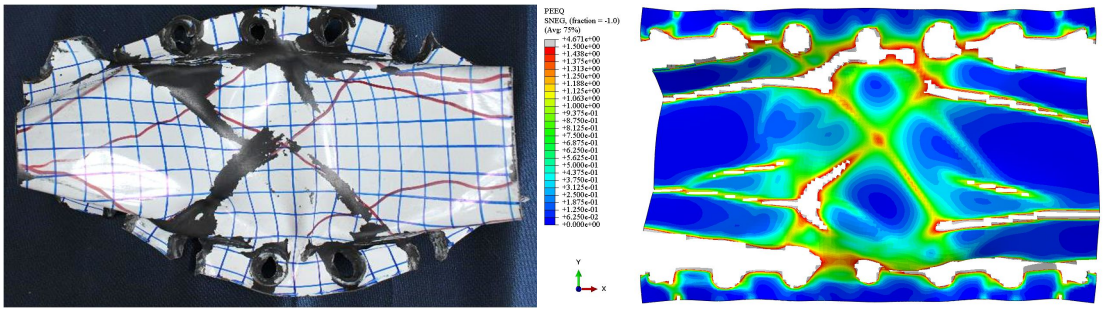
Şekillerden ve Tablo 3.9'dan görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 218.13 kN ve 221.59 kN, çekmede ise 213.08 kN ve 211.87 kN'dur. Bu durumda hem itmede hem de çekmede, deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen maksimum yük değerleri arasındaki %2'nin altındadır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen

maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 214.89 kN ve 216.79 kN, çekmede ise 210.65 kN ve 188.96 kN'dur. Bu durumda, itmede deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki fark yaklaşık olarak % 1.0'in altındadır. Çekmede ise deneysel olarak elde edilen yük değeri, sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerinden % 11.47 daha fazladır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede 218.13 kN ve 235.85 kN, çekmede ise 213.08 kN ve 232.16 kN'dur. Bu durumda, sayısal olarak itmede elde edilen maksimum yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 8.12 daha fazladır. Çekmede ise sayısal olarak elde edilen yük değeri, deneysel olarak elde edilen yük değerinden % 9 daha fazladır. Ayrıca Şekil 3.178 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9468).

S-ÇP-3 deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.176). Bu durum hem plaka üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ayrıca yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde, S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyici elemanlarından elde edilen sonuçlardan farklı olarak çevrimsel eğriler arasındaki fark oldukça azdır (bk. Şekil 3.176). Şekil 3.179'da, S-ÇP-3 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek olarak üç farklı yerdeğiştirme seviyesindeki (itme) görünümleri verilmiştir. Şekil 3.180'de ise tek bir çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi çelik plakaların farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş halleri ve nihai durumdaki hasar oluşumları birbiriyle uyumludur.



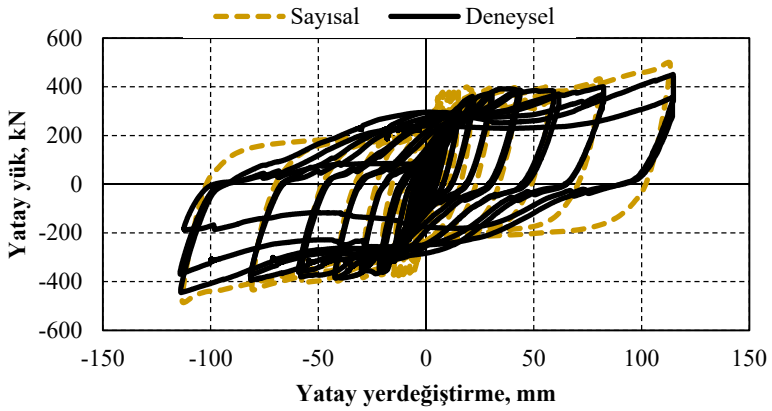
Şekil 3.179. S-ÇP-2 elemanının yatay yerdeğiştirmelere göre deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen şekildeğiştirmiş hallerine örnek görünümler



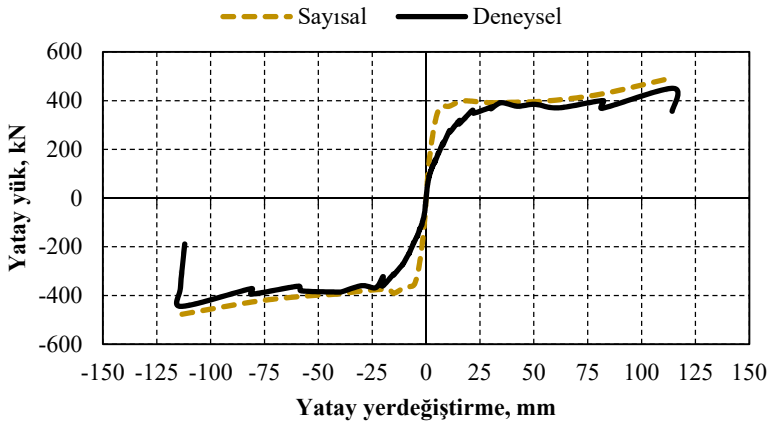
Şekil 3.180. Çelik plakanın deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri

3.4.10. İki Bileşenli ve Üç Bileşenli Enerji Sönümleyici (İBES ve ÜBES) Deney Elemanları

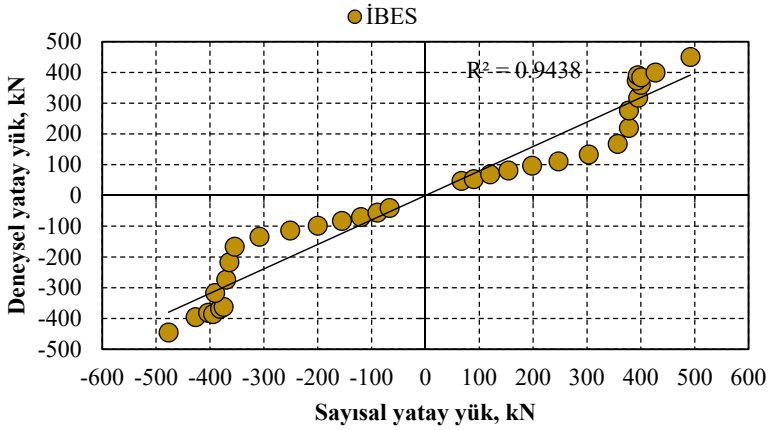
Kalınlığı 2.50 mm olan çelik plakaların ve çubuk yükseklik ortası çap değeri 16.0 mm olan kum saati şekilli dairesel enkesitli (KSDE) çelik çubukların birlikte kullanıldığı iki bileşenli enerji sönümleyici (İBES) elemanının sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi şekil 3.181'de, dayanım zarfı eğrisi şekil 3.182'de deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği Şekil 3.183'te, kümülatif enerji tüketiminin yerdeğiştirme adımına göre değişimini gösteren eğri Şekil 3.184'te ve rijitliğin yatay yerdeğiştirmelere göre değişimini gösteren eğri ise Şekil 3.185'te verilmiştir. Tablo 3.10'da ise elastik ötesi davranışın belirgin olduğu son on yerdeğiştirme adımında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri özetlenmiştir.



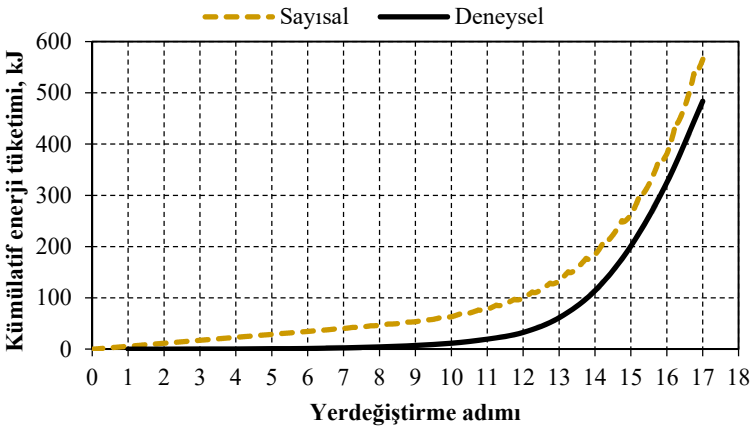
Şekil 3.181. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



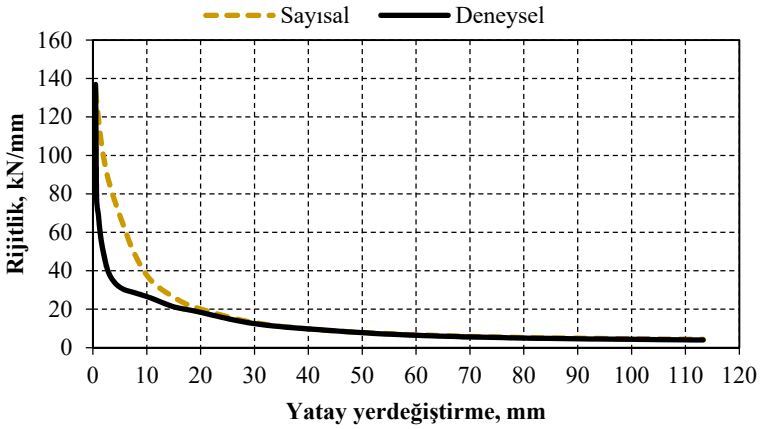
Şekil 3.182. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.183. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük değerlerinin ilişkisini gösteren saçılım grafiği



Şekil 3.184. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yerdeğiştirme adımı eğrileri



Şekil 3.185. Deneysel-sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme eğrileri

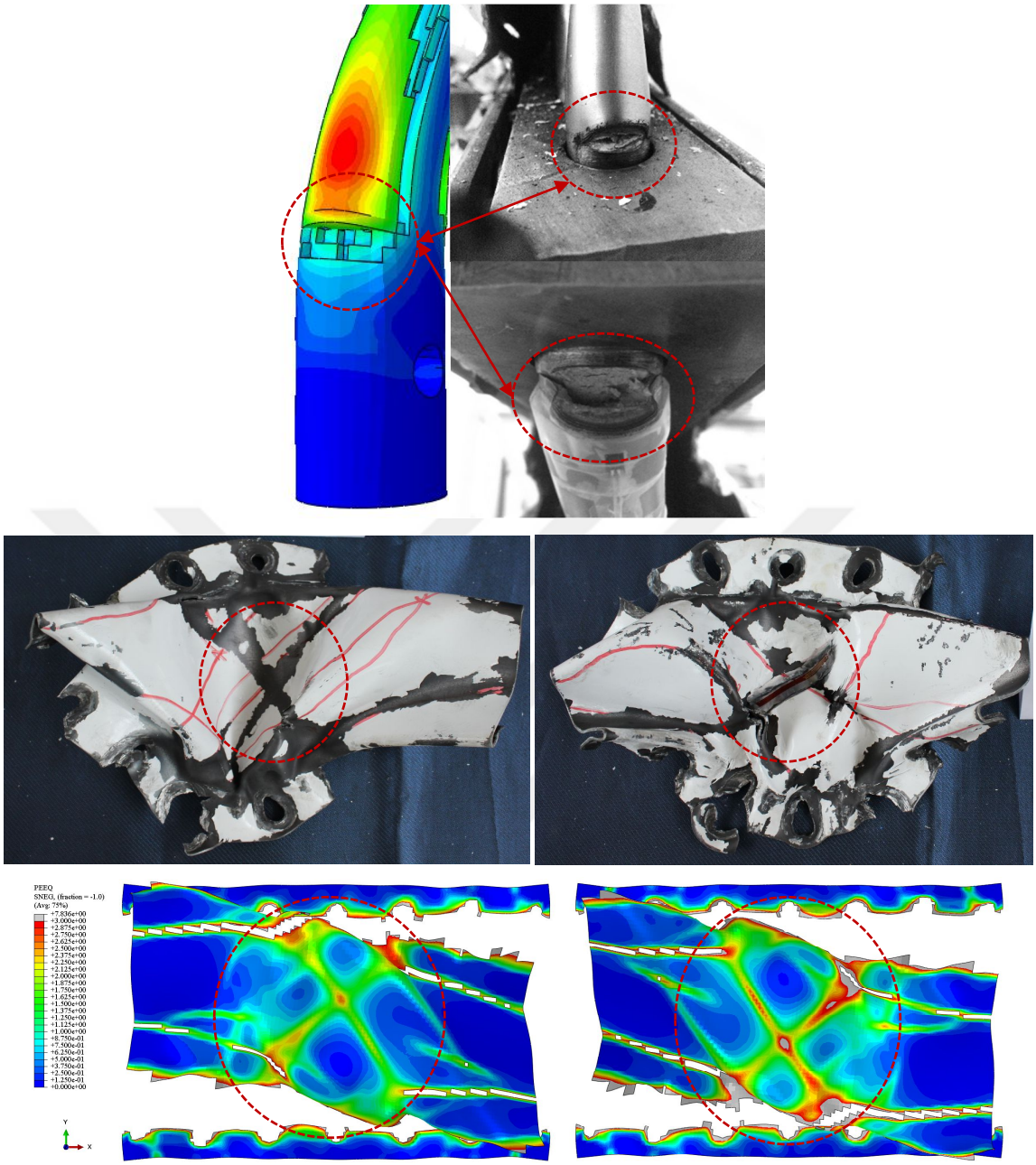
Tablo 3.10. Yerdeğiştirme adımlarında deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri (İBES)

Yerdeğiştirme Adımı	Yerdeğiştirme (mm)	Ötelenme Oranı (%)	Deneysel Yatay yük (kN)		Sayısal Yatay yük (kN)	
			İtme	Çekme	İtme	Çekme
10	10.7	1.0	276.94	273.0	377.51	370.04
11	15.0	1.4	318.80	316.30	394.87	390.50
12	21.10	**2.0**	360.44	361.30	399.45	374.77
13	29.50	2.8	374.18	367.55	392.16	381.24
14	41.30	3.9	391.64	385.14	394.01	394.26
15	57.80	5.4	384.90	380.63	400.50	403.47
16	80.90	7.6	400.19	394.90	426.91	426.80
17	113.30	10.6	450.75	444.85	492.10	477.02

Şekillerden ve Tablo 3.10'dan görüldüğü gibi, ötelenme oranının % 1.0 olması durumunda (≈10.70 mm) deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 276.94 kN ve 377.51 kN, çekmede ise 273.00 kN ve 370.04 kN'dur. Bu durumda itmede sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden %36.31 daha fazladır. Çekmede, itmedeki duruma benzer olarak sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden %35.54 daha fazladır. Ötelenme oranının % 2.0 olması durumunda (≈21.10 mm) ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla itmede 360.44 kN ve 399.45 kN, çekmede ise 361.30 kN ve 374.77 kN'dur. Bu durumda itmede sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri, deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden % 10.82 daha fazladır. Çekmede, itmedeki duruma benzer olarak sayısal çalışmadan elde edilen yük değeri deneysel çalışmadan elde edilen yük değerinden %3.72 daha fazladır. Nihai durumda ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri itmede yaklaşık olarak aynı iken, çekmede ise deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen maksimum yük değerleri arasındaki fark % 3.0'ün altındadır. Görüldüğü gibi yerdeğiştirmelerin artması ile deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük değerleri arasındaki farklar azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.183 incelendiğinde deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerlerinin birbirleriyle iyi derecede uyuştuğu görülmektedir (R^2=0.9438). Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ve yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir (Şekil 3.184 ve Şekil 3.185). Ancak sayısal ve deneysel olarak elde edilen nihai enerji

tüketim kapasiteleri arasında yaklaşık olarak % 11 fark oluşmuştur. İBES deney elemanının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin, sayısal çalışmalardan elde edilen eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir (bk. Şekil 3.181). Bu durum hem çubuk üretimlerinde kullanılan çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleşik pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir. Ancak yüklemenin itmeden çekmeye ya da çekmeden itmeye geçtiği bölgelerde S-KSDE ve S-KDE tipi elemanlara benzer olarak çevrimsel eğriler arasında bir miktar fark oluşmaktadır (bk. Şekil 3.181). Bu farkın ortaya çıkması, yerdeğiştirmelerin artmasıyla deney elemanının mesnet bölgelerindeki hasarların da kümülatif olarak artması ve deney düzeneğindeki mafsal boşluklarının mevcudiyeti ile yakından ilişkilidir. Söz konusu durumun oluşmasının diğer bir sebebi ise deneysel çalışmlarda yüklemeyi oluşturmak için kullanılan güç ünitesinin yukarıda bahsedilen yükleme yönü değişimine hızlı bir şekilde cevap verememesidir. Bu iki temel etken, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki dar bir bölgede farkın oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.186'da, İBES elemanının ana parçaları olan çelik çubuk ve plakaların deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgesindeki hasar oluşumları, sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumludur.

ÜBES elemanı üzerinde de İBES elemanına benzer olarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma sonucunda elde edilen yük değerleri ile İBES elemanından elde edilen yük değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Bu durum, ÜBES elemanındaki poliüretan elastomer malzeme özelliklerinin sayısal modele yansıtılamadığını göstermektedir.



Şekil 3.186. İBES elemanının ana parçaları olan çelik çubuk ve plakaların deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen hasarların görünümleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapı sistemlerini depremin yıkıcı etkilerinden korumak amacıyla pasif kontrol sistemlerinden olan yenilikçi metalik sönümleyiciler geliştirilmiş ve söz konusu elemanlar üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmalardan elde edilen başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- Çalışma kapsamında üretilen tüm sönümleyiciler, çevrimsel yükleme altında, bu tür elemandan beklenen simetrik bir çevrimsel yük-yerdeğiştirme davranışı göstermişlerdir.
- S-ÇP tipi elemanlar dışındaki tüm sönümleyicilerde çeliğin pekleşmesi nedeniyle dayanım artışı meydana gelmiştir. Bu pekleşme davranışı, yapı sisteminde katlar arası yumuşak kat vb. nedenlerle ötelenme yığılmaları oluşması durumunda, söz konusu deney elemanlarının etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. S-ÇP tipi sönümleyici deney elemanlarında ise burkulma davranışı nedeniyle önemli bir pekleşme davranışı oluşmamıştır.
- Hem kum saati şekilli çubukların hem de konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında çubuk yükseklik ortası çap değerinin artması ile akma yükü de artmıştır.
- Kum saati şekilli çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının akma yükü, konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarının akma yükünden daha fazla olarak elde edilmiştir. Bu durum, yatay yük etkisinde eleman boyunca şekildeğiştirmelerin homojen ve eş zamanlı olarak oluşmasını sağlayan kum saati şekilli çubuk formunun akma dayanımını artırdığını göstermektedir.
- Kum saati şekilli çelik çubukların kullanıldığı deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri, çubuk yükseklik ortası çap değerinin artması ile artmıştır. Ancak sadece konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında çubuk yükseklik ortası çap değerinin artması nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde etkisi olmamıştır.
- Aynı çubuk yükseklik ortası çap değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının nihai yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde S-KSDE tipi sönümleyicilerin, S-KDE tipi sönümleyicilerden daha fazla yük taşıdığı görülmüştür.

- S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyicilerin tümünde çubuk geometrisinden ve çubuk yükseklik ortası çap değerinden bağımsız olarak %7.0 ile %8.0 kat ötelenme oranları arasında, çelik çubukların mesnet bölgelerinde hasar oluşumları gözlemlenmiştir. Ancak söz konusu hasar oluşumları önemli dayanım azalmalarına neden olmamıştır.
- Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, hem elastik burkulma yükü hem de nihai yük taşıma kapasitesi plaka kalınlığının artması ile artmıştır.
- Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının söz konusu elemanlardaki hasar oluşumları üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Plaka kalınlığının 1.50 ve 2.00 mm olduğu elemanlarda hasarlar mesnet bölgelerinde ve plaka gövdesinde yoğunlaşmış ("X" şeklinde yırtılma) plaka kalınlığının 2.50 mm olması durumunda ise hasarlar sadece mesnet bölgelerinde yoğunlaşmıştır.
- İBES ve ÜBES deney elemanlarının elastik burkulma yükleri arasındaki fark %5'in altındadır. Ancak, ÜBES elemanındaki poliüretan elastomer dolgu ile çelik plakalar arasında oluşan bağlanma yüzeylerinin elastik burkulma yüküne az da olsa bir katkı sağladığı gözlemlenmiştir.
- Yatay yerdeğiştirmenin artması ile İBES ve ÜBES elemanlarının yük taşıma kapasiteleri arasındaki fark da artmıştır. ÜBES elemanındaki iki plaka arasına dökülen ve çelik çubuklarının yüzeyinin kaplanması ile oluşturulan poliüretan elastomer dolgunun, çelik çubukları sararak çubuklarda düşey yüklemelerden dolayı oluşan düzlem dışı hareketleri önlemesi ile yaklaşık olarak % 36 dayanım artışı sağlamıştır.
- Kum saati ve konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında, çubuk yükseklik ortası çap değerlerinin artması ile başlangıç rijitlikleri de artmıştır. Söz konusu bu artış, konik şekilli deney elemanlarında daha belirgindir.
- Aynı çubuk yükseklik ortası çap değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri incelendiğinde S-KSDE tipi sönümleyici elemanların, S-KDE tipi elemanlardan daha rijit davrandığı görülmektedir.
- S-KSDE tipi sönümleyici elemanların nihai rijitlikleri, çubuk yükseklik ortası çap değerlerinin büyümesi ile artmıştır. Ancak S-KDE tipi elemanlarda nihai

rijitlik değerleri arasındaki fark çubuk yükseklik ortası çap değerlerinin artması ile değişmemiştir.

- Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının artması ile hem başlangıç rijitlikleri hem de nihai rijitlikler artmıştır.
- İBES ve ÜBES deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum ÜBES elemanındaki poliüretan elastomer dolgunun, elemanın başlangıç rijitliği üzerinde etkisi olmadığını göstermiştir.
- Yatay yerdeğiştirmenin artması ile İBES ve ÜBES elemanlarının rijitlikleri arasındaki fark da artmıştır. ÜBES elemanındaki poliüretan elastomer dolgunun, çelik çubukları sararak çubuklarda düşey yüklemelerden dolayı oluşması muhtemel düzlem dışı hareketleri önlemesi ile nihai durumdaki rijitliğe %17 katkı sağlamıştır.
- Kum saati ve konik şekilli çubukların kullanıldığı deney elemanlarında, çubuk yükseklik ortası çap değerlerinin artması ile enerji tüketim miktarları da artmıştır.
- Aynı çubuk yükseklik ortası çap değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının nihai enerji tüketme kapasiteleri incelendiğinde S-KSDE tipi elemanlar, S-KDE tipi elemanlara kıyasla daha fazla enerji tüketmişlerdir. KSDE çelik çubuklarda, şekildeğiştirmelerin eleman buyunca homojen dağılmasını sağlayan geometrik özelliklerinin enerji tüketim kapasitesine katkı sağladığı anlaşılmaktadır.
- Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının artması ile enerji tüketim kapasiteleri de artmıştır.
- Yatay yerdeğiştirmenin artması ile İBES ve ÜBES elemanlarının enerji tüketim miktarları arasındaki fark da artmıştır. ÜBES elemanındaki üretan elastomer kauçuk dolgunun, çelik çubukları sararak çubuklarda düşey yüklemelerden dolayı oluşması muhtemel düzlem dışı hareketleri önlemesi ile yaklaşık olarak % 9 katkı sağlamıştır. Ayrıca söz konusu elemanın daha kararlı enerji tüketimi davranışı sergilemesine yardımcı olmuştur.
- S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyici elemanlarda çubuk yükseklik ortası çap değerindeki artışın, eşdeğer viskoz sönüm oranı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

- Aynı çubuk yükseklik ortası çap değerlerine sahip fakat farklı geometrik özellikleri olan deney elemanlarının nihai eşdeğer viskoz sönüm oranları incelendiğinde S-KSDE tipi sönümleyici elemanlar, S-KDE tipi elemanlara kıyasla daha kararlı davranış sergilediği anlaşılmaktadır.
- Çalışma kapsamında geliştirilen tüm deney elemanları, EN 15129 (2010)'da önerilen bir sönümleyici sistemden beklenen % 15 sönüm oranı alt limitinin üstünde bir sönüm oranına sahiptirler. En yüksek sönüm oranı ise yaklaşık olarak % 48 ile ÜBES elemanından elde edilmiştir.
- Sadece çelik plakaların kullanıldığı deney elemanlarında, plaka kalınlığının maksimum eşdeğer viskoz sönüm oranları üzerinde etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmektedir.
- ÜBES elemanının hem maksimum hem de nihai durumdaki eşdeğer viskoz sönüm oranı İBES deney elemanından yaklaşık % 7 daha yüksek ve kararlı bir sönüm davranışı sergilemiştir. Söz konusu kararlı davranışın, poliüretan elastomer dolgunun katkısı olduğu anlaşılmaktadır.
- S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyici elemanlardan elde edilen maksimum eşdeğer viskoz sönüm oranları ile KSDE çelik çubuklar ile çelik plakaların beraber kullanıldığı İBES deney elemanının maksimum eşdeğer viskoz sönüm oranı yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, İBES deney elemanında kullanılan çelik plakaların, söz konusu elemana sönüm oranı bakımından herhangi bir katkı sağlamadığını göstermektedir.
- S-KSDE, S-KDE, S-ÇP ve İBES tipi elemanların, deneysel ve sayısal olarak her bir yerdeğiştirme adımında elde edilen maksimum yük değerleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir ($R^2 \approx 1$). Ayrıca yük değerlerine benzer olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen rijitlik-yatay yerdeğiştirme ilişkisi ile yerdeğiştirme adımı-kümülatif enerji tüketimi ilişkisi eğrileri de birbirleriyle uyum içindedir.
- S-KSDE, S-KDE, S-ÇP ve İBES deney elemanlarının çevrimsel yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri, sayısal çalışmalardan elde edilen eğriler ile uyumludur. Bu durum hem çeliğin çevrimsel yüklemeler etkisinde ortaya koyduğu mekanik davranışını birleştirilmiş pekleşme modelinin (combined hardening model) iyi temsil ettiğini hem de deney elemanının sayısal modeli

oluşturulurken, yükleme ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlandığını göstermektedir.

- S-KSDE, S-KDE, S-ÇP ve İBES deney elemanlarının farklı yerdeğiştirme seviyelerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen çelik çubukların şekildeğiştirmiş halleri ile nihai durumda mesnet bölgelerindeki hasar oluşumlarının, sayısal çalışmalardan elde edilen görüntüler ile uyumlu olduğu görülmüştür.
- ÜBES elemanı üzerinde de İBES elemanına benzer olarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma sonucunda elde edilen yük değerleri ile İBES elemanından elde edilen yük değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Bu durum, ÜBES elemanındaki poliüretan elastomer malzeme özelliklerinin sayısal modele yansıtılamadığını göstermektedir.
- Önerilen modüler sönümleyici tasarımı ile kaynaklı bağlantı detayı içeren ya da yekpare olarak üretilen tasarımlardan farklı olarak sönümleyiciyi oluşturan parçaların üretilebilirliği ve montajı daha kolay bir hale gelmektedir. Söz konusu modüler tasarımın bu özgünlüğü; farklı geometrik özellikte ve/veya malzemelerden üretilmiş çubukların birlikte kullanımına imkân sağlamaktadır.
- Bu çalışmada S-KSDE ve S-KDE tipi sönümleyici elemanlarda çubuk yüksekliği sabittir. Sönümleyicilerde kullanılan söz konusu çubuk yüksekliğinin eleman içerisinde değişkenlik göstermesine imkân sağlayan eleman tasarımları da yapılabilir.
- Çelik plakaların kullanıldığı, S-ÇP, İBES ve ÜBES elemanlarında plakalar dikdörtgen geometriye sahiptir. Ancak, çelik çubuklarda eleman yüksekliği boyunca şekildeğiştirmelerin homojen olarak dağılımını sağlamak amacıyla yapılan optimum form belirleme işlemine benzer şekilde, optimum plaka geometrisi de belirlenerek kullanılan plakaların (boşluklu yada boşluksuz) etkinliği artırılabilir.
- Çelik plakalar farklı geometrilerde üretilerek, poliüretan elastomer dolgu içerisine gömülmesi ile plakanın burkulma davranışını sınırlandıran farklı tasarımlar ile plaka davranışı iyileştirilebilir.
- ÜBES deney elemanı farklı sertlik değerlerine sahip poliüretan elastomer malzeme kullanılarak yapılacak deneysel çalışmalarla, söz konusu malzemenin

sönümleyici elemanının çevrimsel davranışı üzerindeki etkisi daha iyi anlaşılabilir.

- Sadece çelik plakaların kullanıldığı elemanlar dışındaki sönümleyici tasarımları gerekli değişiklikler yapılarak ters V çaprazlı çerçeveler dışında farklı çapraz düzenli çerçeve sitemlere ve betonarme yapılara da uygulanabilir.
- Çalışma kapsamında geliştirilen modüler sönümleyici tasarımı çok katlı farklı yapı sistemlerine uygulanarak, sarsma masası testleri gerçekleştirilerek etkinlikleri araştırılabilir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen tüm sönümleyiciler, bu tür elemanlardan beklenen davranışı göstermiştir. Özellikle, ÜBES sönümleyici elemanı diğer sönümleyiciler göre; nihai yük taşıma kapasitesi, kararlı rijitlik azalım davranışı, kümülatif enerji tüketimi ve eşdeğer viskoz sönüm oranı değerlendirme kriterlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla söz konusu enerji sönümleyici elemanın yapı sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

5. KAYNAKLAR

ABAQUS, S., 2017. Dassault Systemes, Providence, RI, USA.

ABAQUS, A., 2016. Theory and User–S Manuals, Dassault Systems, USA.

Ashraf, M., Gardner, L. ve Nethercot, D.A., 2006. Finite Element Modelling of Structural Stainless Steel Cross-Sections, Thin-Walled Structures, 44, 10, 1048-1062.

Aiken, I.D., Kelly, J.M. ve Pall, A.S., 1988. Seismic Response of A Nine-Story Steel Frame with Friction Damped Cross-Bracing. In Proceedings, Ninth World Conference On Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, Japan.

Aiken, I.D. ve Kelly, J.M., 1990. Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy Absorbing System for Multistorey Structures, Report No.UBC/EERC-90/03, Earthquake Engineering Research Center, Univesity of California at Berkeley, Berkekey.

Aiken, I.D., Nims, D.K. ve Kelly, J.M., 1992. Comparative Study of Four Passive Energy Dissipation Systems, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 25, 3, 175-192.

Aktas, M., 2004. Minor Axis Flexure and Combined Loading Response of I-Shaped Steel Members, Doktora Tezi, Pittsburgh Üniversitesi, USA.

Applied Technology Council, 2007. Mid-America Earthquake Center, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (US), Pacific Earthquake Engineering Research Center, United States. Federal Emergency Management Agency, & National Earthquake Hazards Reduction Program (US), Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components. Federal Emergency Management Agency.

Armstrong, P.J. ve Frederick, C.O., 1966. A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect, Berkeley: Central Electricity Generating Board-Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department, 731.

ASTM, 2005. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness, ASTM D2240.

ASTM D395-14, 2014. Standard Test Methods for Rubber Property–Compression Set.

ASTM D412, 2006. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers–Tension, ASTM Book of Standards.

ASTM I, 2012. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM A370.

Benavent-Climent, A., 2010. A Brace-Type Seismic Damper Based on Yielding the Walls of Hollow Structural Sections, Engineering Structures, 32, 4, 1113-1122.

Benavent-Climent, A., Morillas, L. ve Vico, J.M., 2011. A Study on Using Wide-Flange Section Web under Out-Of-Plane Flexure for Passive Energy Dissipation, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 40, 5, 473-490.

Bergman, D.M. ve Goel, S.C., 1987. Evaluation of Cyclic Testing of Steel Plate Devices for Added Damping and Stiffness, Report No. UMCE87-10, Ann Arbor (MI, USA): The University of Michigan.

Black, C.J., Makris, N. ve Aiken, I.D., 2004. Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-Restrained Braces, Journal of Structural Engineering, 130, 6, 880-894.

Briones, B. ve De La Llera, J.C., 2014. Analysis, Design and Testing of An Hourglass-Shaped Copper Energy Dissipation Device, Engineering Structures, 79, 309-321.

Casciati, F., Faravelli, L. ve Petrini, L., 1998. Energy Dissipation in Shape Memory Alloy Devices, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 13, 6, 433-442.

Castaldo, P., 2014. Passive Energy Dissipation Devices, Integrated Seismic Design of Structure and Control Systems, 21-62.

Celep, Z., 2011. Yapı Dinamiği, Dördüncü Baskı, Beta Basım Yayım, İstanbul.

Chaboche, J.L., 1986. Time-independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity, International Journal of Plasticity, 2, 2, 149-188.

Chan, R. W. ve Albermani, F., 2008. Experimental Study of Steel Slit Damper gor Passive Energy Dissipation, Engineering Structures, 30, 4, 1058-1066.

Chan, R.W., Albermani, F. ve Williams, M.S., 2009. Evaluation of Yielding Shear Panel Device for Passive Energy Dissipation, Journal of Constructional Steel Research, 65, 2, 260-268.

Christenson, R.E., Spencer-Jr, B.F. ve Johnson, E.A., 1999. Coupled Building Control Using Active and Smart Damping Strategies, Optimization and Control in Civil and Structural Engineering, 187-195.

Ciampi, V. ve Ferretti, A.S., 1990. Energy Dissipation in Buildings Using Special Bracing Systems. Proceedings of the 10th International Earthquake Conference.

Ciampi, V., De Angelis, M. ve Paolacci, F., 1993. On the Seismic Design of Dissipative Bracings for Seismic Protection of Structures. 2nd European Conference on Struc. Dyn. 153-160.

Ciampi, V., 1995. Research and Development of Passive Energy Dissipation Techniques For Civil Buildings in Italy. International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passiver Energy Dissipation and Control of Vibration of Structures, 1-15.

Clark, P.W., Aiken, I.D., Kasai, K. ve Kimura, I., 2000. Large-Scale Testing of Steel Unbonded Braces for Energy Dissipation, Advanced Technology in Structural Engineering, 1-5.

Constantinou, M.C., Symans, M.D., Tsopelas, P. ve Taylor, D.P., 1993. Fluid Viscous Dampers in Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation, Proceedings ATC 17, 1, 581-592.

Constantinou, M.C., 1994. Principles of Friction, Viscoelastic, Yielding Steel and Fluid Viscous DAMPERS: Properties and Design, In Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, 209-240.

Demir, S., Testere Tipi Sismik Enerji Sönümleyicilerin Tasarımı ve Çevrimsel Yük Etkisindeki Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2018.

Den Hartog, J. P., 1956. Mechanical Vibrations. New York: Mcgrraw Hill Nook Company. Inc.

Deng, K., Pan, P., Li, W. ve Xue, Y., 2015. Development of A Buckling Restrained Shear Panel Damper, Journal of Constructional Steel Research, 106, 311-321.

FEMA, 2007. Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing. FEMA 461.

Frahm, H., 1911. U.S. Patent No. 989,958. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Garivani, S., Aghakouchak, A.A. ve Shahbeyk, S., 2016. Numerical and Experimental Study of Comb-Teeth Metallic Yielding Dampers, International Journal of Steel Structures, 16, 1, 177-196.

Geschwindner, L.F., Disque, R.O. ve Bjorhovde, R. 1994. Load and Resistance Factor Design of Steel Structures. Prentice Hall.

Ghaedi, K. ve Ibrahim, Z., 2018. A new metallic bar damper device for seismic energy dissipation of civil structures. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 431, 12, 122009.

Guerrero, H., Ji, T. ve Escobar, J.A., 2016. Experimental Studies of A Steel Frame Model With and Without Buckling-Restrained Braces, Ingeniería Sísmica, 95, 33-52.

Guo, T., Xu, J., Xu, W. ve Di, Z., 2014. Seismic Upgrade of Existing Buildings with Fluid Viscous Dampers: Design Methodologies and Case Study, Journal of Performance of Constructed Facilities, 29, 6, 04014175.

Hsu, H.L. ve Halim, H., 2017. Improving Seismic Performance of Framed Structures with Steel Curved Dampers, Engineering Structures, 130, 99-111.

Iwata, M. ve Murai, M., 2006. Buckling-Restrained Brace Using Steel Mortar Planks; Performance Evaluation as A Hysteretic Damper, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 35, 14, 1807-1826.

Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Ghadim, H.B., ve Hanif, M.U., 2019. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation Archives of Computational Methods in Engineering, 1-24.

Jia, L. J. ve Kuwamura, H., 2013. Prediction of Cyclic Behaviors of Mild Steel at Large Plastic Strain Using Coupon Test Results, Journal of Structural Engineering, 140, 2, 04013056.

Kelly, J.M., Skinner, R.I. ve Heine, A.J., 1972. Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures, Bulletin of NZ Society for Earthquake Engineering, 5, 3, 63-88.

Lee, D. ve Taylor, D.P., 2001. Viscous Damper Development and Future Trends, Structural Design of Tall Buildings, 10, 311-320.

Lee, C.H., Lho, S.H., Kim, D.H., Oh, J. ve Ju, Y.K., 2016. Hourglass-Shaped Strip Damper Subjected to Monotonic and Cyclic Loadings, Engineering Structures, 119, 122-134.

Lee, C.H., Ryu, J., Oh, J., Yoo, C.H. ve Ju, Y.K., 2016. Friction between A New Low-Steel Composite Material And Milled Steel for SAFE Dampers, Engineering Structures, 122, 279-295.

Lemaitre, J. ve Chaboche, J.L., 1990. Mechanics of Solid Mechanics, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom, 161-241.

Li, G. ve Li, H., 2008. Earthquake-Resistant Design of RC Frame with 'Dual Functions' Metallic Dampers. In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Liao, W.I., Mualla, I. ve Loh, C.H., 2004. Shaking-Table Test of A Friction-Damped Frame Structure, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 13, 1, 45-54.

Lobo, R.F., Bracci, J.M., Shen, K.L., Reinhorn, A.M. ve Soong, T.T., 1993. Inelastic Response of R/C Structures with Viscoelastic Braces, Earthquake Spectra, 9, 3, 419-446.

Maleki, S. ve Bagheri, S., 2010. Pipe Damper, Part I: Experimental and Analytical Study, Journal of Constructional Steel Research, 66, 8-9, 1088-1095.

Maleki S. ve Mahjoubi, S., 2013. Dual-Pipe Damper, Journal of Constructional Steel Research, 85, 81–91.

Maleki S. ve Mahjoubi, S., 2014. Infilled-Pipe Damper, Journal of Constructional Steel Research, 98, 45–58.

Merritt, S., Uang, C.M. ve Benzoni, G., 2003. Subassemblage Testing of Star Seismic Buckling-Restrained Braces, Rep. No. TR-2003, 4.

Milani, A.S., 2014. Torsional Hysteretic Damper for Seismic Protection of Structures, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

Mohammadi, R.K., Nasri, A. ve Ghaffary, A., 2017. TADAS Dampers in Very Large Deformations, International Journal of Steel Structures, 17, 2, 515-524.

Mualla I., Nielsen L.O., 2000. Parameters Influencing the Behavior of A New Friction Damper Device, Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark; 49–58.

Naeem, A., Lee, M. ve Kim, J., 2015. Steel Honeycomb Dampers for Seismic Retrofit of Structures, International Conference on Environment and Civil Engineering (ICEACE'2015), April 24-25, Pattaya, Thailand.

Naeim, F. ve Kelly, J.M., 1999. Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice, John Wiley & Sons.

Nakashima, M., Iwai, S., Iwata, M., Takeuchi, T., Konomi, S., Akazawa, T. ve Saburi, K., 1994. Energy Dissipation Behaviour of Shear Panels Made of Low Yield Steel, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 23, 12, 1299-1313.

Nims, D.K., 1993. Large-Scale Experimental Studies of Two Alternate Support Systems for the Seismic Restraint of Piping.

Ormondroyd, J., 1928. The theory of the dynamic vibration absorber. Trans., ASME, Applied Mechanics, 50, 9-22.

Özkaynak, H., 2017. Model proposal for steel cushions for use in Reinforced Concrete frames. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 7, 2717-2727.

Pall, A.S. ve Marsh, C., 1982. Response of Friction Damped Braced Frames, Journal of Structural Engineering, 108, 9, 1313-1323.

Patil, S.J. ve Reddy, G.R., 2012. State of Art Review-Base Isolation Systems for Structures International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2, 7, 438-453.

Rai, D.C., Annam, P.K. ve Pradhan, T., 2013. Seismic Testing of Steel Braced Frames with Aluminum Shear Yielding Dampers, Engineering Structures, 46, 737-747.

Randall, S., Halsted, D. ve Taylor, D., 1978. Optimum vibration absorbers for linear damped systems. Transaction of the ASME, 130, 908–913.

Richter, P.J., Nims, D.K., Kelly, J.M. ve Kallenbach, R.M., 1990. The EDR-Energy Dissipating Restraint, A New Device for Mitigation of Seismic Effects, In Proceedings of the 1990 SEAOC Convention, 1, 377-401.

Sabelli, R., Mahin, S. ve Chang, C., 2003. Seismic Demands on Steel Braced Frame Buildings with Buckling-Restrained Braces, Engineering Structures, 25, 5, 655-666.

Saeedi, F., Shabakhty, N. ve Mousavi, S.R., 2016. Seismic Assessment of Steel Frames with Triangular-Plate Added Damping and Stiffness Devices, Journal of Constructional Steel Research, 125, 15-25.

Sahoo, D.R., Singhal, T., Taraithia, S.S. ve Saini, A., 2015. Cyclic Behavior of Shear-and-Flexural Yielding Metallic Dampers, Journal of Constructional Steel Research, 114, 247-257.

Sakamoto, M. ve Kobori, T., 1995. Research, Development and Practical Applications on Structural Response Control of Buildings, Smart Materials and Structures, 4, 1A, A58.

Sepúlveda, J., Boroschek, R., Herrera, R., Moroni, O. ve Sarrazin, M., 2008. Steel Beam-Column Connection Using Copper-Based Shape Memory Alloy Dampers, Journal of Constructional Steel Research, 64, 4, 429-435.

Skinner, R.I., Kelly, J.M., ve Heine, A.J., 1974. Hysteretic Dampers for Earthquake-Resistant Structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 3, 3, 287-296.

Skinner, R.I., Robinson, W.H. ve McVerry, G.H., 1993. An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons.

Soong, T.T. ve Dargush, G.F., 1997. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, Wiley; First Edition, state University of New York at Buffalo, USA.

Soong, T.T., ve Dargush, G.F., 1999. Passive Energy Dissipation and Active Control, Structural Engineering Handbook.

Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W. ve McNamara, R.J., 2008. Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, Journal of Structural Engineering, 134, 1, 3-21.

Takai, H., Uno, T. ve Nagai, K., 1988. Study on the Friction Damper as the Device of A Base Isolation System, In Proc., 9th WCEE, 5, 803-807.

Takewaki, I., 2011. Building Control with Passive Dampers: Optimal Performance-Based Design for Earthquakes, John Wiley & Sons.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, TSE, Ankara.

Thomas, S. ve Earls, C.J., 2003. Cross Sectional Compactness and Bracing Requirements for HPS483W Girders, Journal of Structural Engineering, 129, 12, 1569-1583.

Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. ve Su, Y.F., 1993. Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, Earthquake Spectra, 9, 3, 505-528.

Tsai, H. C., ve Lin, G. C., 1993. Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems. Earthquake engineering & structural dynamics, 22, 957-973.

Tyler, R.G., 1985. Test on a Brake Lining Damper for Structures, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 18, 3, 280-284.

Uang, C.M. ve Bertero, V.V., 1990. Evaluation of Seismic Energy in Structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 19, 1, 77-90.

UNI, E. 15129: 2010. Anti-seismic devices, 38-44.

Wakabayashi, M., Nakamura, T., Kashibara, A., Morizono, T. ve Yokoyama, H., 1973. Experimental Study of Elasto-Plastic Properties of Precast Concrete Wall Panels with Built-in Insulating Braces, In Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 104121044, 12-20.

Wang, Y.P. ve Chien, C.S.C., 2009. A Study on Using Pre-Bent Steel Strips As Seismic Energy-Dissipative Devices, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 38, 8, 1009-1026.

Warburton, G., 1981. Optimum absorber parameters for minimizing vibration response. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 9, 3, 251–262.

Warburton, G., 1982. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 10, 3, 381–401.

Warburton, G. ve Ayorinde, E., 1980. Optimum absorber parameters for simple systems. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 8, 3, 197–217.

Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A. ve Fujimoto, M., 1988. Properties of Brace Encased in Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube, in Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, 4, 719-724.

Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L. ve Alonso, L.J., 1991. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices, Earthquake Spectra, 7, 4, 563-604.

Xia, C., 1992. A Study of ADAS Element Parameters and Their Influence on Earthquake Response of Building Structures.

Xie, Q., 2005. State of the Art of Buckling-Restrained Braces in Asia, Journal of Constructional Steel Research, 61, 6, 727-748.

Yoshino, T. ve Karino, Y., 1971. Experimental Study on Shear Wall with Braces: Part 2. In Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 11, 403-404.

Zhang, Y. ve Zhu, S., 2007. A Shape Memory Alloy-Based Reusable Hysteretic Damper for Seismic Hazard Mitigation, Smart Materials and Structures, 16, 5, 1603.

Zhao, J., Wu, B. ve Ou, J., 2011. A Novel Type of Angle Steel Buckling-Restrained Brace: Cyclic Behavior and Failure Mechanism, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 40, 10, 1083-1102.

URL-1, http://www.eqclearinghouse.org/

URL-2,https://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/product.html 30 Mart 2018

URL-3, http://www.kobori-takken.co.jp/English/randd/ctrl41.html. 30 Mart 2018

URL-4, https://www.damptech.com/.30 Mart 2018

URL-5, https://www.taylordevices.com/.30 Mart 2018

ÖZGEÇMİŞ

Süleyman İstemihan COŞĞUN 1990 yılında Erzincan'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Erzincan'da tamamladıktan sonra 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Kısa bir süre özel sektörde İnşaat Mühendisi olarak çalıştıktan sonra Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalara başladı. 2014 yılında KTÜ'de "Betonarme Plakların Darbe Yükü Etkisindeki Davranışlarının Sayısal Olarak İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezini tamamladı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2018 yılında doktora tezi kapsamında geliştirdiği sönümleyici sistem için Türk Patent Enstitüsüne patent ve tasarım tescili başvurularında bulundu (Patent başvuru no: 2018/20466) ve 19.04.2019 tarihinde tasarım tescil belgesini almaya hak kazandı (Tasarım tescil no: 2019 02689). Evli olan Süleyman İstemihan COŞĞUN İngilizce bilmektedir.

SCI/SCIE kapsamındaki dergilerde yayınlanmış makaleleri:

1. Husem, M. ve **Cosgun, S. I**. 2016. Behavior of reinforced concrete plates under impact loading: different support conditions and sizes. Computers and Concrete, 18(3), 389-404.

2. Husem, M., Demir, S., Park, H. G. ve **Cosgun, S. I.** 2016. Diagonal bracing of steel frames with multi-cable arrangements. Structural Engineering and Mechanics, 59(6), 1121-1137.

3. Husem, M., **Cosgun, S. I.** ve Sesli, H. 2018. Finite element analysis of RC walls with different geometries under impact loading. Computers and Concrete, 21(5), 583-592.