T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SİSMİK PERFORMANSI DÜŞÜK BETONARME ÇERÇEVELERDE SÜRTÜNME DAMPERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK İNCELENMESİ

Ensar SUCİ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ensar SUCİ tarafından hazırlanan "**Sismik Performansı Düşük Betonarme Çerçevelerde Sürtünme Damperinin Deneysel ve Analitik İncelenmesi**" adlı tez çalışması 25/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Fuat DEMİR	……..
Danışman Dr. Öğr. Üyesi Nail KARA	……..
Üye Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN	……..
Üye Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı tarafından 2016-ÖYP-077 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ensar SUCİ

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SİSMİK PERFORMANSI DÜŞÜK BETONARME ÇERÇEVELERDE SÜRTÜNME DAMPERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK İNCELENMESİ

Ensar SUCİ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nail KARA

2023, 354 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Fuat DEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Nail KARA
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

İnşaat mühendisliği gelişmeleri açısından, deprem etkilerini azaltma yöntemleri hızla gelişen yeni bir bina rehabilitasyon konseptidir. Bu konsepte göre yapılara etkiyen deprem enerjisinin bir kısmı ilave sönümleyici kontrol mekanizmaları ile tüketilmekte, böylece binada hasar ile tüketilmesi gereken enerji miktarı azalmaktadır. Rotasyonel sürtünme sönümleyiciler, büyük enerji dağıtma kapasiteleri, deplasman ve frekanstan bağımsız çalışma özellikleri ile dikkat çeken pasif kontrol mekanizmalarından biridir.

Bu tezde, özellikle Türkiye'deki bina stoğunda çok karşılaşılan sismik performansı düşük, az katlı betonarme çerçeve binaların rotasyonel sürtünme sönümleyiciler ile rehabilitasyonu üzerine deneysel ve analitik bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel ve analitik çalışmalar, ülkemizdeki binalarda sıklıkla görülen tasarım ve yapım kusurları sahip olan, 1/3 ölçekli, iki katlı ve tek açıklıklı betonarme çerçeveler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması iki ana araştırma konusu içermektedir.

Tez çalışmasının ilk kısmında, tasarlanan iki farklı tip rotasyonel sürtünme sönümleyicide kullanılması düşünülen Teflon (PTFE), karbonfiber, kurşun ve pirinç levhalardan üretilmiş sürtünme pedlerinin farklı cıvata sıkma torklarında çevrimsel yükleme deneyleri yapılarak, Fema-356'da belirlenen sönümleyici kriterlerine göre kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Sürtünme davranışı, aşınma, kararlılık, direnç gibi özellikler açısından kullanımı uygun görülen karbonfiber, kurşun ve pirinç sürtünme pedleri ile 100 Nm cıvata sıkma torkunda 3'er adet, tek üniteli Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyici üretilmiştir. Üretilen Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerin kayma yükü, enerji tüketimi gibi özellikleri çevrimsel yükleme deneyleriyle belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci kısmında, 1 adet yalın betonarme çerçeve referans numune olmak üzere, 3 adedi Tip 1 sönümleyici ile, 3 adedi de Tip 2 sönümleyici ile rehabilite edilmiş 7 adet betonarme çerçeve numune üretilerek statik itme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar rijitlik, süneklik ve enerji tüketimi açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın analitik kısmında ise, deneysel çalışması yapılan betonarme çerçeve numunelerin SAP2000 programında analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen deneysel ve analitik sonuçlar değerlendirilerek sonuç ve önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme çerçeve, deprem etkilerini azaltma, enerji dağıtma, pasif kontrol, statik itme analizi, sürtünme sönümleyici, sönümleme, rotasyonel sürtünme sönümleyici.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF FRICTION DAMPER IN REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH POOR SEISMIC PERFORMANCE

Ensar SUCİ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Nail KARA

2023, 354 Pages

Jury
Prof. Dr. Fuat DEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Nail KARA
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

In terms of civil engineering developments, earthquake mitigation methods are a rapidly developing new building rehabilitation concept. According to this concept, some of the earthquake energy acting on the buildings is consumed by additional damping control mechanisms, thus reducing the amount of energy that must be consumed with damage in the building. Rotational friction dampers are one of the passive control mechanisms that attract attention with their large energy dissipation capacity, displacement-independent and frequency-independent operation characteristics.

In this thesis, an experimental and analytical study was carried out on the rehabilitation of low-rise reinforced concrete frame buildings with poor seismic performance, which is especially common in the building stock in Turkey, with rotational friction dampers. Experimental and analytical studies were carried out on 1/3 scaled, two-storey and single-span reinforced concrete frames, which have design and construction defects that are frequently seen in buildings in Turkey. The thesis study includes two main research topics.

In first part of the study, the friction pads made of Teflon (PTFE), carbonfiber, lead and brass plates, which are intended to be used in two different types of rotational friction dampers, were investigated according to the damper acceptance criteria determined in Fema-356 by conducting cyclic loading experiments at different bolt clamping torques. With carbonfiber, lead and brass friction pads, which are suitable for use in terms of features such as friction behavior, wear, stability and resistance, 3 single-unit Type 1 and Type 2 rotational friction dampers were produced at 100 Nm bolt clamping torque. The characteristics of the produced Type 1 and Type 2 dampers such as slip load and energy consumption were determined by cyclic loading tests.

In the second part of the study, static pushover experiments were performed on 7 reinforced concrete frame samples, 3 of which were rehabilitated with Type 1 dampers and 3 of which were rehabilitated with Type 2 dampers, 1 of which was a reference sample of reinforced concrete frame without any dampers. The obtained results were compared in terms of rigidity, ductility and energy consumption. In the analytical part of the study, the analysis of the experimental reinforced concrete frame samples was carried out in the SAP2000 software. At the end of the study, the experimental and analytical results obtained were evaluated and conclusions and suggestions were made.

Keywords: Reinforced concrete frame, earthquake mitigation, energy dissipation, passive control, static pushover analysis, friction damper, damping, rotational friction damper.

ÖNSÖZ

Öncelikle lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren ve her konuda destek verip, yardımını esirgemeyen çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Nail KARA' ya şükranlarımı sunarım.

Değerli vakitlerini ayırarak tez çalışmamı inceleyip deneyim ve bilgilerini paylaşan, yol gösterip destekleyen tez izleme komitesi üyeleri saygıdeğer Prof. Dr. Fuat DEMİR ve Prof. Dr. Ali KÖKEN hocalarıma ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışmanın laboratuvar deneyleri, ekipman temini, işçilik ve diğer aşamalarında yardım ve desteklerini gördüğüm hocalarım ve çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Hilmi ARISOY, Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU, Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇER, Öğr. Gör. Murat GÜNAYDIN, İnşaat Mühendisliği Deprem Araştırma Laboratuvarı Görevlisi Mehmet Emin GÜRHAN, Emekli Teknisyenimiz Yüksel ÇİFTÇİ ve kardeşim Furkan SUCİ'ye yardım ve desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı maddi açıdan destekleyen KTÜN Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı Koordinatörlüğü'ne (ÖYP) şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca, maddi ve manevi açıdan her zaman yanımda olan, benden sevgi ve desteğini esirgemeyen kıymetli eşime ve aileme de ayrıca teşekkür ederim.

Ensar SUCİ

KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Pasif Enerji Dağıtım Sistemlerinde Enerji Prensipleri 8
1.2. Pasif Sönümleyicilerde Dinamik Analiz 10
1.3. Pasif Sönümleyicili Yapılarda Genel Formülasyon 12
1.4. FEMA356'da Sismik İzolasyon ve Pasif Enerji Dağıtma Sistemleri 16
1.4.1. FEMA356'da Sismik İzolasyon Sistemleri 17
1.4.2. FEMA356'da Enerji Dağıtma Sistemleri 18
1.4.3. FEMA356'ya Göre Sönümleyici Kabul Kriterleri 20
1.4.4. FEMA356'ya Göre Prototip Testleri 21
1.5. Modern Yapısal Koruyucu Sistemler 23
1.5.1. Sismik İzolasyon Cihazları (İzolatörler) 23
1.5.2. Yarı Aktif ve Aktif Sistemler 25
1.5.3. Pasif Enerji Yayma Sistemleri (Sönümleyiciler) 28
1.5.4. Pall Tipi Sürtünmeli Sönümleyici 44
1.5.5. Rotasyonel Sürtünme Sönümleyici 47
1.5.5.1. Rotasyonel Sürtünme Sönümleyicilerin Gelişim Tarihi 50
1.6. Sıcaklık ve Aşınmanın Sürtünme Sönümleyici Davranışına Etkisi 52
1.7. Tribolojik Özelliklerin Sürtünme Sönümleyici Davranışına Etkisi 53
1.8. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi 54
1.9. Tez Çalışmasının Kapsamı 55
1.10. Tez Çalışmasının Katma Değeri ve Yaygın Etkisi 55

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **58**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **75**

3.1. Sürtünme Pedi Deney Numuneleri 78
3.2. Sönümleyici Parametrelerinin Belirlenmesi 80
3.3. Sürtünme Sönümleyicilerin Boyutları 82
3.4. Sürtünme Sönümleyici Numunelerin Malzeme Özellikleri 84
3.4.1. 304 Kalite Paslanmaz Çelik 84
3.4.2.Teflon (PTFE) 85
3.4.3. Karbonfiber 87
3.4.4. Pirinç 89
3.4.5. Kurşun 91

3.5. Seçilen Sürtünme Pedi Malzemelerinin Sürtünme Katsayıları 91
3.6. Sürtünme Sönümleyici Deney Düzeneği 92
3.7. V Tipi Rotasyonel Sürtünme Sönümleyicilerin Hazırlanması 94
3.7.1. Sürtünme Pedi Deneylerinde İzlenen Yükleme Protokolü 95
3.7.2. Sürtünme Pedi Deney Sonuçları 96
3.8. Tip 1 veTip 2 Rotasyonel Sürtünme Sönümleyici Deneyleri 113
3.8.1. Tip 1 ve Tip 2 Sönümleyici Tiplerinin Genel Özellikleri 114
3.8.2. Tip 1 ve Tip 2 Sönümleyicilerin Deney Sonuçları 120
3.9. Betonarme Çerçeve Deney Numuneleri 136
3.9.1. Betonarme Çerçeve Numunelerin Boyutları 136
3.9.2. Betonarme Çerçeve Numunelerin Detayları 137
3.9.3. Betonarme Çerçeve Numunelerin Donatıları 138
3.9.4. Betonarme Çerçeve Numunelerin Malzeme Özellikleri 142
3.9.5. Çelik Braketler ve L Ankraj Köşebentleri 146
3.10. Betonarme Çerçeve Deney Düzeneği 148
3.10.1. Ölçüm tekniği 151
3.10.2. Betonarme Çerçeve Numune Deneylerinde İzlenen Yükleme Protokolü 153
3.10.3. Ölçümlerin değerlendirilmesi 156
3.10.4. Yük geçmişi ve deplasman geçmişi grafiklerinin çizilmesi 157
3.10.5. Yatay yük-kat deplasmanı (Histerezis) grafiklerinin çizilmesi 157
3.10.6. Zarf eğrisi grafiklerinin çizilmesi 158
3.10.7. Rijitlik azalımı grafiklerinin çizilmesi 158
3.10.8. Tüketilen enerji grafiklerinin çizilmesi 160
3.10.9. Numune süneklik grafiğinin çizilmesi 162
3.10.10. Deney Modellerinin Genel Değerlendirilmesi 165
3.10.11. Betonarme Çerçeve Deney Programı 167
3.11. Betonarme Çerçeve Deney Sonuçları 168
3.11.1. Deney-1 (RN) 168
3.11.2. Deney-2 (T1-KBF) 181
3.11.3. Deney-3 (T1-KRN) 197
3.11.4. Deney-4 (T1-PRÇ) 213
3.11.5. Deney-5 (T2-KBF) 230
3.11.6. Deney-6 (T2-PRÇ) 246
3.11.7. Deney-7 (T2-KRN) 263

4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI 280

4.1. Referans Numune (RN) ile Tip 1 Karbonfiber (T1-KBF) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-2) 281
4.2. Referans Numune (RN) ile Tip 1 Kurşun (T1-KRN) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-3) 285
4.3. Referans Numune (RN) ile Tip 1 Pirinç (T1-PRÇ) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-4) 288
4.4. Tip 1 Sönümleyicili Numunelerin Karşılaştırılması 292
4.5. Referans Numune (RN) ile Tip 2 Karbonfiber (T2-KBF) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-5) 295
4.6. Referans Numune (RN) ile Tip 2 Pirinç (T2-PRÇ) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-6) 299
4.7. Referans Numune (RN) ile Tip 2 Kurşun (T2-KRN) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-7) 303

4.8. Tip 2 Sönümleyicili Numunelerin Karşılaştırılması 307
4.9. Tüm Betonarme Çerçeve Numunelerin Karşılaştırılması 309
4.9.1. Rijitlik Değerlendirmesi 311
4.9.2. Süneklik Değerlendirmesi 313
4.9.3. Enerji Tüketim Değerlendirmesi 314

5. ANALİTİK ÇALIŞMA 316

5.1. Betonarme Çerçeve Numunelerin SAP2000'de Modellenmesi 316
5.2. Sönümleyicilerin Link Eleman Olarak Modellenmesi 320
5.3. Çalışmadaki Rotasyonel Sürtünme Sönümleyiciler için Modelleme 321
5.4. Statik İtme Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 337

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 340

6.1. Sonuçlar 340
6.2. Öneriler 345

KAYNAKLAR 347

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

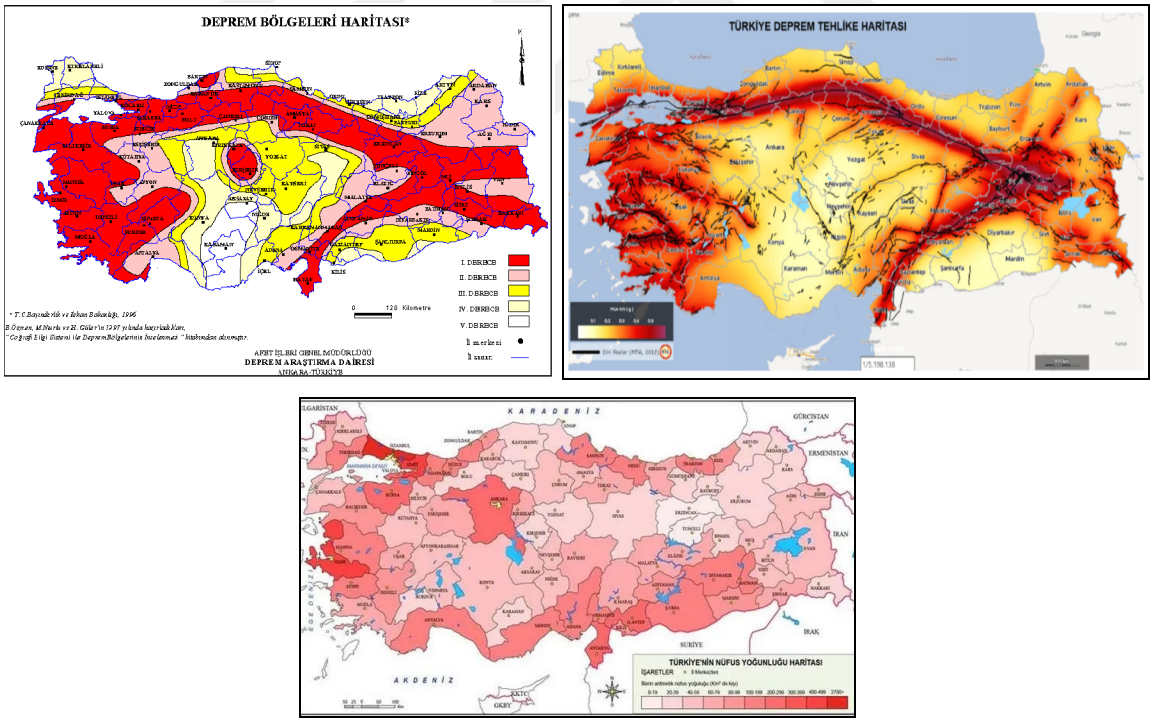
μ	Sürtünme Katsayısı
μ_S	Statik Sürtünme Katsayısı
μ_D	Dinamik Sürtünme Katsayısı
F_f	Sürtünme Kuvveti
M	Kütle
k	Yay Rijitliği
c	Sönüm
b_{eff}	Etkili Sönüm Oranı
k_{eff}	Etkili Rijitlik
Δ	Deplasman
f_y	Sönümleyici akma kuvveti (kayma yükü)

Kısaltmalar

RN	Referans Betonarme Çerçeve Numune
T1-KBF	Tip 1 Karbonfiber Sürtünme Pedli Sönümleyici Kullanılan Betonarme Çerçeve Numune
T1-PRÇ	Tip 1 Pirinç Sürtünme Pedli Sönümleyici Kullanılan Betonarme Çerçeve Numune
T1-KRN	Tip 1 Kurşun Sürtünme Pedli Sönümleyici Kullanılan Betonarme Çerçeve Numune
T2-KBF	Tip 2 Karbonfiber Sürtünme Pedli Sönümleyici Kullanılan Betonarme Çerçeve Numune
T2-PRÇ	Tip 2 Pirinç Sürtünme Pedli Sönümleyici Kullanılan Betonarme Çerçeve Numune
T2-KRN	Tip 2 Kurşun Sürtünme Pedli Sönümleyici Kullanılan Betonarme Çerçeve Numune
SBC	Slotlu Cıvatalı Bağlantı Cihazı (Slotted Bolted Connections)
EDR	Enerji Dağıtıcı Kısıtlama Cihazı (Energy Dissipating Restraint)
SDOF	Tek Serbestlik Dereceli Sistem (Single Degree of Freedom)
MDOF	Çok Serbestlik Dereceli Sistem (Multi Degrees of Freedom)
DM	Hasar Ölçüsü (Damage Measure)
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
LRB	Kurşun Kauçuk İzolatör (Lead-Rubber Isolator)
FDD	Rotasyonel Sürtünme Sönümleyici (Friction Damping Device)
FP	Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (Friction Pendulum Isolator)
DFP	İki Yüzeyli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (Double Friction Pendulum Isolator)
TFP	Üç Yüzeyli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (Triple Friction Pendulum Isolator)
EDS	Enerji Dağıtma Sistemi (Energy Dissipating System)
SMA	Şekil Hafızalı Alaşım (Shape Memory Alloy)
TMD	Ayarlı Kütle Sönümleyici (Tuned Mass Damper)
TMD	Ayarlı Sıvı Sönümleyici (Tuned Liquid Damper)
BRB	Burkulması Önlenmiş Braket (Buckling Restrained Brace)
FSB	Düz Yüzeyli Mesnet (Flat Surface Bearing)
VE	Vizkoelastik
LED	Kurşun Ekstrüzyon Sönümleyici (Lead Extrusion Damper)

1. GİRİŞ

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerindeki konumu nedeniyle tarih boyunca birçok şiddetli depreme maruz kalmıştır. Bu depremlerin çoğunun diri fay hatları üzerinde meydana gelmesi, depremlerin tektonik hareketlerden kaynaklandığını göstermektedir. Geçmişten bugüne kadar oluşturulan Deprem Bölgeleri Haritaları (1972-1996) (AFAD, 1996) ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası (2018) (AFAD, 2018) yüzölçümlerine göre incelendiğinde, ülkemizde deprem riskinin bulunduğu alanlar %96'lık bir orana sahipken, bu oran içerisindeki yüksek deprem riski bulunan alanlar Türkiye yüzölçümünün %66'sını kapsamaktadır. TÜİK'in her yıl yayınladığı nüfus dağılımı bilgilerine göre ise Türkiye nüfusunun %99'u deprem riski bulunan alanlarda yaşamakta olup, bu oran içerisindeki %68'lik dilim yüksek deprem riski içeren alanlarda yerleşmiştir (TÜİK, 2015), (Anonim, 2015). Marmara ve Ege Bölgesi gibi ekonomik gelişme potansiyeli daha fazla olan, aynı zamanda yüksek deprem riskine sahip bölgelere göç ve sanayi yatırımlarının artması, olası şiddetli bir depremin sonucunda can ve mal kayıplarını daha önemli hale getirmektedir (Türkoğlu, 1993), (Özmen ve ark., 1997)



Şekil 1.1. a) Deprem Bölgeleri Haritası (AFAD, 1996) b) Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2018) c) Türkiye'nin Nüfus Yoğunluğu Haritası (Anonim, 2015)

Ülkemizde son 25 yılda meydana gelen şiddetli depremlerde hasar gören ve yıkılan yapıların incelenmesi sonucunda, özellikle köy, kasaba, ilçe gibi yerleşimlerdeki yapıların yürürlükteki yönetmelik ve standartlara uygun inşa edilmedikleri tespit

edilmiştir. Bunun yanı sıra, kalitesiz ve gerekenden daha az malzeme kullanılması, kötü işçilik, projeye uyulmaması ve yetersiz mühendislik hizmeti gibi etkenler de depreme karşı başarısız performansın diğer sebepleri olarak gösterilebilir. Hasar görmeyen ve kullanımı devam eden birçok yapıda da bahsedilen kusur ve eksiklikler bulunmaktadır. Bu yapıların depremin yıkıcı etkilerine karşı güvenli hale getirilebilmesi için sismik rehabilitasyonu gerekmektedir.

Rehabilitasyon, kelime olarak "iyileştirme" anlamına gelmektedir. İnşaat mühendisliği açısından rehabilitasyon dendiğinde ise, özellikle binalarda mal ve can güvenliği için bir takım stratejik değişiklikler uygulanarak sismik riski azaltma söz konusu olmaktadır. Binalarda sismik riski azaltmak için uygulanabilen birçok rehabilitasyon stratejisi bulunmaktadır. Binada rehabilitasyona karar verildiğinde tüm alternatifler göz önünde bulundurularak, binayı hasar riskini azaltacak şekilde değiştirme seçenekleri araştırılmalıdır. Bu tür önlemler, yapının rijitleştirilmesini veya güçlendirilmesini, binadaki düzensizlikleri ortadan kaldırmak için lokal elemanlar eklenmesini, sismik izolasyon veya enerji dağıtma cihazlarının kullanılması ile yapıdaki süneklik ve enerji tüketimine olan talebin azaltılmasını ve yapının yüksekliğinin veya kütlesinin azaltılmasını içermektedir.

Binalarda sismik davranışı geliştirmek için uygulanan rehabilitasyon stratejileri aşağıdaki gibi listelenebilir;

- Yapısal bileşenlerin lokal modifikasyonları
- Binada mevcut düzensizliklerin giderilmesi veya azaltılması
- Tüm binanın rijitleştirilmesi
- Bina kütlesinin azaltılması
- Binaya sismik izolasyon yöntemlerinin uygulanması
- Binaya ilave enerji dağıtım cihazlarının eklenmesi

Enerji dağıtım cihazlarının endüstri ve sanayide kullanımı ilk olarak otomotiv, endüstriyel makina, havacılık ve uzay teknolojilerinde istenmeyen titreşimlerin giderilmesinde kullanılmıştır. İnşaat mühendisliğinde ise, 1950'li yıllardan itibaren şiddetli rüzgâr ve deprem gibi yapısal hasarlara neden olan dinamik yüklerin etkilerini azaltmak amacıyla, çeşitli tip ve yöntemlerle geliştirilmiş enerji tüketen sistem ve cihazların kullanımı yaygınlaşmıştır.

Bir binada, sismik bir değerlendirmenin sonucunda yapısal esneklikten kaynaklanan aşırı yatay deplasmanlar meydana geldiği görülüyorsa, binaya enerji dağıtım cihazlarının eklenmesi etkili bir rehabilitasyon stratejisi olarak

değerlendirilebilir. Depremden dolayı binaya etkiyen enerji, özel cihazların etkisiyle kontrollü bir şekilde dağıtılabilmektedir. Binadaki toplam enerji tüketim kapasitesinin artmasıyla, deplasmanlarda genel bir azalma sağlanmaktadır. Sönümleyici (damper) olarak isimlendirilen bu özel cihazlar sürtünme, histeretik veya viskoelastik süreçler ile enerjiyi dağıtmaktadır.

Tez çalışmasında önerilen sönümleyiciler rotasyonel sürtünme yoluyla enerji dağıtımı sağlamaktadır. Sönümleyicilerin betonarme çerçeveler üzerinde davranışını incelemek için statik itme deneyleri yapılmıştır. Literatürde, sönümleyici kullanılan sistemlerin yapısal tepkisini ve performansını daha iyi ölçebilmek için dinamik test veya zaman tanım alanında analiz gibi dinamik analiz yöntemlerinin kullanımı önerilmektedir (Constantinou ve ark., 1998), (FEMA356, 2000). Ancak, büyük ölçekli deney numunelerinin laboratuvar ortamında hasar verebilecek şekilde dinamik deneylerini yapmak ekipman ve ölçüm açısından hem zor hem de maliyetlidir. Betonarme çerçeve, üç boyutlu bina modeli gibi büyük kütleli deney numunelerine laboratuvar ortamında gerçek deprem ivmelerini verebilmek için hızlı tepki verebilen aktüatör ve/veya servo motorlara sahip yüksek kapasiteli, büyük ölçekli sarsma tablası kullanımı gerekmektedir. Diğer yandan, yapısal tepkiyi ölçebilmek ve deprem verisini doğrulamak için sarsma tablası ve deney numunesine yerleştirilmesi lazım olan ivme ölçer, deplasman ölçer gibi yüksek frekanslı veri elde edilen cihazların eşzamanlı ve doğru çalışmasını sağlamak da oldukça zordur. Ayrıca günümüzde bu ekipmanları temin etmek oldukça maliyetlidir.

Sürtünme ve metal akma sönümleyicilerinin çalışmasında deplasman miktarı ve çalışma frekansının, sönümleyici davranışını yok denecek kadar az etkilemesinden dolayı statik itme yöntemi ile de laboratuvar deneylerinin yapılabileceği, elde edilen sonuçların dinamik deney sonuçlarına yakın olacağı varsayılmıştır. Diğer bir avantaj olarak ise, her çevrim sonrası hasar gören yapısal elemanların daha iyi gözlemlenebileceği düşünülerek deneyler statik itme yöntemi ile yapılmıştır.

Sönümleyicili sistemde, betonarme çerçevenin akma ötelenmesi kabul edilen %1 ötelenmeye kadar kolon, kiriş gibi yapısal elemanların minimum hasarla elastik kalması veya şiddetli deprem koşullarında elastik ötesi evrelerde (> %1 ötelenme seviyelerinde), en azından yapısal hasarın azaltılması amaçlanmaktadır. Çalışmada, TDY (2007)'de kat ötelenme değerlerinin belirlendiği gibi can güvenliği sınır değeri %3 ötelenme kabul edilmiştir. Göçme sınırı olarak ise %4 ötelenme oranı dikkate alınmıştır.

Sönümleyiciler çerçeve yapılara ilave edilirken çoğunlukla < %1 ötelenmeye karşılık gelen elastik bölgede katkı yapması hedeflenmektedir. Çünkü birkaç

sönümleyici çeşidi dışında sönümleyicilerin çoğunda hareket sonrası eski konuma dönme özelliği bulunmamaktadır. Elastik bölgedeyken (< %1 ötelenme seviyelerinde), sönümleyicinin montelendiği çerçevenin esnekliği sayesinde sönümleyicinin eski konumuna dönüşü mümkün olmaktadır. Ancak FEMA356'da enerji dağıtma sistemlerinin bazı performans seviyelerinde sınırlı da olsa hem "Hasar Kontrolü" hem de "Sınırlı Güvenlik" performans aralığında kullanılması uygun görülmektedir. Sürtünme sönümleyici cihazı deprem esnasında ötelenmeyi kontrol etmek için yapısal bir sönümleyici ve yapıya gelen kuvvetleri limitlemek için de bir emniyet valfi görevi üstlenmektedir. Bu çalışmada statik itme deneyi göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye kadar sürdürülerek, sönümleyicinin tüm performans seviyelerinde betonarme çerçeve davranışına etkisi incelenmiştir.

İnşaat mühendisliği çevrelerince bilindiği gibi, geleneksel depreme dayanıklı tasarımın felsefesi mukavemet ve sünekliğin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Bu tasarım mantığına göre küçük ölçekli, sık görülen depremler için yapının elastik aralıkta kalması ve tüm gerilmelerin akma seviyelerinin çok altında kalması beklenir. Ancak, bir yapının büyük bir depreme maruz kaldığında elastik tepki vermesini beklemek ekonomik olmadığı gibi, mühendislik ilkeleri açısından da makul görülmemektedir. Bunun yerine şiddetli bir depremde yapıda belirli bir düzeyde yapısal ve yapısal olmayan hasar meydana geleceği kabul edilerek, katastrofik yıkımları önlemek için binaların doğal sünekliğine güvenilmektedir. Bu tasarım felsefesi, yanal kuvvet yöntemlerini ve daha yakın zamanda elastik olmayan tasarım tepki spektrumlarını içeren sismik tasarım yönetmeliklerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, bu yaklaşımlarla binalar eşdeğer statik bir yüke dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu yaklaşımla tasarlanan binaların yıllar içindeki deprem performansı yeterli görülmüş, otoritelerce sonuçlar oldukça başarılı bulunmuştur. Bu tasarım mantığına göre depremde oluşabilecek yanal etkiler için yaklaşık bir hesap bile binanın ayakta kalmasını kesinlikle artırmaktadır (Constantinou ve ark., 1998).

Ancak, deprem gibi etkilerin gerçek dinamik doğası göz önünde bulundurularak yapı davranışında daha ileri seviyelerde iyileştirmeler gerçekleştirilebilir. Bu dinamik bakış açısının bir sonucu olarak, yeni ve yenilikçi yapısal koruma konseptleri geliştirilmiştir ve bu konseptlerin bir kısmı halen gelişim aşamasındadır. Modern yapısal koruyucu sistemler olarak genel bir başlık altında anılan bu konseptler; deprem sırasında binaya etkiyen dinamik etkileri azaltma ve/veya yapıya ilave enerji dağıtma kapasitesi sağlama gibi avantajları içermektedir.

Modern yapısal koruyucu sistemler üç ana gruba ayrılabilir:

• Sismik İzolasyon Cihazları (İzolatörler)

Elastomerik İzolatörler

Kurşun-Kauçuk İzolatörler

Kayar Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler

• Yarı Aktif ve Aktif Sistemler

Aktif Braket Sistemleri

Aktif Kütle Sönümleyicileri

Değişken Rijitlik ve Sönümleme Sistemleri

Akıllı Malzemeler

• Pasif Enerji Yayma Sistemleri (Sönümleyiciler)

Metalik Sönümleyiciler

Sürtünme Sönümleyicileri

Viskoelastik Katı Sönümleyiciler

Viskoelastik veya Viskoz Akışkan Sönümleyicileri

Ayarlı Kütle Sönümleyicileri

Ayarlı Sıvı Sönümleyicileri

İnşaat mühendisliği yapıları açısından deprem etkilerini azaltma konusu nispeten yeni bir araştırma alanı olmakla birlikte hızla gelişen bir alandır. Ülkemizin zaman zaman karşılaştığı yıkıcı depremlerin ve diğer ülkelerde meydana gelen büyük depremlerin trajik sonuçları hem insan hayatı hem de ekonomik faktörler açısından, binaların ve köprülerin depremlere tepki verme şeklinin büyük önemi olduğunu ortaya koymuştur. Son yıllarda, dünya çapında mühendislik yapılarının tasarımında şiddetli depremlere karşı güvenlik ve güvenilirliklerini artırmak için çeşitli kontrol yaklaşımları geliştirmeye büyük çaba sarf edilmiştir. Genel olarak sismik kontrol teknikleri iki kategoriye ayrılabilir, bunlar güçlendirme yöntemleri ve sismik etkileri azaltma yöntemleridir.

Bir binayı depremin yıkıcı etkilerinden korumak için birkaç alternatif yöntem bulunmaktadır (ATC40, 1996). Betonarme perde duvarlar veya çelik braket desteklerin binaya eklenmesiyle meydana gelen güçlendirme yöntemleri bunlardan biridir. Yapılara eklenen perde duvarlar veya çelik braketler binayı rijitleştirdiği için daha yüksek zemin ivmelerini çekme eğilimindedir. Binanın yüksek zemin ivmelerine maruz kalması ise taşıyıcı sistem üzerinde daha yüksek atalet kuvvetlerine neden olmaktadır. Ayrıca yapıya yeni perde duvarların eklenmesi bina planının değişmesine yol açmakta ve

kullanılabilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Çelik braket desteklerin kullanılması durumunda ise dar histeretik eğrilere sahip olmaları nedeniyle enerji dağıtma kapasitesi artışı oldukça sınırlı kalmaktadır. Her iki geleneksel güçlendirme yöntemi de mevcut taşıyıcı sistemin ve temellerin güçlendirilmesi için pahalı ve zaman alıcı bir çalışma gerektirmektedir. Bu bağlamda, uygun rijitliğe ve enerji tüketimine sahip sönümleme sistemlerini binaya eklemek yapıların sismik rehabilitasyonu için ekonomik bir çözüm olmaktadır (Kim ve ark., 2011).

Son yıllarda, binalarda deprem ve rüzgâr sebepli oluşan dinamik etkileri sönümlemek amacıyla çeşitli titreşim kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler aktif, yarı aktif ve pasif kontrol sistemleri olmak üzere 3 gruba ayrılabilir. Aktif sistemlerde bir deprem esnasında deprem bilgisini okuyan sensörler ve sensörlerden gelecek datayı değerlendirip sistemin nasıl davranması gerektiğini bildiren bir bilgisayar bulunmaktadır. Aktif kontrol sistemleri yüksek teknik bilgi, sistemi çalıştıracak büyük miktarda enerji ve sistemin çalışmasından sonra sistemin kontrolünü yapabilecek iyi eğitimli çalışanların varlığını gerektiren sistemlerdir. Yarı aktif sistemlerde ise sistemi çalıştıracak daha az enerji gerekmektedir ve kullanımı daha kolaydır.

Pasif kontrol sistemleri ise harici enerji veya operatör gerektirmemektedir. Pasif kontrol sistemlerinde yapıların bir miktar rijitliğini ve daha çok sönümünü arttırmak için özel cihazlar kullanılır. 3 ana pasif kontrol türü vardır. Bunlar temel izolatör sistemleri, ayarlı kütle damperleri ve 4 ana tip içeren enerji dağıtma cihazları yani sönümleyicilerdir. Sönümleyici tipleri ise viskoz sıvı içeren sönümleyiciler, viskoelastik sönümleyiciler, metal akma sönümleyicileri ve sürtünme sönümleyicileri olarak sıralanmaktadır.

Pasif kontrol sistemleri için genel olarak, bu sistemlerin kabul edilebilir olması için birkaç koşulun karşılanması gerekir. Pasif kontrol sistemi;

- Gerekli tasarım yer değiştirmeleri için stabil kalabilmeli,
- Tekrarlayan döngüsel yükleme altında kapasitesi düşmemeli,
- Yeterli miktarda enerji dağıtabilmeli,
- Artan yer değiştirmeler altında direnci azalmamalıdır.

Viskoz sıvı içeren sönümleme cihazlarının inşaat mühendisliği alanındaki büyük yapılar için çok uygun olmadıkları bilinmektedir, inşaat mühendisliği alanındaki yapılar büyük miktarda enerjinin tüketilmesini gerektirmektedir, oysa viskoz sıvı içeren sönümleyicilerde enerji tüketimi fazla olduğunda viskoz sıvının ısınmasına neden olarak sönümleyicinin performansını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca viskoz sıvı içeren

sönümleyiciler, düşük hızlarda etkili değildir ve bu nedenle düşük hızdaki titreşimlere maruz, büyük kütleleri olan ve önemli miktarda enerji tüketimini gerektiren binalarda uygulanması pratik değildir (Aiken ve Kelly, 1990).

Sürtünme sönümleyicinin çalışma prensibi, genel sürtünme kuvvetini;

$$F_f = \mu \times N \tag{1.1}$$

denklemiyle ifade eden Coulomb sürtünme yasasına dayanır. Denklemdeki μ değişkeni sürtünme katsayısıdır ve *N*, temas bölgesine etkiyen normal kuvvettir. Bu denkleme göre sürtünen iki cismi harekete geçirmek için F_f sürtünme kuvvetini yenmek gerekmektedir. İki temas eden yüzeyin nispi hareketinden kaynaklanan sürtünme kuvvetleri, bir enerji dağıtımı kaynağıdır. Bazen bu fenomen, tasarımın istenmeyen bir etkisidir ancak kasıtlı olarak belirli bir sistemin sönümünü basit ve uygun maliyetli bir şekilde artırmak için de kullanılabilir. Sürtünme esaslı sönümleyiciler, kinetik enerjinin termal enerjiye dönüşmesini sağlayan, eksenel veya rotasyonel deformasyon mekanizmalı, yüksek dayanımlı cıvatalar ile birbirine sıkılan çelik plakalardan ve sürtünme pedlerinden oluşan mekanizmalardır.

Pasif kontrol sistemleri, depremlere ve kuvvetli rüzgâra maruz kalan yapıların dinamik tepkisini azaltmak için birçok uygulamada başarıyla kullanılmıştır. Sürtünme sönümleyiciler genellikle bu sistemlerin bir bileşeni olarak kullanılmıştır, çünkü nispeten düşük maliyetle yüksek enerji dağılımı potansiyeli sunarlar, kurulumları ve bakımları kolaydır. Birçok sürtünme cihazı deneysel olarak test edilmiştir, örneğin Pall sürtünme sönümleyici (Pall, 1982), Sumitomo sürtünme sönümleyici (Aiken ve ark., 1988; Aiken ve Kelly, 1990), Slotlu-cıvatalı bağlantı (SBC) (Fitzgerald ve ark., 1989), Sürtünmeli deplasman kontrol cihazı (Constantinou ve ark., 1991), Slotlu-cıvatalı bağlantı (SBC) (Grigorian ve ark., 1993), Enerji dağıtan sınırlama (EDR) (Nims ve ark., 1993), Burkulması önlenmiş çelik çapraz (BRB) (Black ve ark., 2004) gibi birçoğu dünyanın dört bir yanındaki binalarda uygulanmıştır.

Pasif kontrol sistemlerinin gelişim sürecinde teorisini geliştirmek için de çok fazla araştırma yapılmıştır. Sürtünme sönümlemeli yapıların analizi ve tasarımı ile ilgili gelişmeler arasında Filiatrault ve Cherry (1990), Colajanni ve Papia (1995), Colajanni ve Papia (1997), Pradlwarter ve ark. (1998), Fu ve Cherry (2000) vb. tarafından çok katlı yapıların sismik tepkilerini tahmin etmek için ortak basitleştirilmiş teoriler önerilmiştir.

Şiddetli yer sarsıntıları, binalar üzerinde yanal atalet kuvvetleri meydana getirmekte ve yapıya etkiyen enerjiyle orantılı bir genlikle ileri-geri hareketlere neden olmaktadır. Bu enerjinin büyük bir kısmı bina hareketi sırasında tüketilebiliyorsa, sismik tepki önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Bu enerjinin yapıda tüketilme şekli, hasar seviyesini belirlemektedir. Genel olarak mevcut tüm asismik tasarım yöntemleri, yapısal elemanların sünekliğine; yani eğilme, burkulma ve çatlamalara neden olan elastik olmayan deformasyonlara maruz kalırken enerjiyi dağıtma yeteneğine dayanmaktadır. Bu tasarım felsefesine göre, meydana gelebilecek şiddetli depremlerde, yapıda göçme öncesinde kalıcı bir hasar olacağı varsayılmaktadır, ancak bu gibi durumlarda oluşacak birincil ve ikincil hasarlar ekonomik anlamda yapının göçmesi kadar önemli olabilmektedir. Sismik enerjinin büyük bir kısmı herhangi bir mekanizma yardımıyla mekanik olarak dağıtılabiliyorsa, yapının tepkisi yapısal hasar olmadan kontrol edilebilmektedir. Bu mekanizmalara genel bir isim olarak "sönümleyici" (damper) denilmektedir (Pall, 1982).

Çerçeveli yapılarda kullanılan sürtünme esaslı yapısal sönümleyicilere öncü bir cihaz olarak, Pall (1982) tarafından çelik çerçeveli binalar için önerilen asismik bir tasarım konsepti gösterilebilir. Bu konsepte göre çerçeveli binaların X braket çapraz sistemine sürgülü sürtünme cihazları eklenerek, depreme dayanıklılıkları ve hasar kontrol potansiyelleri önemli ölçüde artırılabilmektedir. Şiddetli deprem hareketi sırasında, sürtünme cihazı kaymakta ve titreşim enerjisinin büyük bir kısmı ana yapısal bileşenlerde elastik olmayan akmada harcanmak yerine, sürtünme cihazındaki sürtünme yüzeylerinde mekanik olarak dağıtılmaktadır. Araştırmacının yaptığı elastik olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları, diğer yapısal çerçeve sistemlerinin hesaplanmış tepkilerine kıyasla sürtünme sönümlemeli - braketli çelik çerçevelerin daha üstün performansını göstermiştir. Önerilen sürtünme cihazları, yapıda hem aşırı şiddetli yüklerin meydana getirebileceği hasarlara karşı emniyet valfleri görevi üstlenmekte hem de yapısal sönümleyiciler olarak hareket etmektedir. Önerilen sürtünme sönümleyici cihaz ayrıca deprem direncini yükseltmek için mevcut betonarme çerçeveli binalara uygun şekilde ilave edilebilmektedir (Pall, 1982).

1.1. Pasif Enerji Dağıtım Sistemlerinde Enerji Prensipleri

Bir yapıda pasif enerji dağıtma cihazlarının kullanılmasının temel nedeni, yapısal bileşenlerdeki hasar verici deformasyonları sınırlamaktır. Belirli bir sönümleyici cihazın bu amaca ulaşma derecesi, temel yapının doğal özelliklerine, cihazın ve bağlantı elemanlarının özelliklerine, yer hareketinin özelliklerine ve araştırılan sınır durumuna

(performans derecesine) bağlıdır. Bu parametrelerin her birindeki büyük varyasyonlar göz önüne alındığında, belirli bir durumda hangi özel pasif enerji dağıtım sisteminin en uygun olduğunu belirlemek için genellikle kapsamlı bir doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz gerçekleştirmek gereklidir (Symans ve ark., 2008).

Pasif enerji dağıtım sistemlerinin yapılara ilave edilmesinin etkisini göstermek için, idealleştirilmiş, %5 doğal sönümlü, tek katlı yapı (Single Degree Of Freedom-SDOF), bir deprem kaydı ile zaman tanım alanında analize tabi tutularak analiz sonucu göz önüne alındığında, çerçevedeki hasar aşağıda verilen hasar ölçüsü DM denklemi ile ölçülebilmektedir.

$$DM = \frac{\mu_{Talep}}{\mu_{Kapasite}} + 4\rho \frac{E_{Talep}}{E_{Kapasite}} \tag{1.2}$$

Bu denklemde sistem veya sistemi oluşturan bir bileşen için;

μ_{Talep} = maksimum yer değiştirmeye karşılık gelen süneklik talebi,

E_{Talep} = kümülatif histeretik enerji dağıtma talebi,

$\mu_{Kapasite}$ = bir tam elastik olmayan deformasyon döngüsü için süneklik kapasitesi,

$E_{Kapasite}$=bir tam elastik olmayan deformasyon döngüsü için histeretik enerji kapasitesi,

ρ= yapı malzemelerine bağlı kalibrasyon faktörü olarak ifade edilmiştir (Symans ve ark., 2008).

Hasar ölçüsü denklemi Denklem 1.2'den; yapıya verilen hasarın, süneklik talebini veya histeretik enerji talebini azaltarak, veya süneklik kapasitesini veya histeretik enerji kapasitesini artırarak azaltılabileceğini gösterir. İncelenen yapının sünekliğini ($\mu_{Kapasite}$) veya histeretik enerji kapasitesini ($E_{Kapasite}$) arttırmanın (güçlendirme yöntemleri) ekonomik olarak mümkün olmadığı varsayıldığında, performans ancak süneklik talebi (μ_{Talep}) veya histeretik enerji dağıtma talebi (E_{Talep}) azaltılarak geliştirilebilir. Kısacası hasarı azaltmak için denklemdeki ya pay değerleri azaltılmalı, ya da payda değerleri artırılmalıdır. Deprem ile yapıya giren enerjinin (E_{Talep}), yapıdaki toplam enerji kapasitesi ($E_{Kapasite}$) ile tüketilmesi gerekmektedir. Yapının toplam enerji kapasitesinin ($E_{Kapasite}$) artırılması yoluyla hasar ölçüsü (DM) azaltılacak ise, Denklem 1.3'de gösterilen enerji bileşenlerinden biri ya da birkaçı büyütülmelidir. Yapıdaki enerji girdisinin (E) tüketilmesi, histeretik enerji tüketim kapasitesi (E_h) ve varsa ilave sönümleyicilerin enerji tüketim kapasitesi (E_d) sayesinde meydana gelmektedir. Histeretik enerji bileşeninin (E_h) artırılması, yapının

konvansiyonel güçlendirilme yöntemleriyle rijitleştirilmesi ve dolayısıyla yapının yatay yüklere karşı mukavemet kazanması ile mümkün olmaktadır. İlave sönümleyici cihazlar ise yapının ana bileşenlerine müdahale etmeden ekstradan enerji tüketebilmesine olanak sağlayan E_d enerji bileşenini artırmaktadır (Denklem 1.3).

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \tag{1.3}$$

Toplam Enerji Kapasitesi — Histeretik Enerji Bileşeni — Sönümleyici Enerji Bileşeni

1.2. Pasif Sönümleyicilerde Dinamik Analiz

Pasif sönümleyicilerle rehabilite edilmiş bir yapıyı gerçek davranışa yakın bir kesinlikte analiz edebilmek için, zaman tanım alanında analiz gibi gerçek veya benzeştirilmiş deprem kayıtlarının kullanılarak dinamik etkilerin simüle edilebildiği dinamik analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapısal sistemlerin dinamik analizinde farklı tip pasif sönümleyiciler için çevrimsel-zamana bağlı yükleme altında uygun bir kuvvet-yer değiştirme modeli oluşturarak sönümleyici davranışını doğru bir şekilde karakterize etmek gerekmektedir. Bu modelin şekli sönümleyici tipine bağlı olarak değişmektedir. Bu model belirli bir cihaz için kurulduktan sonra, genel yapının matematiksel idealleştirilmesine uygun şekilde dahil edilmelidir. Gerçek bir yapı için bir SDOF idealizasyonu kullanmak nadiren yeterlidir. Bu nedenle dinamik analiz için formülasyon, çok serbestlik dereceli (MDOF) bir modele genişletilmelidir.

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), dinamik analizde bu formülasyon için en uygun temeli sağlamaktadır. Dinamik analiz için oluşturulan formülasyonda her bir yapısal eleman, orijinal elemanla aynı kütle, rijitlik ve sönümleme özelliklerine sahip bir veya daha fazla sonlu eleman tarafından matematiksel olarak temsil edilir. Kirişler ve kolonlar tek boyutlu elemanlarla temsil edilirken, perde duvarlar ve döşemeler iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak idealleştirilir. Daha karmaşık veya inceleme açısından kritik yapısal bileşenler için ise üç boyutlu modeller geliştirilebilir ve genel yapısal modele basit bir şekilde dahil edilebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) aslında 1960'lı yıllarda büyük ölçüde inşaat mühendisleri tarafından bu fiziksel perspektiften geliştirilmiştir. Bununla birlikte, takip eden on yıllar boyunca, yönteme titiz bir matematiksel temel de oluşturulmuştur, böylece hata tahminlerinin hesaplanmasına ve uyarlanabilir çözüm stratejilerinin kullanılmasına

izin verilmiştir. Bununla birlikte yapısal dinamik problemleri çözmek için ABAQUS, ANSYS ve benzeri gibi çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımlar mevcuttur. Bu programların hiçbiri özellikle pasif enerji dağıtma cihazlarını karakterize etmek için gereken özel formülasyonları ele almazken, genel kullanıcı tanımlı öğeler oluşturulmasına izin vermektedirler. Alternatif olarak, yalnızca bazı durumlarda tipik pasif elemanları barındırabilen ETABS, SAP2000, DRAIN-2D ve IDARC-2D gibi inşaat mühendisliği yapılarına yönelik paket programlar kullanılabilir. Bu programlar analiz açısından daha pratik sonuç vermektedir.

Yukarıda belirtilen yöntem ve programlardan herhangi birinde yapının yer değiştirme tepkisi, N boyutunun (kat sayısı) genelleştirilmiş göreceli yer değiştirme vektörü x(t)'nin bileşenleri olarak düşünülebilecek ayrı bir değişkenler kümesi ile temsil edilir. Daha sonra, Denklem 1.4'e benzer şekilde uniform taban kuvvetine ve zamana göre değişen kuvvetlere maruz kalan yapısal sistem için N tane hareket denklemi yazılabilir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + \Gamma x = -(M + \bar{M})\ddot{x}_g + p \tag{1.4}$$

Bu denklemde *M*, *C* ve *K* sırasıyla kütle, sönümleme ve rijitlik matrislerini temsil ederken, *Γ* yapıda bulunan pasif sönümleyicileri modelleyen bir operatör matrisini sembolize etmektedir. Denklemdeki $\ddot{x}_g$ vektörü, sismik yer değiştirmenin her serbestlik derecesine katı cisim katkısını içermektedir ve *p* terimi ile aerodinamik yüklemeden doğan kuvvetleri içerir. $\bar{M}$ matrisi pasif sönümleyicilerin kütlesini temsil eder.

Denklem 1.4'ü çözmek için dikkate alınabilecek birkaç yaklaşım bulunmaktadır. Tercih edilen yaklaşım, doğruluk ve verimlilik açısından bu denklemdeki terimlerin şekline bağlıdır. Pasif sönümleyicilerin ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerinin doğrudan doğrusal fonksiyonları olarak modellenebileceğini varsaydığımızda;

$$\Gamma x = \bar{M}\ddot{x} + \bar{C}\dot{x} + \bar{K}x \tag{1.5}$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 1.4 yeniden yazıldığında ise;

$$\hat{M}\ddot{x} + \hat{C}\dot{x} + \hat{K}x = -\hat{M}\ddot{x}_g + p \tag{1.6}$$

şekline dönüşür. Bina + sönümleyicinin oluşturduğu sistemdeki sırasıyla kütle, sönümleme ve rijitlik matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\hat{M} = M + \bar{M} \tag{1.7}$$

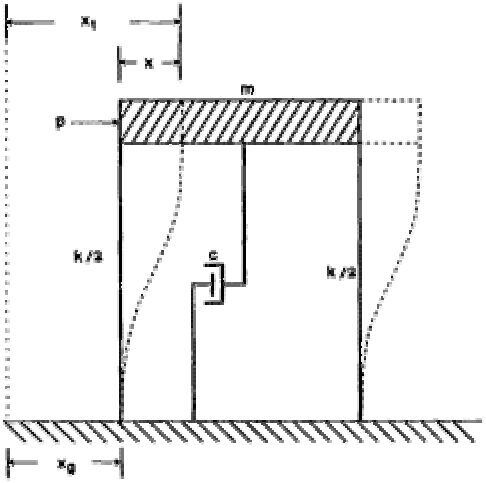
$$\hat{C} = C + \bar{C} \tag{1.8}$$

$$\hat{K} = K + \bar{K} \tag{1.9}$$

Hareket denklemi, bu şekliyle klasik matris yapısal dinamik analiz problemi biçimindedir. Ana yapı ve pasif enerji dağıtma cihazlarıyla ilişkili matris katsayılarının tümü sabittir. Sonuç olarak Denklem 1.6, sabit katsayılı N sayıda bir dizi ikinci mertebeden doğrusal adi diferansiyel denklemi temsil etmektedir. Bu denklemler genellikle birleşiktir. Bu nedenle N'ye bağlı olarak, ilgili zaman aralığı boyunca Denklem 1.6'nın çözümü hesaplama açısından zor hale gelebilmektedir. Denklemde bina + sönümleyicinin kütle ($\hat{M}$), sönümleme ($\hat{C}$) ve rijitlik ($\hat{K}$) matrislerini köşegen matris haline getirme gibi bir dönüşüm yoluyla çözülebiliyorsa, gerekli çaba önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Matris dönüşümü yapılamadığı durumlarda sönümlemenin belli sınırlar içinde kaldığı kabul edilip modal yöntemler kullanılarak çözüm yapılabilmektedir (Soong ve Dargush, 1997).

1.3. Pasif Sönümleyicili Yapılarda Genel Formülasyon

Dinamik yüklemeye maruz kalan bir yapının temel tepki özelliklerinin daha anlaşılır olması açısından en basit yapı modeli olduğu varsayılan tek serbestlik dereceli model (SDOF) üzerinde incelenebilir. Burada fiziksel bir yapının değil, matematiksel idealleştirmenin davranışını incelediğimizin farkında olmak önemlidir. Gerçek bir binayı uygun şekilde modellemek için çok daha fazla ayrıntı gerekmektedir. Bununla birlikte, bu basit modeller incelenerek bir dizi kavramın kolay şekilde anlaşılabilmesi mümkündür (Newmark ve ark., 1972; Hanson, 1993), (Soong ve Dargush, 1997).



Şekil 1.2. SDOF Model (Soong ve Dargush, 1997)

Yukarıdaki Şekil 1.2'de gösterilen SDOF modelde kolonlar yatayda toplam lineer elastik rijitliği *k* olan yaylar ile temsil edilmektedir. Modelde, doğal sönüm viskoz bir sönümleyici ile temsil edilmektedir. Toplam rijitliği *k* olan kolonlar tarafından desteklenen *m* kütlesinden ve lineer viskozitesi *c* olan bir sönümleyiciden oluşan, Şekil 1.2'de gösterilen tek serbestlik dereceli (SDOF) modelin yanal hareketini göz önüne aldığımızda;

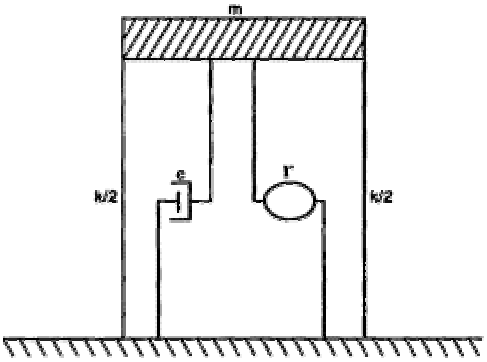
Bu SDOF sistemi uniform, zamana bağlı bir yer değiştirme *xg(t)* ile karakterize edilen bir sismik yanal etkiye ve *p(t)* ile temsil edilen bir rüzgâr yüküne tabi tutulduğu düşünüldüğünde; bu iki etkiye maruz kalan model zemine göre bir *x(t)* yanal yer değiştirme ile yanıt vermektedir. Bu durumda idealleştirilmiş yapının toplam yer değiştirmesi basit bir ifadeyle;

$$xt(t) = x_g(t) + x(t) \tag{1.10}$$

olacaktır. Hem *xg(t)* hem de *x(t)*'nin sürekli, iki kez türevlenebilir fonksiyonlar olduğu varsayılmalıdır. Tanım olarak doğrusal bir elastik yay, yer değiştirme ile orantılı bir kuvvet üretirken, doğrusal bir viskoz sönümleyicideki kuvvet, hız ile orantılıdır. Sonuç olarak, bu SDOF modeli için hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g + p \tag{1.11}$$

burada üstel noktalar zamana göre türevi temsil etmektedir.



Şekil 1.3. Pasif Sönümleyicili SDOF Model (Soong ve Dargush, 1997)

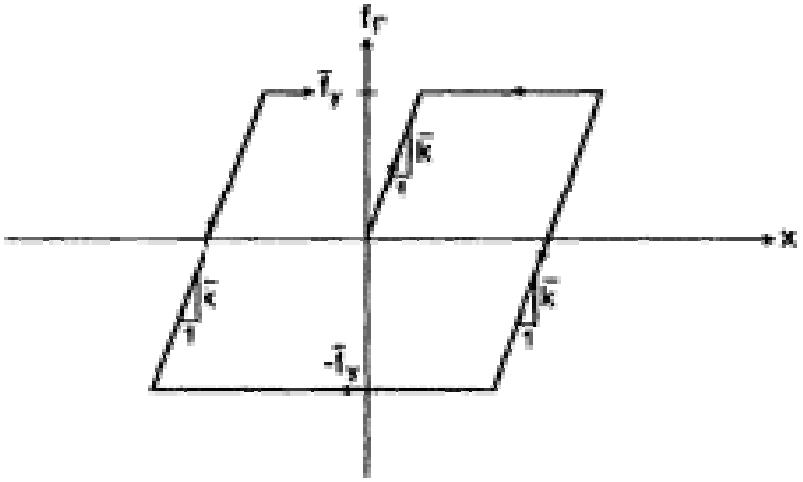
Yukarıda ele alınan SDOF sistemde enerji dağıtımından sorumlu mekanizma, lineer bir viskoz sönümleyiciden oluşmaktadır. Bu viskoz sönümleyici, her fiziksel yapıdaki doğal sönüme denk görülen prototip enerji dağıtıcısını temsil etmektedir. Ancak çeşitli pasif sönümleyicilerin olduğundan bahsettiğimiz gibi, birçok başka sönümleyici mekanizma da mevcuttur. İlave pasif sönümleyicilerin yapıya monte edilmesiyle artan enerji dağıtımının faydalı etkileri, SDOF modele akma, sürtünme veya viskoelastik mekanizmalar dahil edilerek de gösterilebilir. Şekil 1.3'de SDOF modeline genel bir pasif sönümleyici elemanının eklenmesi gösterilmiştir. Sistemin tepkisi bu ilave sönümleyiciden etkilenmekte ve değişmektedir. Sisteme ilave edilen sönümleyici, matematiksel ifadede uygun bir makroskopik kuvvet-yer değiştirme modeli ile karakterize edilmelidir. Muhtemelen bu pasif sönümleyici, tipine göre tamamen viskoz olmayacak, ek yatay rijitlik ve belki de enerji tüketen mekanizmalar ile birlikte SDOF sisteme ek kütle de sağlayacaktır. Şekil 1.3'deki Γ sembolü, genel bir integro-diferansiyel operatörü temsil etmektedir. Buna göre pasif sönümleyicinin katkısına karşılık gelen kuvvet basitçe Γx olarak ifade edilebilir. Bu ifade yer değiştirme, hız veya ivmeye bağlı katkılar dahil olmak üzere genel tepki özelliklerini belirtmek için oldukça elverişlidir. Ek sönümleyici ile rehabilite edilmiş SDOF modeli için hareket denklemi aşağıdaki şekilde değişmektedir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \Gamma x = -(m + \bar{m})\ddot{x}_g + p \qquad (1.12)$$

Denklemdeki $\bar{m}$ pasif sönümleyici cihazın kütlesini temsil etmektedir.

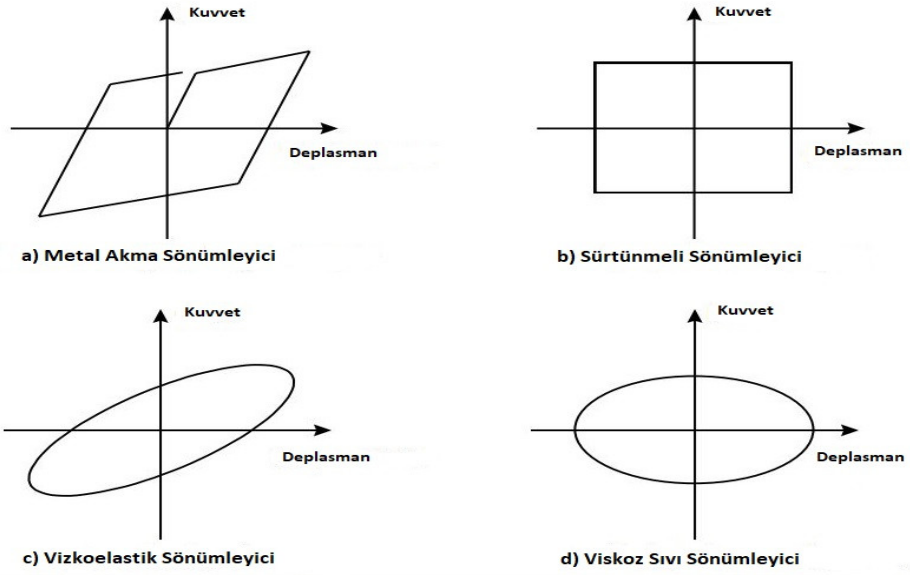
Yalın SDOF yapının ξ = 0,05 viskoz sönüm oranına sahip olduğunu ve yapıda pasif sönümleyici olarak hizmet etmesi için pasif sönümleyicilerden kütlesiz, basit bir

metal akma cihazının eklendiğini varsaydığımızda Şekil 1.4'de gösterilen kuvvet-yer değiştirme ilişkisi elde edilmektedir.



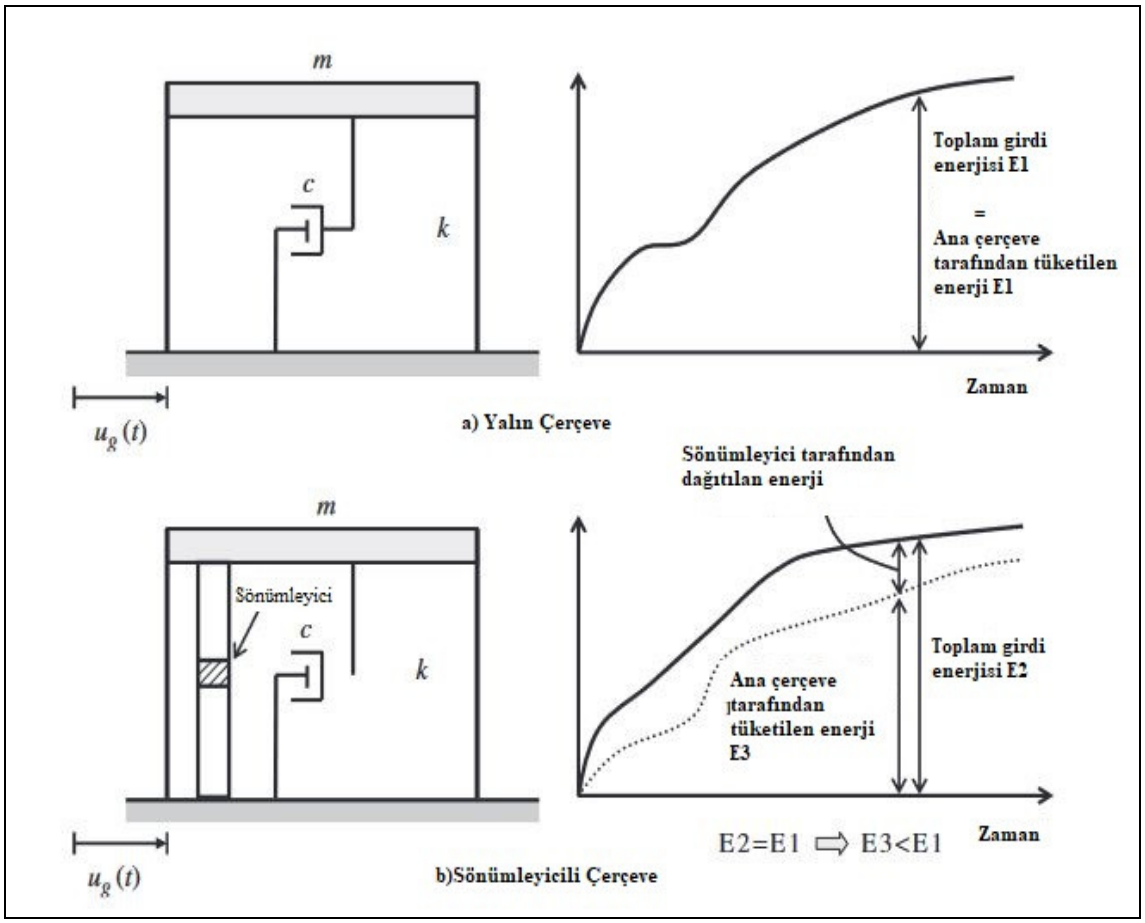
Şekil 1.4. Pasif sönümleyici cihazda (metal akma sönümleyici) kuvvet-yer değiştirme ilişkisi (Soong ve Dargush, 1997)

Hızdan bağımsız, elastik-mükemmel plastik eleman (metal akma sönümleyici) için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi, $\bar{k}$ ile gösterilen bir başlangıç rijitliği ve f_y ile gösterilen bir akma kuvveti ile tanımlanmaktadır. Şekilde mevcut olan döngü içindeki alan pasif sönümleyicide çevrim başına harcanan enerjiye eşittir. Sürtünme sönümleyici de metal akma sönümleyicilere benzer şekilde hızdan (frekanstan) bağımsız bir kuvvet yer değiştirme ilişkisine sahiptir. Daha büyük başlangıç rijitlikleri olduğundan mükemmel plastik bir davranış gösterirler. Bu nedenle kuvvet-yer değiştirme grafikleri metal akma sönümleyicilerde olduğu gibi paralelkenar değil dikdörtgen şeklindedir. (Şekil 1.5)



Şekil 1.5. Farklı sönümleyici türlerine ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Daha önce yapılan çalışmalarda yapıya pasif sönümleyici eklenmesinden sonra elde edilen sonuçlarda, enerji tüketimi açısından yapı tepkilerinde önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir (Şekil 1.6). Belirli koşullar altında, pasif sönümleyicilerin enerji dağıtımına olumlu etkisi artırılabilmektedir. Çünkü pasif sönümleyici cihazların bir yapı içindeki konumu, yönü ve bağlanma şekli, etkinlikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Birçok çalışmada bu pasif sönümleyicilerin çerçeve içerisindeki konumu ve bağlanma şekli üzerine optimizasyon çalışmaları yürütülmektedir (Takewaki, 2011).



Şekil 1.6. Ek Sönümleyicilerin etkinliğinin teorik gösterimi (Takewaki, 2011)

1.4. FEMA356'da Sismik İzolasyon ve Pasif Enerji Dağıtma Sistemleri

FEMA356 (2000), bütün ülkelerde modern kontrol sistemlerinin tasarım aşamasında sağlanması gereken nitelik ve performans özelliklerini belirleyen, yapılara montaj öncesi yeterlilik ve kabul kriterleri için kıstaslar ortaya koyan önemli bir standarttır.

Sismik izolasyon ve enerji dağıtma sistemleri, bir dizi binanın sismik rehabilitasyonu için halihazırda kullanılmış olan uygulanabilir tasarım stratejileridir. Aktif kontrol, aktif ve pasif enerji cihazlarının hibrit kombinasyonları ve ayarlanmış

kütle ve sıvı sönümleyiciler dahil olmak üzere diğer özel sismik koruma sistemleri de pratik çözümler sağlayabilmektedir. Bu sistemler, binanın tepki özelliklerini değiştirerek bir deprem sırasında performansı artırmaları bakımından benzer davranış göstermektedir.

Sismik izolasyon ve enerji dağıtma sistemleri çoğu bina için, özellikle de sadece "sınırlı rehabilitasyon hedefleri" olan binalar için uygun tasarım stratejileri olmayacaktır. Genel olarak bu sistemler, sahipleri tarafından üstün deprem performansı istenen ve sismik izolatörlerin ve/veya enerji dağıtma cihazlarının tasarımı, imalatı ve montajı ile ilgili özel maliyetleri karşılanabilen binaların rehabilitasyonu için uygun olacaktır. Bu maliyetler, rehabilitasyon hedeflerini karşılamak için gerekli olacak olan rijitleştirme ve güçlendirme önlemlerine duyulan ihtiyacın azalmasıyla dengelenmektedir.

Sismik izolasyon ve enerji dağıtma sistemleri, çoğu geleneksel rehabilitasyon planından daha kapsamlı tasarım ve ayrıntılı analiz gerektiren, nispeten yeni ve karmaşık kavramlardır. Benzer şekilde, sismik izolasyon veya enerji dağıtma sistemleri kullanan tüm rehabilitasyon planları için tasarım incelemesi gereklidir. Sismik izolasyon ve enerji dağıtma sistemleri, çok çeşitli konseptleri ve cihazları içermektedir. Çoğu durumda bu sistem ve cihazlar, yapının bazı ek geleneksel güçlendirmeleri ile uygulanmaktadır, bu nedenle her durumda mevcut yapı elemanlarının değerlendirilmesi gerekmektedir (FEMA356, 2000).

1.4.1. FEMA356'da Sismik İzolasyon Sistemleri

Sismik izolasyon, özellikle bağımsız duran (ayrık nizam yapılar) ve tarihi önemi olmayan bodrum veya alt alana sahip tarihi binalar için giderek daha fazla dikkate alınmaktadır. Böyle bir çözüm seçilirken, alanda tarihi veya arkeolojik kaynakların bulunma olasılığına özel önem verilmelidir. Hastane, yönetim binaları gibi önemli tesisler ve değerli içerikleri barındıran, yapısal eksiği bulunmadığı halde yetersiz yanal kuvvet dayanımına sahip binalar için sismik izolasyon da sıklıkla göz önünde bulundurulur.(FEMA356, 2000)

Kavramsal olarak sismik izolasyon, binayı zeminden "ayırarak" üst yapının tepkisini azaltır. Tipik izolasyon sistemleri, binanın periyodunu uzatarak ve bir miktar sönüm yeteneği ekleyerek üst yapıya iletilen kuvvetleri azaltır. Ek sönümleme, çoğu izolatörün doğal bir özelliğidir, ancak izolasyon arayüzü boyunca kurulu ek enerji dağıtma cihazları tarafından da sağlanabilir. Uygun koşullar altında sismik izolasyon sistemi, üst yapıdaki ötelenmeyi, binanın yalıtılmaması durumunda meydana gelebilecek olandan en az iki kat ve bazen beş kata kadar azaltmaktadır.

Ötelenmedeki azalmanın yanında, izolatörlerin enerji dağıtma özelliklerine bağlı olmasına ve ötelenmenin azalması kadar önemli olmamasına rağmen, üst yapıdaki ivmeler de sismik izolasyon sayesinde azaltılmaktadır. Üst yapıdaki ötelenmenin azaltılması, yapısal bileşenleri ve elemanları ve ayrıca ötelenme kaynaklı hasara duyarlı yapısal olmayan bileşenleri de korumaktadır. Ayrıca ivmelenmenin azaltılması da ivme kaynaklı hasara duyarlı yapısal olmayan bileşenleri korur.

1.4.2. FEMA356'da Enerji Dağıtma Sistemleri

Pasif enerji dağıtma cihazları, binaya sönümleme özelliği ve bazı durumlarda yatay rijitlik eklemektedir. Akışkan viskoz sönümleyiciler, viskoelastik malzemeler ve histeretik cihazlar dahil olmak üzere çok çeşitli pasif enerji dağıtma cihazları mevcuttur. İdeal olarak enerji dağıtma cihazları, binanın bileşenlerinde daha yüksek tepki seviyelerine ve hasara neden olacak deprem etkilerini azaltır. Uygun koşullar altında, enerji dağıtma cihazları yapının ötelenmesini yaklaşık 2-3 kat (rijitlik eklenmemişse) ve eğer cihazlar yapıya rijitlik de ekliyorsa daha fazla azaltmaktadır. Enerji dağıtma cihazları aynı zamanda yapıdaki kuvveti de azaltacaktır (yapı elastik olarak tepki veriyorsa) ancak akmanın ötesinde tepki veren yapılarda kuvveti azaltması beklenmez (FEMA356, 2000).

Aktif kontrol sistemleri, ivmeölçer ve bilgisayarlar aracılığıyla deprem sırasında bina hareketini algılamaktadır. Binaya tabandan dış kuvvet uygulayarak ya da aktif cihazların yapısal özelliklerini değiştirerek harekete karşı direnmektedir. Ayarlanmış kütle veya sıvı sönümleyiciler, yapı özelliklerini değiştirmekte ve temel bina titreşim modlarına sönümleme eklemektedir.

FEMA356 Bölüm 2'de izolasyon veya enerji dağıtma sistemleri gibi özel sismik sistemlerin yapı tasarım sürecinin başlarında düşünülmesi gerektiği ve bina için oluşturulan "rehabilitasyon hedeflerine" göre hareket edilmesi gerektiği ifade edilmektedir (FEMA356, 2000).

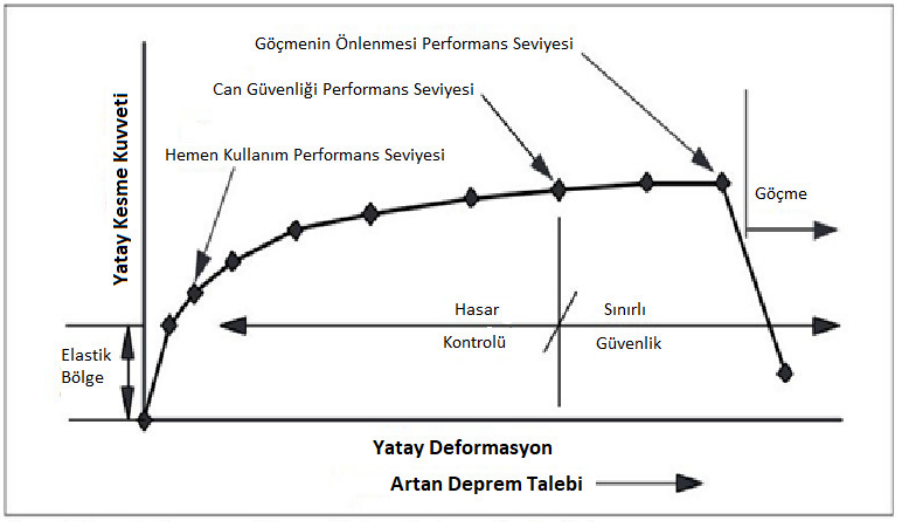
Yapı rehabilitasyonu için özel bir sismik sistemin doğru tasarım stratejisi olup olmadığı, öncelikle belirtilen deprem talebi seviyesinde gereken performansa bağlı olacaktır. Genel olarak özel sismik sistemlerin daha sıkı rehabilitasyon hedefleri (daha yüksek performans seviyeleri ve daha şiddetli deprem talebi seviyeleri) olan binalar için bir rehabilitasyon stratejisi olarak daha uygun olduğu görülecektir. Tablo C9-1, bina rehabilitasyonu için muhtemel tasarım stratejileri olarak izolasyon ve enerji dağıtım sistemlerinin dikkate alınması gereken performans seviyeleri hakkında bazı basit

rehberlik bilgileri sağlamaktadır. Çizelge 1.1'de FEMA356 Tablo C9-1 de belirtilen bu bilgiler TBDY (2018)'de karşılık gelen performans seviyelerine göre verilmiştir.

Çizelge 1.1. Temel İzolasyon ve Enerji Dağıtma Sistemlerinin Uygulanabilirliği (FEMA356, 2000)

Performans Seviyesi	Performans Aralığı	Temel İzolasyon Sistemleri	Enerji Dağıtma Sistemleri
Operational (O) (FEMA 273/356) Kesintisiz Kullanım (KK) (TBDY-2018)	Hasar Kontrolü	Çok Uygun	Sınırlı
Immediate Occupancy (IO) (FEMA 273/356) Sınırlı Hasar (SH) (TBDY-2018)		Uygun	Uygun
Life Safety (LF) (FEMA 273/356) Can Güvenliği (CG) (TBDY-2018)	Sınırlı Güvenlik	Sınırlı	Uygun
Collapse Prevention (CP) (FEMA 273/356) Göçmenin Önlenmesi (GÖ) (TBDY-2018)		Pratik Değil	Sınırlı

FEMA356, Tablo C9-1'de, TBDY (2018) yönetmeliğimizde Sınırlı Hasar (SH) yapısal performans düzeyine karşılık gelen Immediate Occupancy (IO), ve Kesintisiz Kullanım (KK) performans düzeyine karşılık gelen Operational (O) performans seviyesine ulaşabilmek için izolasyon sistemlerinin dikkate alınması gerektiğini önermektedir. Tersine, temel izolasyonu yönetmeliğimizde Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans düzeyine karşılık gelen Collapse Prevention (CP) yapısal performans düzeyine ulaşmak için uygun bir tasarım stratejisi olmayacaktır. Genel olarak, izolasyon sistemleri yapıya, yapısal olmayan bileşenlere ve içeriklerine önemli ölçüde koruma sağlar, ancak bütçe ve rehabilitasyon hedefleri mütevazı olduğunda pratik uygulamayı engelleyen bir maliyetle karşılaşılmaktadır (FEMA356, 2000).



Şekil 1.7. Sünek Yapılarda Performans ve Yapısal Deformasyon Talebi (FEMA273, 1996)

Enerji dağıtım sistemleri, izolasyon sistemlerinden biraz daha geniş bir bağlamda düşünülmelidir. Daha yüksek binalar için (izolasyon sistemlerinin maliyet açısından uygulanabilir olmadığı yerlerde), performans hedefleri "Hasar Kontrolü" performans aralığını içerdiğinde, enerji dağıtma sistemleri bir tasarım stratejisi olarak düşünülmelidir (Şekil 1.7).

Buna karşılık, çoğu enerji dağıtma cihazları oldukça ekonomiktir ve yalnızca "Sınırlı Güvenlik" performans aralığına yönelik performans hedefleri için pratik olabilmektedir. Ancak genellikle, istenen yapısal performans düzeyi Life Safety (LF) (yönetmeliğimizde Can Güvenliği (CG)) veya belki de Immediate Occupancy (IO) (yönetmeliğimizde Sınırlı Hasar (SH)) olduğunda, enerji dağıtma sistemlerinin uygun bir tasarım stratejisi olma olasılığı daha yüksektir. Bu cihazlar küçük depremler, rüzgâr veya mekanik yükler nedeniyle bina tepkisinin kontrolü için de yararlı olabileceğinden, diğer amaçlar da enerji dağıtma cihazlarının kullanılması kararını etkileyebilmektedir (FEMA356, 2000).

1.4.3. FEMA356'ya Göre Sönümleyici Kabul Kriterleri

FEMA356, deplasmana bağlı enerji dağıtım cihazların onaylanması için bazı deneysel testler ve kabul kriterleri ortaya koymuştur. Bu kabul kriterleri aşağıda açıklanmıştır:

- Sönümleyiciler için yapılan çevrimsel testlerde histerezis eğrilerinin sıfır yer değiştirmelerindeki kuvvetler hesaplanır ve ortalama değerler bulunur. Her çevrimin sıfır yer değiştirmedeki kuvvet değeri (kayma yükü), ortalama değerin ±%15'i ile karşılaştırılarak belirlenen aralıkta (%85-115) olup olmadığı kontrol edilir.

- FEMA356'ya göre, herhangi bir çevrim için sönümleyicilerin etkin rijitliği (k_{eff}), testteki tüm döngülerden hesaplanan ortalama rijitlikten ±%15 daha fazla farklı olmamalıdır. Deplasmana bağlı bir cihazın kuvvet-yer değiştirme tepkisi, cihazın her bir ucu arasındaki göreli yer değiştirmenin bir fonksiyonudur. Bu fonksiyonu ifade eden sönümleyici etkin rijitliği (k_{eff}) her bir histerezis çevrimi için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$k_{eff} = \frac{|F^-| + |F^+|}{|\Delta^-| + |\Delta^+|} \tag{1.13}$$

burada F^- ve F^+ kuvvetleri sırasıyla Δ^- ve Δ^+ yer değiştirmelerde elde edilen kuvvetlerdir.

- Ortalama yer değiştirme (Δ_{ave}), negatif (Δ^-) ve pozitif (Δ^+) yer değiştirme değerlerinin ortalamasına eşittir. Sönümleyicinin her çevrimdeki eşdeğer viskoz sönümlemesi (b_{eff}) 'in elde edilen değerleri, (b_{eff}) 'nin ortalama değerinin ± %15 aralığında olmalıdır. Rijitlik sergileyen bir sürtünme sönümleyicinin eşdeğer viskoz sönümlemesi (b_{eff}), her bir histerezis döngüsü için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$b_{eff} = \frac{1}{2\pi}\frac{W_D}{k_{eff}\Delta_{ave}^2} \tag{1.14}$$

burada (k_{eff}) Denklem 1.13'de hesaplanır. W_D, çevrimsel yükleme testi sırasında sönümleyicinin kuvvet-yer değiştirme grafiğinin bir tam çevrimi tarafından çevrelenen kapalı alandır.

- Çevrimsel yükleme sırasında sönümleyici tarafından dağıtılan enerji miktarı, FEMA 356'ya göre histerezis döngüsünün alanı W_D değerlendirilerek hesaplanır. Çevrimsel yüklemenin sonundaki histerezis döngüsünün alanı, 20 test döngüsünün ortalama alanından ±%15'ten fazla farklılık göstermemelidir.
- Sönümleyicinin tasarımında maksimum deplasman kapasitesi BSE-2 (FEMA 273'de belirlenen 50 yıl içinde aşılma olasılığı %5 olan tasarım depremi) depreminde sönümleyicide oluşacak maksimum deplasman boyunun % 30 fazlası alınması gerekmektedir (FEMA273, 1996; FEMA356, 2000).

1.4.4. FEMA356'ya Göre Prototip Testleri

FEMA356, rehabilitasyonu yapılacak binaya sönümleyicilerin monte edilmesinden önce prototip testlerinin yapılmasını istemektedir. Prototip testleri, rehabilite edilecek bina için tasarımda belirlenen sönümleyicilerin imalat ve kalite kontrol prosedürlerini sağlayıp sağlamadığını kontrol amaçlı yapılmaktadır. Rehabilitasyonda kullanılacak sönümleyici cihazların her bir tipi ve boyutu için elde edilen sonuçlar, tasarımdaki değerlerle aynı olması koşuluyla kullanımına izin verileceği belirtilmiştir.

FEMA356'ya göre prototip testleri, tasarımda kullanılan her tip ve boyuttaki iki tam boyutlu sönümleyici cihaz üzerinde ayrı ayrı yapılmalıdır. Testleri yürüten kayıt

mühendisi tarafından onaylanırsa, imalat ve kalite kontrol prosedürlerinin rehabilite edilen binada kullanılan her cihaz tipi ve boyutu için aynı olması şartıyla, prototip testi için her bir cihaz tipinin temsili boyutlarının seçimine izin verilebilir. Testi yürüten kayıt mühendisi tarafından yazılı olarak onaylanmadıkça, testlerde kullanılan numuneler binanın rehabilitasyonunda kullanılmamalıdır.

FEMA356'ya göre prototip testleri aşağıdaki kurallara göre yürütülmektedir;

Aşağıdaki minimum test sekansı (≥ 2000 çevrim) için, her bir enerji dağıtım cihazı binaya kurulu olduğu şekliyle cihaz üzerindeki yerçekimi yüklerini ve beklenen aşırı ortam sıcaklıklarını simüle edecek şekilde yüklenmelidir.

1. Her sönümleyici cihaz, tasarım rüzgâr fırtınasında beklenen çevrim sayısı ile yüklenmelidir. Ancak tasarımda beklenen genliklerde, rehabilite edilen binanın temel periyodunun tersine eşit bir frekansta, en az 2000 tam ters yük çevrimi (yer değiştirmeye bağlı sönümleyiciler ve viskoelastik sönümleyiciler için) veya yer değiştirme (viskoz sönümleyiciler) olmalıdır. Rüzgâr kaynaklı kuvvetlere veya yer değiştirmelere tabi olmayan sönümleyici cihazların bu testlere tabi tutulmasına gerek yoktur.
2. Her sönümleyici cihaz, rehabilite edilmiş binanın hakim periyodunun tersine eşit bir frekansta, BSE-2 (FEMA 273'de belirlenen 50 yıl içinde aşılma olasılığı %5 olan tasarım depremi, tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olması benzerliğiyle yönetmeliğimizde belirlenen DD-1 deprem yer hareketine denktir) depreminde enerji dağıtım cihazındaki oluşacak yer değiştirme genliğinde, 20 çevrim boyunca yüklenecektir (FEMA273, 1996).

FEMA 356, prototip testlerinde yerel koşulları dikkate alarak değişiklik yapılmasına belli şartlarla olanak sağlamaktadır. Başka bir prototip test prosedürü yürütülmek isteniyorsa, enerji dağıtma cihazları için yukarıda belirtilenler dışındaki test yöntemlerine aşağıdaki koşulların sağlanmasıyla izin verilmektedir:

- önerilen yöntem ile çevrimsel test arasındaki eşdeğerlik gösterilebiliyorsa;
- önerilen yöntem, enerji dağıtım cihazı tepkisinin ortam sıcaklığına, yükleme sıklığına ve test sırasındaki sıcaklık artışına bağımlılığını yakalıyorsa;
- önerilen yöntem yetkili mühendis tarafından onaylanıyorsa; prototip testlerinde değişiklik yapılabilmektedir.

1.5. Modern Yapısal Koruyucu Sistemler

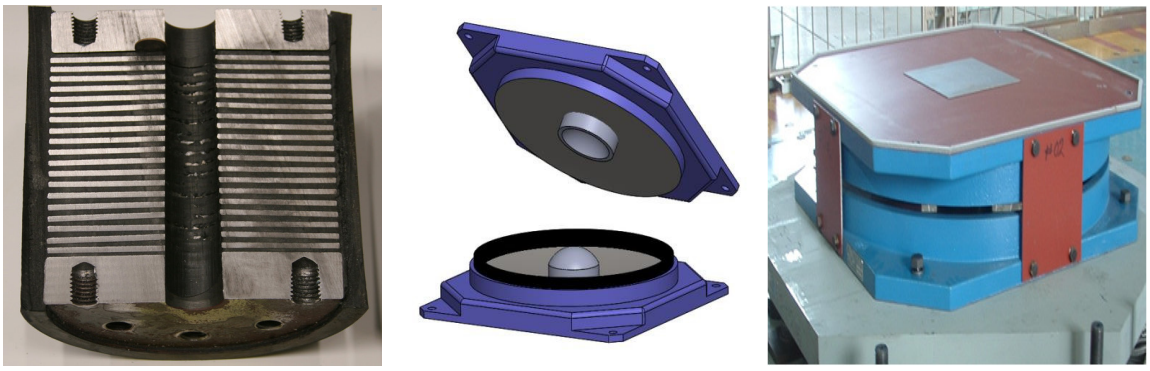
Deprem sırasında binaya etkiyen dinamik etkileri azaltan ve/veya binaya ilave enerji dağıtma kapasitesi sağlayan sistemlerden bu başlık altında kısaca bilgi verilmiştir.

1.5.1. Sismik İzolasyon Cihazları (İzolatörler)

Sismik izolasyon uygulamaları artık dünyanın birçok yerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sismik izolasyon sistemleri, tipik olarak bir yapının temeline yerleştirilen ve sismik izolasyon sağlayan izolatörlerden oluşmaktadır. İzolatörler esneklik ve enerji yutma kabiliyetleri sayesinde, deprem girdi enerjisinin bir kısmını bu enerji yapıya iletilmeden önce absorbe ederken, bir kısmını da üst yapıya yansıtır. Sonuç olarak, yapı üzerindeki enerji tüketim talebinin azalması, yapının ayakta kalma kabiliyetinde bir artışa neden olur.

1.5.1.1. Elastomerik İzolatörler

Elastomerik izolatörler, Şekil 1.8a'da gösterildiği gibi ara çelik plakalarına bağlı doğal veya sentetik kauçuktan oluşan sıralı katmanlardan oluşur. Kurşun-kauçuk izolatörler (LRB) ise düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörlerden yalnızca merkezindeki bir deliğe takılan kurşun bir çekirdek eklenmesiyle farklılık gösterir. Kurşun çekirdek, kayma deformasyonu altında plastik olarak deforme olur ve düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörlere kıyasla izolatörün enerji dağıtma kabiliyetini arttırır (Warn ve Ryan, 2012; Iancu ve ark., 2013).

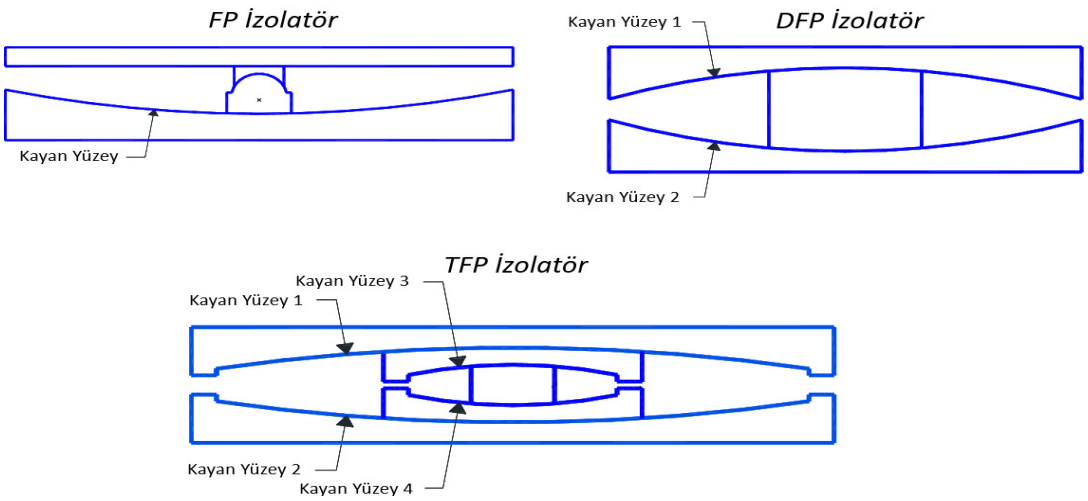


a) b) c)

Şekil 1.8. a) Kurşun-kauçuk izolatör kesiti b) FP izolatör c) TFP izolatör (Warn ve Ryan, 2012)

1.5.1.2. Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler

Kayar sürtünmeli sarkaç izolatörler (Friction Pendulum - FP) kayan bir arayüze oturan bir mesnet üzerinde yapı ağırlığını taşıyan izolatörlerdir (Şekil 1.8b-c). Kayma arayüzü, yatay kuvvetlere karşı direnci azaltan düşük bir sürtünme katsayısı ile tasarlanmıştır. Kayar izolatörlerin kayma arayüzünde izolatör malzemesi olarak düşük sürtünme katsayısı ($0.02 < \mu < 0.12$) ve düşük ısıl etkilenmeye sahip Teflon (PTFE) tipi malzeme ve yüzeyi pürüzsüz paslanmaz çelik kullanılmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler (FP) ve çok küresel yüzeye sahip türevleri (DFP, TFP), en yaygın olarak kullanılan sismik izolatörler arasındadır. Tek kayma yüzeyli sürtünme izolatörü (FP), Şekil 1.9'da gösterildiği gibi bir taban plakası, sürtünen yüzeyi Teflon (PTFE) kaplı sünek demir malzemeden yapılmış mafsallı bir kayıcı ve küresel içbükey paslanmaz çelik kaplamalı döküm bir çanaktan oluşur. Teflon (PTFE) tipi malzeme ile paslanmaz çelik yüzey arasındaki sürtünme, sürtünme direnci ve enerji dağılımı sağlarken, küresel içbükey çanağın eğrilik yarıçapı bir geri merkezleme kuvveti sağlamaktadır (Warn ve Ryan, 2012).



Şekil 1.9. Sürtünmeli sarkaç izolatör tipleri

Son yıllarda FP izolatörün çoklu küresel kayma yüzeyli türevleri geliştirilmiş ve birçok yapıya uygulanmıştır. Çoklu küresel kayma yüzeyli izolatörlerin tek FP izolatörlere göre avantajı, uyarlanabilir bir kuvvet-deformasyon davranışına izin vermeleridir, bu sayede izolatörün rijitlik ve sönümleme özellikleri önceden belirlenmiş yer değiştirme genliklerine göre değiştirilebilir (Fenz ve Constantinou, 2006). Çoklu küresel kaymalı izolatörlerin varyasyonları arasında Double Friction Pendulum (DFP) ve Triple Friction Pendulum (TFP) izolatörleri bulunmaktadır. DFP izolatörler, birbirine

bakan iki içbükey paslanmaz çelik yüzeyden oluşmaktadır. Yüzeyi metalik olmayan bir kayar malzeme (Teflon (PTFE)) ile kaplı olan mafsallı bir kayıcı, iki yüzeyi birbirinden ayırır (Fenz ve Constantinou, 2006). TFP izolatörlerde ise dört küresel kayma yüzeyi ve üç bağımsız sarkaç mekanizması bulunmaktadır. TFP, izolatörler arasında en uyarlanabilir davranışı vermektedir (Warn ve Ryan, 2012).

Ülkemizde de sismik izolasyon sistemleriyle ilgili teknik şartlar 2018'de yürürlüğe giren TBDY (2018)'deki Bölüm 14'de ele alınarak yapı standartlarımıza dahil edilmiştir (TBDY, 2018).

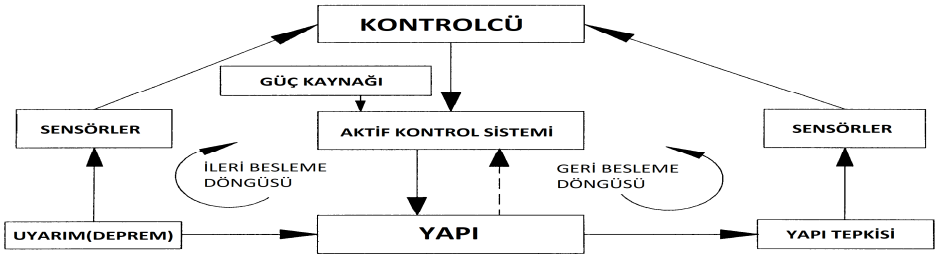
1.5.2. Yarı Aktif ve Aktif Sistemler

Yapısal koruma sistemlerinin en kompleksi yarı aktif ve aktif kontrol sistemleridir. Yarı aktif ve aktif yapısal kontrol, bir yapının hareketinin dış enerji kaynağı kullanan bir kontrol sisteminin hareketi vasıtasıyla kontrol edildiği veya değiştirildiği yapısal koruma yöntemleridir. Ancak yarı aktif sistemler mekanik (rijitlik, sürtünme katsayısı, viskozite) özelliklerini ayarlamak için sadece nominal miktarda enerjiye ihtiyaç duyarlar ve tam aktif sistemlerin aksine yapıya dış enerji etkitmezler. Son yıllarda rüzgâr ve sismik etkilerin hafifletilmesine özellikle vurgu yapılarak, yarı aktif ve aktif yapısal kontrol araştırmalarına büyük önem verilmiştir. Aktif ve yarı aktif koruma sistemleri günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte tasarlanıp, üretilmekte ve tam ölçekli yapılara uygulanabilmektedir. Tüm bu teknolojilerin yapısal tasarımda giderek daha önemli bir role sahip olması muhtemel olsa da pasif enerji dağıtım sistemleri de kullanılmaya devam etmektedir.

1.5.2.1. Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemleri, deprem uyarımlarının yapıda oluşturacağı deplasman ve ivmelerin azaltılabilmesi için anlık değişebilen kontrol kuvvetleri sağlayan sistemlerdir. Kontrol kuvvetleri, elektrohidrolik veya elektromekanik aktüatörler vasıtasıyla oluşturulmaktadır. Bu sistemlerin çalışması için aktüatörlerde gereken kuvvet ve ivmeyi sağlayabilecek büyük bir güç kaynağı gerekebilmektedir. Kontrol kuvvetleri, yapıya etkiyen deprem uyarımını ve/veya yapının kendi tepkisini ölçen sensörlerden gelen geri bildirime göre oluşturulmaktadır. Yapısal tepkiden gelen geri bildirim, aktif kontrol

sisteminin konumundan uzakta bulunan kontrolcü bir bilgisayar yardımıyla ölçülebilmektedir (Şekil 1.10) (Symans ve Constantinou, 1999).

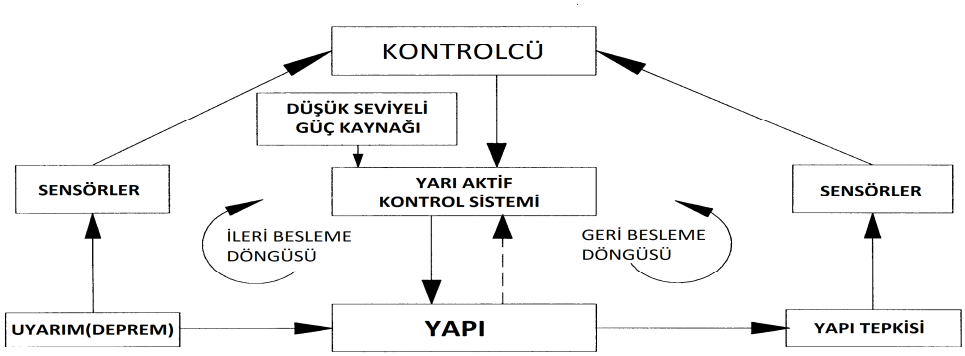


Şekil 1.10. Aktif Kontrolün şematik diyagramı (Symans ve Constantinou, 1999)

Bir aktif kontrol sistemi içindeki kontrol kuvvetleri tipik olarak, yapının ölçülen tepkisinden gelen geri besleme bilgisine ve/veya yapıya etkiyen uyarımdan gelen ileri besleme bilgisine dayalı olarak elektrohidrolik veya elektromekanik aktüatörler tarafından üretilmektedir. Yapısal tepki ve/veya deprem uyarımından kaydedilen ölçümler, aktüatörlerin önceden belirlenmiş bir kontrol algoritmasına göre çalışması için uygun kontrol sinyalini belirleyen bir kontrolcü (bilgisayar) tarafından izlenir. Elektrohidrolik aktüatörler tarafından kontrol kuvvetlerinin üretilmesi, küçük yapılar için onlarca kilovat mertebesinde olsa da, büyük yapılar için birkaç megavata ulaşabilen büyük güç kaynakları gerektirmektedir (Soong ve ark., 1991a). Deneysel olarak test edilen bazı aktif kontrol sistemlerinin birincil etkisi, rijitlikte küçük bir değişiklikle sönüm seviyesini değiştirmek olmuştur (Soong, 1990; Dyke ve ark., 1996). Aktif yapısal kontrole genel bir bakış çeşitli araştırmacılar tarafından sağlanmaktadır (Soong, 1990; Soong ve ark., 1991b; Fujino ve ark., 1996; Soong ve Costantinou, 2014).

1.5.2.2. Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Yarı aktif kontrol sistemi, çalışması için tipik olarak küçük bir harici güç kaynağı (örneğin bir pil veya akü) gerektiren ve yapının hareketinden faydalanarak kontrol kuvvetlerinin şiddetini geliştirmek için bu harici güç kaynağını kullanan bir sistem olarak tanımlanabilir. Kontrol kuvvetleri, yapıya gelen dinamik uyarımları ve/veya yapının bu uyarımlardan dolayı oluşan tepkisini ölçen sensörlerden gelen geri bildirime dayalı olarak geliştirilir (Symans ve Constantinou, 1999).



Şekil 1.11. Yarı aktif kontrolün şematik diyagramı (Symans ve Constantinou, 1999)

Yapısal tepkiden gelen geri bildirim, yarı aktif kontrol sisteminin konumundan uzak bir yerde bir kontrolcü ile ölçülebilir (Şekil 1.11).

Yarı aktif ve aktif kontrol sistemleri bazen hibrit kontrol sistemleri oluşturmak için pasif enerji yayma sitemleri ile birleştirilebilmektedir. Birleşik pasif-aktif cihazlardan veya birleşik pasif-yarı aktif cihazlardan oluşan hibrit kontrol sistemleri bazı çalışmalarda tanıtılmıştır (Nagarajaiah, 1994; Reinhorn, 1994; Symans ve Kelly, 1997).

Kontrol sistemi ve yapının bağımsız dinamik sistemler gibi davranmadığı, bunun yerine birbirleriyle etkileşime girdikleri göz önünde bulundurulmalıdır (Quast ve Sain, 1995). Bu kontrol sistem-yapı etkileşimi, şekillerde kontrol sistemi ve yapı arasındaki kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Ek olarak, deprem uyarımı ve yapı (zemin-yapı etkileşimi) arasında ve sensörler ve yapı arasında genellikle küçük bir etki olarak ortaya çıkan etkileşimler de meydana gelmektedir.

Yarı aktif bir kontrol sistemi genellikle mekanik özelliklerin ayarlanmasına izin vermek için daha sonra modifiye edilmiş bir pasif kontrol sisteminden kaynaklanır. Örneğin, viskoz akışkanın kesilmesi, akışkanın delinmesi ve kayma sürtünmesi yoluyla enerjiyi dağıtan tamamlayıcı enerji dağıtma cihazları, yarı aktif bir şekilde davranmak üzere modifiye edilmiştir. Bu sistemlerin mekanik özellikleri, uyarımdan ve/veya ölçülen yanıttan gelen geri bildirime dayalı olarak ayarlanabilir. Aktif bir kontrol sisteminde olduğu gibi, bir kontrolör geri besleme ölçümlerini izler ve yarı aktif cihazlar için uygun bir komut sinyali üretir. Bununla birlikte, pasif bir kontrol sisteminde olduğu gibi, kontrol kuvvetleri yapının kendi hareketinin bir sonucu olarak gelişir. Kontrol kuvvetleri, yarı aktif kontrol sisteminin mekanik özelliklerinin uygun (önceden belirlenmiş bir kontrol algoritmasına dayalı olarak) ayarlanması yoluyla geliştirilir. Ayrıca, birçok yarı aktif kontrol sistemindeki kontrol kuvvetleri, öncelikle yapısal sistemin hareketine karşı

hareket etmekte ve bu nedenle yapının genel stabilitesini desteklemektedir. Yarı aktif kontrol sistemlerinin çalışması için genellikle az miktarda (onlarca watt mertebesinde) harici güç gerektirmektedir (Symans ve Constantinou, 1999).

1.5.3. Pasif Enerji Yayma Sistemleri (Sönümleyiciler)

Yapısal uygulamalar için pasif enerji dağıtma cihazlarının araştırılması ve geliştirilmesi, kabaca 50 yıllık bir geçmişe sahiptir. Bir binanın üst yapısına dahil edildiğinde pasif enerji dağıtım cihazlarının temel işlevi, girdi enerjisinin bir kısmını absorbe etmek veya tüketmek, böylece birincil yapısal elemanlar üzerindeki enerji dağıtma talebini azaltmak ve olası yapısal hasarı en aza indirmektir. Ancak sismik izolasyondan farklı olarak, bu cihazlar depremlerden kaynaklanan hareketlerin yanı sıra rüzgâr kaynaklı hareketlere karşı da etkili olabilmektedir. Aktif kontrol sistemlerinin aksine, harici bir güç kaynağına da ihtiyaç yoktur (Constantinou ve ark., 1998).

Geleneksel sismik tasarımda, deprem sarsıntısı sırasında bir yapının kabul edilebilir performansı, yanal kuvvete direnen sistemin çok sayıda çevrim içinde enerjiyi kararlı bir şekilde absorbe etmesi ve dağıtılabilmesi üzerine kuruludur. Enerji dağıtımı, kirişlerin ve kolonların özel olarak detaylandırılmış sünek plastik mafsal bölgelerinde meydana gelir. Plastik mafsallar deprem esnasında momentlerin maksimuma ulaştığı kolon-kiriş uç bölgelerinde görülmektedir. Hasar, plastik mafsal bölgelerinde konsantre bir şekilde oluştuğundan, daha sonra bu bölgelerin tamiri genellikle mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte bu tasarım yaklaşımı, yapısal çöküşün önlenmesi, can güvenliğinin sağlanması ve ekonomik hususlar nedeniyle kabul edilebilir bir yaklaşımdır.

Geleneksel tasarım yaklaşımının uygulanabilir olmadığı durumlar da vardır. Önemli yapılarda (hastaneler, okullar, yönetim binaları vb.) olduğu gibi, bir yapının depremden sonra işlevsel kalması gerektiğinde geleneksel tasarım yaklaşımı uygun değildir. Bu gibi durumlarda, çok maliyetli bir yaklaşım olmasına rağmen, yapı elastik olmayan etkileri önleyecek veya minimum düzeyde tutacak yeterli güçte tasarlanmalıdır. Ayrıca bu tür yapılarda, sürekli hizmet verebilme kolaylığı için gerekli olan ikincil sistemlerin hasar görmesine veya arızalanmasına karşı koruma amaçlı özel önlemler alınmalıdır.

Bununla birlikte mevcut çok sayıda eski yapı yetersiz yanal mukavemete sahiptir ve sünek davranış için gereken detaylardan yoksundur. Bu yapıların sismik etkilere karşı rehabilitasyonu gereklidir. Bu rehabilitasyon geleneksel sismik tasarımla güçlendirerek

elde edilebilir, ancak çoğu zaman bu durum önemli bir maliyet getirir, pratik değildir ve yapıdaki mimari özelliklerin istenmeyen şekilde bozulmasına da sebep olur. Mimari özelliklerin istenmeyen şekilde bozulması da, önemli mimari özelliklere sahip tarihi yapıların sismik rehabilitasyonunda dikkat edilmesi gereken bir husustur (Constantinou ve ark., 1998).

Geleneksel tasarım yaklaşımı yanında, yapılarda depremden korunma sistemlerini içeren alternatif tasarım prosedürleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, sismik izolasyon sistemleri ve/veya ilave enerji dağıtma cihazları içeren sistemlerdir. Bu sistemlerin davranışlarının ve etkilerinin incelenebilmesi için yapı içindeki enerji dağılımı dikkate alınır. Deprem sırasında yapıya sonlu bir miktarda enerji (E) etkimektedir. Bu girdi enerjisi hem kinetik hem de potansiyel (gerilme) enerjiye dönüştürülür. Depremden dolayı meydana gelen girdi enerjisinin yapısal elemanlar tarafından sınırlı ölçülerde hasar görerek absorbe edilmesi veya ısıya dönüştürülerek dağıtılması gerekir. Tüm yapılarda sistemden enerji çeken ve dolayısıyla yapı hareketi durana kadar titreşimin genliğini azaltan bir miktar doğal sönümleme her zaman bulunmaktadır. Bunun yanında girdi enerjisinin bir kısmı yapının kendisi tarafından değil de bir tür ilave cihaz tarafından absorbe edilebiliyorsa, yapısal performans geliştirilebilir. Bu durum, enerjinin korunumu ilişkisi göz önünde bulundurularak aşağıdaki Denklem 1.15'deki gibi netleştirilebilir (Uang ve Bertero, 1988).

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \tag{1.15}$$

Burada E deprem hareketinden meydana gelen mutlak enerji girişi, E_k mutlak kinetik enerji, E_s geri kazanılabilir elastik gerinim enerjisi, E_h yapısal sistem tarafından elastik olmayan veya diğer hareket şekilleri ile dağıtılan geri döndürülemez enerji ve E_d ilave sönümleme cihazları tarafından dağıtılan enerjidir. Mutlak enerji girişi E, zemin üzerindeki temelin yer değiştirmesi sırasında üzerindeki toplam taban kesme kuvveti tarafından yapılan işi temsil eder. Başka bir deyişle E deprem hareketi sırasında yapıda oluşan atalet kuvvetlerinin etkisini içermektedir.

Geleneksel tasarım yaklaşımında, kabul edilebilir yapısal performans, elastik olmayan deformasyonların meydana gelmesiyle sağlanır. Bu durum, E_h 'nin miktarının artması ile doğrudan oluşan etkidir. Ayrıca elastik olmayan deformasyonların dolaylı bir etkisi daha vardır. Elastik olmayan deformasyonların meydana gelmesi, yapısal sistemin yumuşamasına neden olarak mutlak girdi enerjisini değiştirir. Artan esneklik, deprem

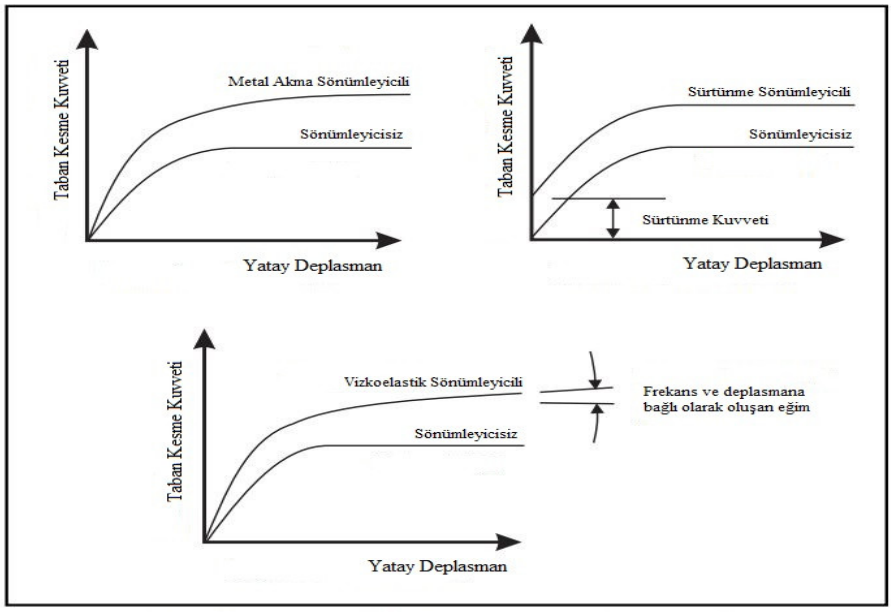
enerjisinin bir kısmını yansıtan bir filtre görevi görür. Sonuç olarak plastik mafsallardan uzak bölgelerde daha düşük ivmeler ve azalmış gerilmeler meydana gelmektedir.

Sismik izolasyon, bir yapının temelinde esneklik ve enerji yutma kabiliyeti ile karakterize edilen izolatörlerin kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Esneklik, tipik olarak 2 saniyelik bir periyotla ifade edilmektedir. 2 saniyelik periyoda sahip binadaki esneklik, elastik olmayan hareketin önlenmesi ve deprem enerjisinin büyük bir bölümünü tüketebilmek için yeterlidir. İzolasyon sistemindeki enerji dağıtımı, yer değiştirme tepkisini sınırlamada ve rezonanslardan kaçınmada faydalıdır. Ancak uzun periyotlu sismik dalga bileşenleri açısından zengin depremlerde, deprem enerjisinin yansıması için yeterli esnekliği sağlamak mümkün olmamaktadır. Bu durumda, enerji dağıtımı önemli bir rol oynar. (Constantinou ve ark., 1998).

Deprem tepki performansını ve hasar kontrolünü iyileştirmeye yönelik başka bir yaklaşım, sönümleyici olarak bilinen ilave enerji dağıtım sistemleridir. Bu sistemlerde mekanik cihazlar yapı çerçevesine dahil edilerek yapının yüksekliği boyunca enerji tüketim kabiliyeti geliştirilmektedir. Sönümleyici cihazların çalışma prensibine göre enerjinin dağıtılmasının yolu yumuşak çeliğin veya başka bir metalin akması, kayma sürtünmesi, viskoz bir sıvı içinde bir pistonun veya bir plakanın hareketi, sıvının bir orifisten geçişi veya polimerik malzemelerde viskoelastik hareket gibi enerji tüketen olaylardır.

Sismik bir değerlendirmenin sonucunda, bir binada yapısal esnekliğe bağlı aşırı deformasyonlara neden olan eksiklikler bulunuyorsa, ilave enerji dağıtma cihazlarının montajı etkili bir rehabilitasyon stratejisi olabilmektedir. Mevcut birçok teknoloji, yer hareketinden dolayı bir yapıya etkiyen enerjinin, özel cihazların (akışkan viskoz damperler (hidrolik silindirler), metalik akma plakaları veya sürtünme pedleri) hareketi ile kontrollü bir şekilde dağıtılmasına olanak tanımaktadır. Bu şekilde yapıdaki yer değiştirmelerde genel bir azalma meydana gelmektedir. En yaygın olarak kullanılan sönümleyici cihazlar enerjiyi; sürtünme, histeretik veya viskoelastik süreçler vasıtasıyla dağıtmaktadır. Sönümleyici cihazların kayda değer miktarda enerjiyi dağıtması için, önemli yanal yer değiştirmeler yapmasını gerektiren yapı deformasyonuna maruz kalması gerekmektedir. Bu nedenle, bu sistemler nispeten esnek ve daha az miktarda esnek olmayan deformasyon kapasitesine sahip yapılarda daha etkilidir. Sönümleyici cihazların yapılarda en yaygın kullanımı braket destekli çerçevelerin bileşenleri şeklindedir. Cihazın özelliklerine bağlı olarak enerji dağıtma kapasitesinin (sönümleme) yanında, ayrıca yapıya statik veya dinamik rijitlik sağlamaktadır. Bazı durumlarda,

yapısal yer değiştirmeler azaltılsa da yapıya etkiyen kuvvetler artabilmektedir (FEMA356, 2000).



Şekil 1.12. Enerji dağıtma sistemlerinin bir yapının kuvvet-deplasman eğrilerine etkisi (Constantinou ve ark., 1998)

Bazı enerji dağıtma cihazları, bir yapının birim göreli ötelenme başına enerji dağıtma kapasitesini artırmanın yanı sıra, yapıda mukavemeti ve rijitliği de artırmaktadır. Bu tür sistemler metal akma, sürtünme ve viskoelastik sönümleyiciler gibi enerji dağıtma cihazlarını içermektedir. Akışkan viskoz sönümleyiciler kullanan enerji dağıtma sistemleri ise deprem hareketinin frekansı yüksek olmadığı sürece genellikle bir yapının mukavemetini veya rijitliğini artırmaz. Örneğin, Şekil 1.12, enerji dağıtma sistemleri (EDS) olan ve olmayan basit tek katlı bir yapının kuvvet deformasyon eğrilerini göstermektedir. Eğrilerin, sismik tehlike azaltma uygulamalarında olması beklendiği gibi, elastik olmayan aralığa daha iyi uzandığı gösterilmiştir. Genel olarak, bir enerji dağıtma sisteminin eklenmesi, göreli ötelenmede bir azalmaya ve dolayısıyla hasarın azalmasına (enerji dağıtımına bağlı olarak) ve yapıya uygulanan toplam yatay kesme kuvvetinin bir miktar artmasına (artan mukavemet ve / veya rijitlik nedeniyle) neden olacaktır. Hem ötelenme hem de toplam yatay kesme kuvvetinin azaltılması, deformasyonların elastik sınırın altındaki seviyelere düşürülmesiyle sağlanabilir (Constantinou ve ark., 1998).

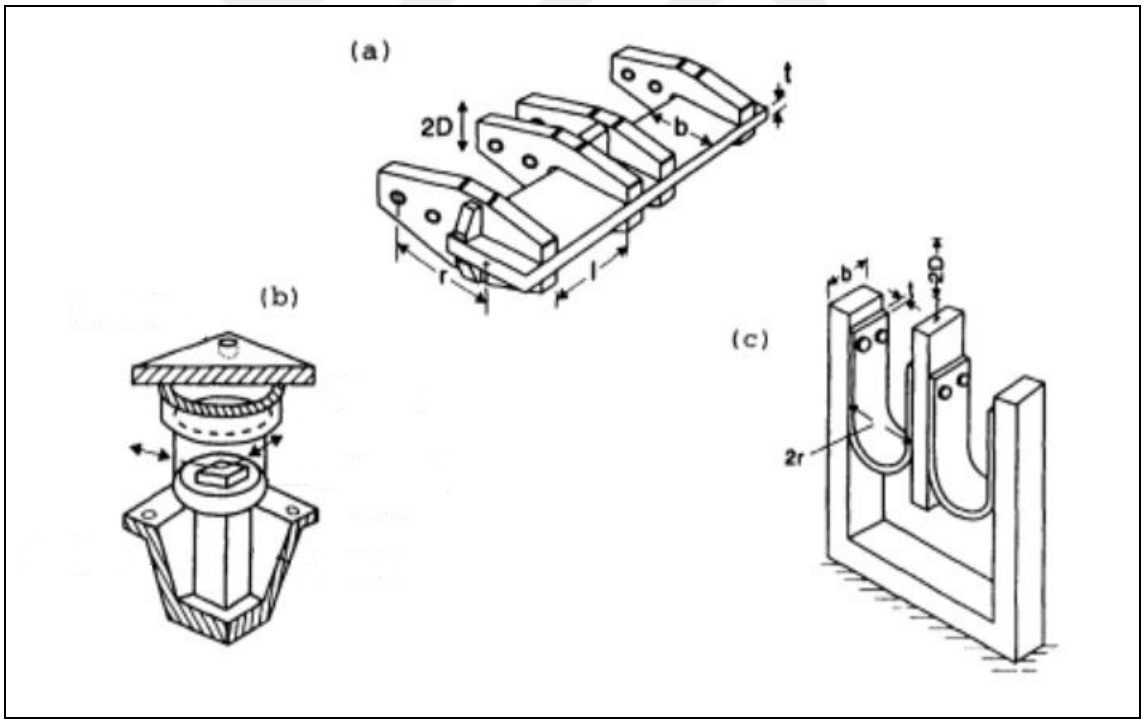
Pasif enerji dağıtım cihazlarının (sönümleyiciler) çalışma şekilleri ve enerji tüketim mekanizması farklılıkları nedeniyle birçok çeşidi vardır. Bunlar; sismik izolasyon sistemleri (izolatörler), metal akma sönümleyicileri, viskoz akışkanlı sönümleyiciler, viskoelastik sönümleyiciler, sürtünmeli sönümleyiciler, şekil hafızalı

alaşım sönümleyiciler, ayarlı kütle sönümleyicileri, ayarlı sıvı sönümleyiciler ve olmak üzere sekiz grupta toplanabilir.

1.5.3.1. Metal Akma Sönümleyicileri

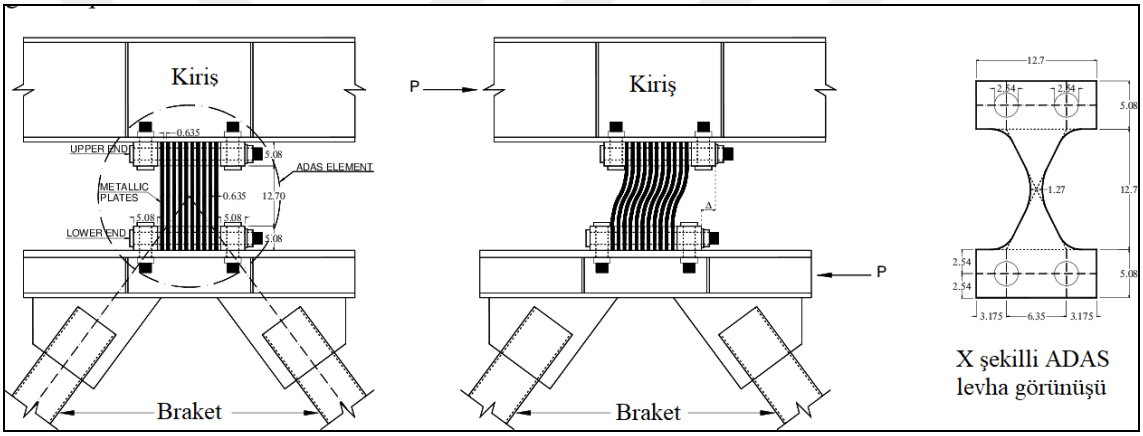
Ek enerji dağıtma cihazı olarak metalik sönümleyicinin kullanılması, sismik dirençli tasarımda benimsenen en eski yaklaşımlardan biridir. Bilindiği gibi doğal süreçlerde enerji tüketimi yaratan olaylardan biri de materyallerin şekil değiştirme (faz değişimi ve akma) süreçleridir. Bu tür sönümleyiciler metallerin elastik ötesi şekil değişimi yaparken enerji tüketmesinden yararlanılarak üretilmiştir.

Sismik enerjiyi absorbe etmek için yapılarda metalik enerji tüketim mekanizmaları kullanma fikri, Kelly ve ark. (1972) ve Skinner ve ark. (1974) tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile başlamıştır. Şekil …'de Skinner ve arkadaşları tarafından ele alınan cihazların şematik olarak gösterildiği burulma kirişi, eğilme kirişi ve U-şeridi sönümleyicileri içermektedir.



Şekil 1.13. Metalik Sönümleyici Geometrileri a) Burulma Kirişi, b) Eğilme Kirişi, c) U-şeridi (Kelly ve ark., 1972; Skinner ve ark., 1974)

ADAS (Added Damping and Stiffness) sönümleyiciler ve U şekilli metal akma sönümleyiciler sismik tasarımda yaygın olarak kullanılan metalik sönümleyicilerdendir (Şekil 1.14). Yan yana çeşitli şekillere (X şekilli, üçgen, dikdörtgen vb.) sahip çelik ya da farklı türde metal levhaların, iki ucundan nispi hareket eden parçalara bağlanarak (örneğin çerçeve kirişi ve braket destekler arasında) şekil değişimine zorlanması ve bu metal parçaların ilerleyen safhalarda akması enerji tüketimine neden olan bir mekanizmadır. Sönümleyiciler nominal aktivasyon yükü ile şekil değişimine başlayacak ve binanın akmasından çok önce akacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu nedenle, sönümleyicinin erken akması yapısal elemanlarda elastik olmayan ötelenmeyi önlemek için iyi bir yoldur (Whittaker ve ark., 1988).

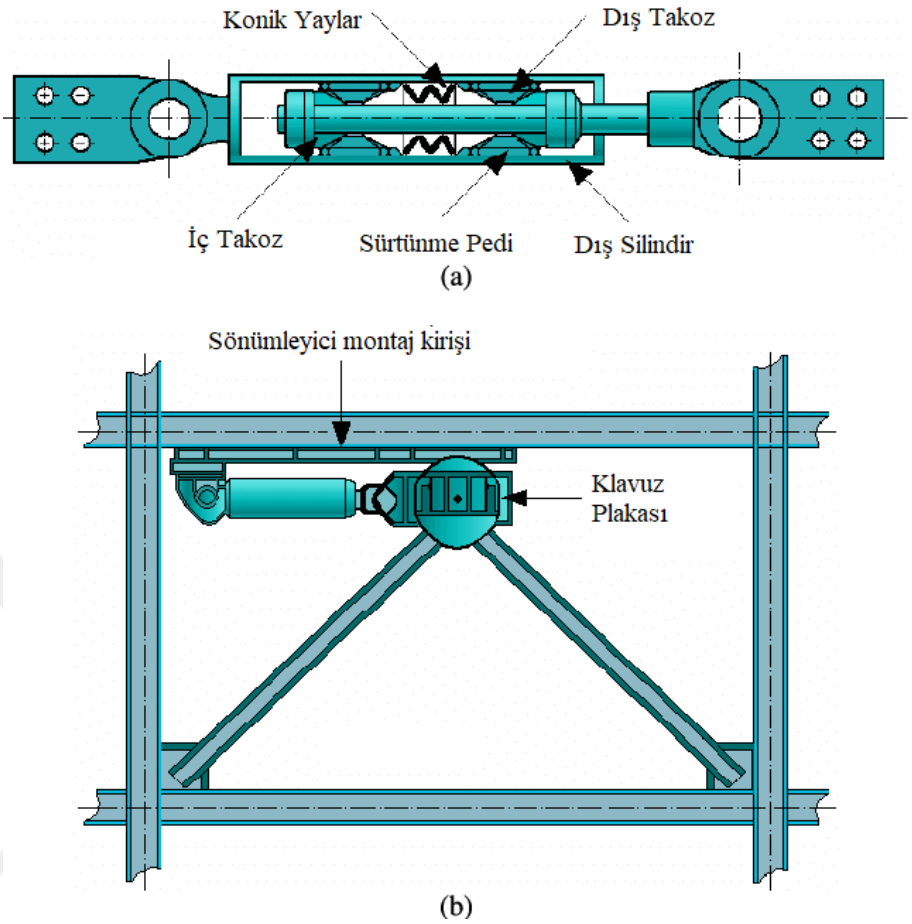


Şekil 1.14. X şekilli ADAS elemanının çalışma şekli ve görünüşü (Alehashem ve ark., 2008)

1.5.3.2. Sumitomo Sürtünme Sönümleyici

Sumitomo Metal Industries, yapı mühendisliği alanında sönümleyici üretmeden önce Japonya'da yıllar boyu demiryolu uygulamaları için sürtünme sönümleyicileri üreten bir şirkettir. Şirket, daha sonra sürtünme esaslı ürettiği sönümleyicileri yapı mühendisliğinde kullanılabilecek şekilde geliştirmiştir. Sumitomo sönümleyicilerin ilk yapısal uygulamaları Japonya'daki iki yüksek bina olmuştur. Sumitomo sönümleyiciler bu yüksek binalardaki yer kaynaklı titreşimleri ve küçük yer sarsıntılarından kaynaklanan tepkiyi azaltmak için kullanılmıştır. Uygulamanın yapıldığı bu yapılar 31 ve 22 katlı çelik çerçeveli yapılardır. Ayrıca daha sonra Tokyo'da bulunan sismik olarak izole edilmiş 6 katlı başka bir binada kullanılan Sumitomo sönümleyiciler enerji yutma

cihazları olarak sismik izolasyon sistemine dahil edilmiştir(Constantinou ve Symans, 1993b).



Şekil 1.15. a) Sumitomo sürtünme sönümleyici boy kesiti b) Sumitomo sürtünme sönümleyicinin chevron braket üzerinde çerçeveye uygulanması (Aiken ve Kelly, 1990; Atam, 2018)

Şekil 1.15'de tipik bir Sumitomo sürtünme sönümleyicinin yapısı ve çerçeveye uygulanması gösterilmektedir. Cihaz, dış çelik kasası ile temas halinde olan grafit ile emprenye edilmiş bakır pedlerden oluşur. Temas yüzeyindeki yük, konik yayların (Belleville rondelası) sıkıştırması altında hareket eden bir dizi takoz tarafından uygulanmaktadır. Emprenye grafit, temas yüzeyinde yağlama, kararlı bir sürtünme katsayısı ve sessiz çalışma özelliği sağlamaktadır.

Sumitomo sönümleyicinin deneysel bir çalışması Aiken ve Kelly (1990) tarafından rapor edilmiştir. Çalışmada Sumitomo sönümleyiciler 9 katlı bir model bir yapıya yerleştirilmiş ve bir sarsma tablası üzerinde deprem simülasyonu testleri yapılmıştır. Sönümleyiciler, beklenenin aksine diyagonal bir braket eleman gibi monte edilmemiştir. Bunun yerine sönümleyiciler, Şekil1.15b'de gösterildiği gibi bir ucu üstteki bir döşeme kirişine ve diğer ucu aşağıdaki döşeme kirişine bağlı olan bir chevron braket düzenlemesine bağlı olacak şekilde döşeme kirişlerine paralel olarak

yerleştirilmiştir. Chevron braket kesitleri çok rijit olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, cihazın yanal olarak yüklenmesini önlemek için her bir sönümleyicinin chevron brakete bağlantısında kılavuz plakası bulunan özel bir düzenleme kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada Sumitomo sönümleyiciler, Pall tipi sürtünme sönümleyici cihazlarının çalışmasına benzer sonuçlar vermiştir. Genel olarak, deplasmanlar moment dirençli boş çerçevelere kıyasla azaltılmıştır. Ayrıca deneylerde kaydedilen taban kesme kuvvetleri moment dirençli boş çerçevenin taban kesme kuvvetleriyle aynı olduğu görülmüştür. Ancak sürtünme sönümlemeli çerçeveler, deprem enerjisini mekanik yollarla dağıtırken, yalın çerçeve deprem enerjisini doğrusal olmayan hareketle tüketmektedir (Constantinou ve Symans, 1993b).

1.5.3.3. Viskoz Sıvı Sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler, yapıları rüzgâr ve depremin dinamik tahriklerine, ve patlama etkilerine karşı koruyabilen cihazlardır. Viskoz sönümleyici teknolojisi, askeri ve havacılık uygulamalarında ortaya çıkmıştır. Viskoz sıvı sönümleyiciler, füze sistemlerini nükleer saldırıya karşı korumak için veya denizaltıları yakınlarındaki olası su altı patlamalarına karşı korumak için enerji absorbe etme amaçlı kullanılmıştır. 1990'larda, bu sistem ve araçlarda kullanılan viskoz sıvı sönümleyicilerin binaları, köprüleri ve diğer yapıları da yıkıcı şok ve titreşimden koruyabileceği keşfedilmiştir (Constantinou ve Symans, 1993a), (Lee ve Taylor, 2001).

Viskoz sönümleyiciler, deprem enerjisini tüketmenin bir yolu olarak geleneksel binalarda meydana gelen yapısal akma veya göçmeye bir alternatif sunmaktadır. Viskoz sönümleyiciler, neredeyse tüm deprem enerjisini absorbe ederek binayı bir depremden sonra hasar almadan hemen kullanıma hazır hale getirebilen cihazlardır.

Viskoz sönümleyiciler, yapı hareketine direnen bir kuvvet sağlamaktadır. Bu kuvvet, sönümleyicinin uçları arasındaki hareketin bağıl hızı ile orantılıdır. Viskoz sıvı sönümleyicilerde geçerli olan sönümleme yasası aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F = C * V^N \tag{1.16}$$

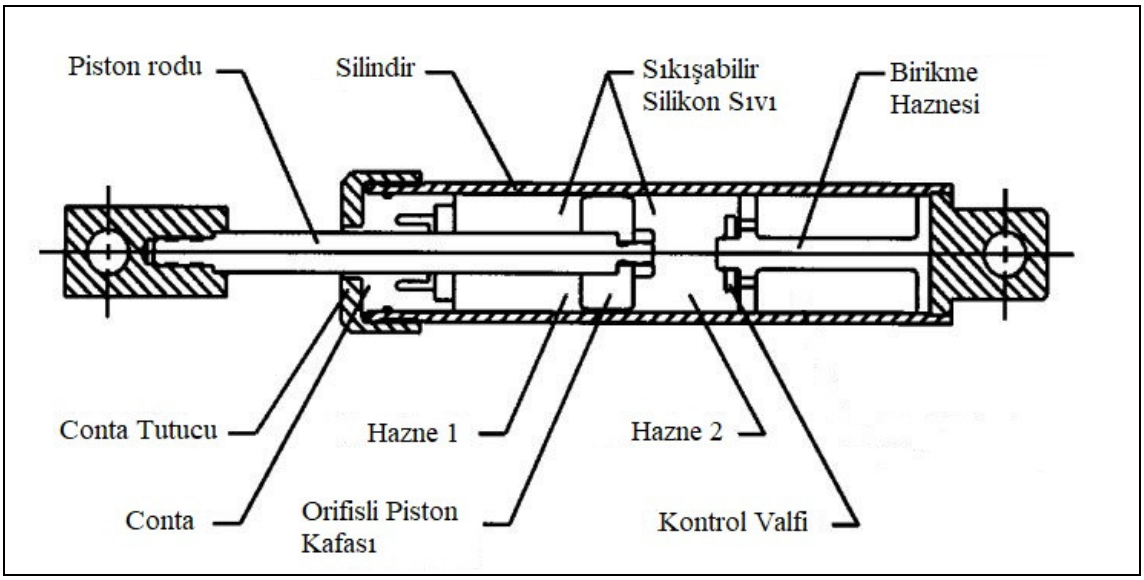
F sönümleme kuvveti,

C herhangi bir sabit (C tüm hız aralığında sabit kalır),

V hız,

N 0,3 ile 1,95 arasında değişebilen bir üs sayısıdır (N tüm hız aralığında sabit kalır). N üs sayısı genellikle 0,3-1,0 arasındaki bir sayı alınır, 1,0 üstündeki değerler için sönümleyici performansı düşüktür.

Yukarıdaki denklemde yay kuvveti olmadığı görülmektedir. Viskoz sıvı sönümleyicilerde sönümleme kuvveti yalnızca hız ile değişmektedir. Viskoz sönümleyiciler geri yükleme kuvveti sağlamamaktadır. Bu nedenle, yapının kendisi tüm statik yatay yüklere dayanmalıdır (Lee ve Taylor, 2001).



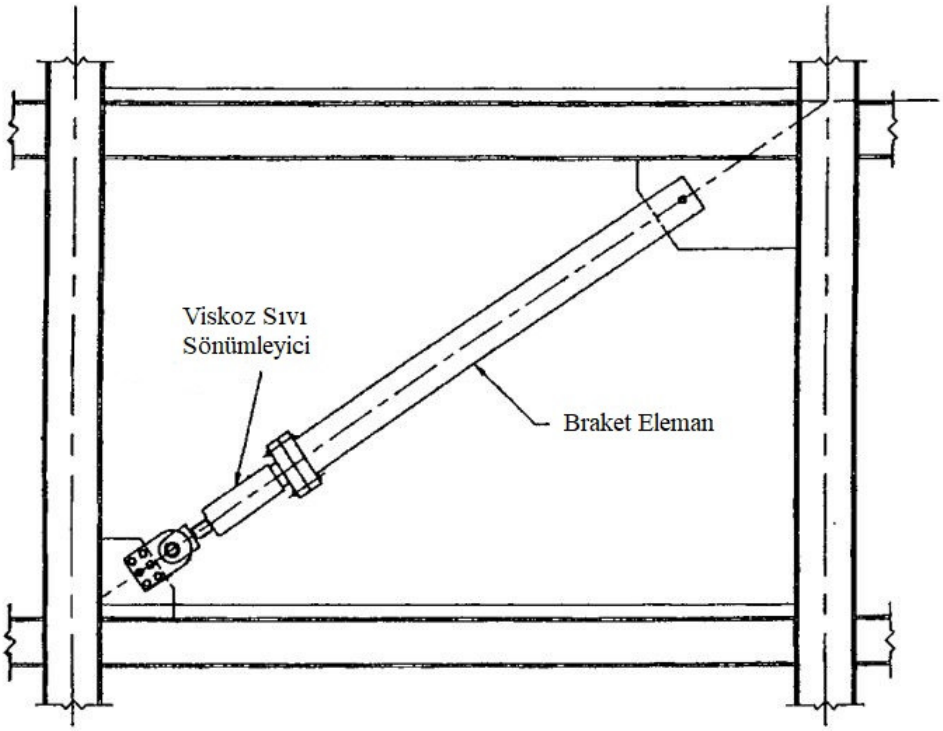
Şekil 1.16. Tipik viskoz sıvı sönümleyici boy kesiti (Lee ve Taylor, 2001)

Şekil 1.16'da tipik bir viskoz sıvı sönümleyici gösterilmektedir. Merkezi bir piston, viskoz sıvı dolu bir hazneden geçer. Piston ileri hareket ettikçe, sıvıyı piston kafasının üstündeki orifislerden geçmesi için sıkıştırır. Bu bölgede sıvı hızı çok yüksektir, bu nedenle akışın basınç enerjisi neredeyse tamamen kinetik enerjiye dönüşür. Sıvı daha sonra piston kafasının diğer tarafındaki tam hacme genişlediğinde yavaşlar ve kinetik enerjisini türbülansla kaybeder. Piston kafasının sıkıştırdığı taraftaki tam basınca kıyasla, sıvının hareket ederek dolduğu tarafta çok az basınç vardır. Basınçlardaki bu fark, sönümleyicinin hareketine direnen büyük bir kuvvet üretmektedir.

Viskoz sıvı sönümleyiciler doğru şekilde tasarlanıp üretildiğinde, kullanım ömrü boyunca sıvı sızıntısı meydana gelmemektedir. Böyle bir durumda sönümleyici haznelerini sıvı ile dolu tutmak için akümülatör veya harici sıvı depolama cihazı gerekmemektedir. Doğru tasarlanmış ve imal edilmiş bir viskoz sıvı sönümleyicide zamanla eskiyecek veya bozulacak bileşenler bulunmamaktadır, bu nedenle bu tip sönümleyicilerin beklenen hizmet süresinde pratik bir sınır yoktur. Viskoz sıvı olarak

çoğu durumda, uygun sıvı performansını ve kararlılığını sağlamak için silikon bazlı sıvılar kullanılmaktadır. Çünkü sıvı, enerjiyi iç sürtünme ve türbülans ile tüketirken ısınmakta ve viskoz kararlılığını kaybedebilmektedir. Silikon bazlı yağlar bu konuda en az problem yaratan viskoz sıvılardır.

Viskoz sıvı sönümleyiciler, taban izolatörlerine paralel olarak, diyagonal elemanlar olarak (Şekil 1.17), bir chevron braketin doğrultusunda bileşeni olarak, yatay olarak bir chevron braket üstüne veya yatay olarak bitişik yapılar arasına monte edilebilmektedir. Viskoz sıvı sönümleyici hareketini büyütmek için özel bir bağlantı sistemi kullanmak da mümkündür. Bu düzenlemeye "toggle brace" adı verilmektedir ve dinamik yükleme altında çok az deplasmana sahip olan yapılarda kullanılmaktadır.



Şekil 1.17. Viskoz sıvı sönümleyicinin çerçevede diyagonal yerleşimi (Lee ve Taylor, 2001)

Denklem 1.16'daki N=1,0 değeri için sönümleme doğrusaldır, bu durumda viskoz sıvı sönümleyicinin histerezis eğrileri dikdörtgen bir şekle yakındır. Doğrusal sönümlemenin analizi kolaydır ve çoğu analiz yazılımı tarafından işlenebilmektedir. Ayrıca, doğrusal sönümlemenin bir yapıdaki daha yüksek modları harekete geçirmesi olası değildir. Doğrusal sönümlemenin diğer bir avantajı da sönümleme kuvvetleri ile bir binadaki yapısal kuvvetler arasında çok az etkileşim olmasıdır. Sönümleme kuvvetleri sıfır olduğunda yapısal kuvvetler maksimum olmakta, yapısal kuvvetler sıfır olduğunda sönümleme kuvvetleri maksimum değere ulaşmaktadır.

1,0>N>0,3 durumundaki doğrusal olmayan sönümleme, dikdörtgene çok daha yakın bir histerezis eğrisi gösterir ve sönümleme kuvvetleri, yapısal kuvvetlerin üzerine binme eğilimindedir. Ek olarak, doğrusal olmayan sönümleme bir yapıdaki daha yüksek modları harekete geçirebilmektedir.

Plastik mafsal oluşumunu tamamen önlemek için yeterli viskoz sönümleme sağlamak teorik olarak mümkündür. Bu durumda tamamen doğrusal bir yapı sağlanmaktadır. Ekonomik olarak, bir miktar plastik mafsal oluşumuna izin vermek toplam maliyeti düşük tutacağından daha mantıklıdır. Viskoz sönümleyiciler, en kötü depremde bile ”Hemen Kullanım” (IO) performans seviyesini sağlamak için katlar arası ötelenmeyi yeterince sınırlandırabilmektedir. Ayrıca viskoz sıvı sönümleyiciler, binada oluşacak plastik mafsalların derecesini sınırlayıp kontrol ettiği gibi, taban kesme kuvveti ve katlar arası kesme kuvvetini büyük ölçüde azaltmaktadır (Lee ve Taylor, 2001).

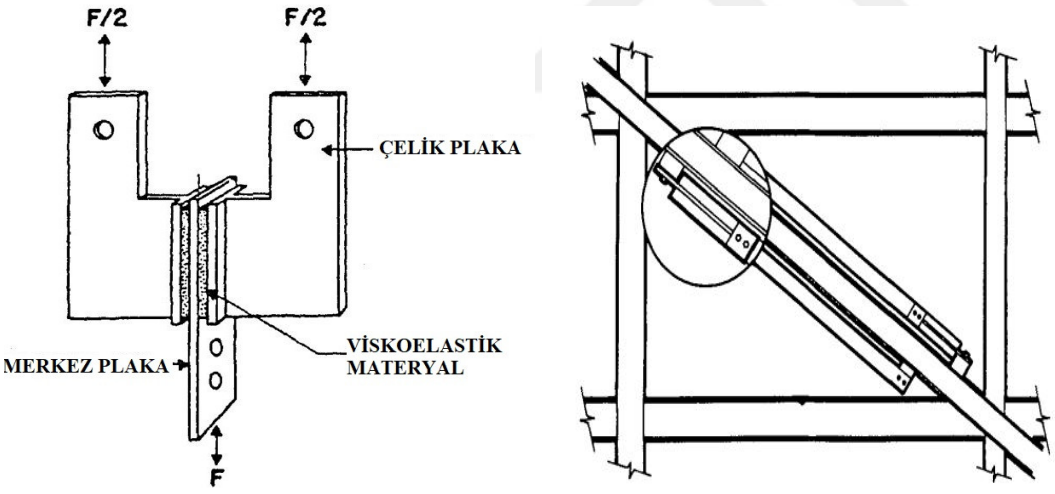
Son yıllarda viskoz sıvı sönümleyicileri elektronik olarak kontrol edilen bir sönümleme katsayısına sahip "akıllı sönümleyiciler" (smart dampers) üzerinde çalışılmaktadır. Bu sönümleyiciler, bir yapının dinamik tepkisini en aza indirmek için sönüm derecelerini değiştirebilmektedir. Akıllı sönümleyicilerde, sönümlemeyi adım adım değiştirebilmek için solenoid valfler veya sürekli değişken sönüm sağlayabilmek için reolojik (MR-manyetoreolojik sıvılar, ER-elektroreolojik sıvılar) sıvılar kullanılmaktadır. Yalnız, akıllı sönümleyiciler, harici güç ve kontrol sistemleri gerektirdiğinden, bir elektrik kesintisi durumunda 'arıza emniyetli' davranış sergileyecek şekilde tasarlanmalıdır (Lee ve Taylor, 2001).

1.5.3.4. Viskoelastik Sönümleyiciler

Viskoelastik malzemeler, viskoelastik (VE) sönümleyici adı verilen bir enerji dağıtma cihazının geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Viskoelastik sönümleyicilerin ilk uygulamaları, yüksek binalarda rüzgar kaynaklı tepkinin etkili bir şekilde azaltılması başarıyla kullanılmıştır (Keel ve Mahmoodi, 1986). Sismik performansı artırmak için binalara viskoelastik (VE) sönümleyiciler de uygulanabilmektedir. Daha sonra yapılan viskoelastik sönümleyici çalışmalarında bu tür cihazların depreme dayanıklılık amacıyla binalara uygulanmasına yönelik araştırmalar yürütülmüştür. Hem analitik hem de deneysel çalışmalar binaya viskoelastik sönümleyiciler eklenmesi halinde, binanın deprem uyarımına tepkilerinde önemli bir azalmanın sağlanabileceğini göstermiştir (Lin ve ark., 1988), (Zhang ve ark., 1989).

Bu cihazların bir binaya dahil edilmesi, önemli miktarda titreşim enerjisini absorbe ederek yapının dinamik performansını artırabilmektedir. Viskoelastik malzemelerin mekanik özellikleri oldukça karmaşıktır ve ortam sıcaklığı ve hareketin frekansı ile değişebilmektedir. Bu nedenlerle VE sönümleyicilerin özelliklerini belirlemek için farklı araştırmacılar tarafından bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda deprem kaynaklı yapısal tepkileri azaltmak için viskoelastik sönümleyicilerin kullanılmasının uygulanabilirliği deneysel olarak incelenmiştir.

Lin ve ark. (1988) tarafından yapılan bir çalışmada, tek serbestlik dereceli yapıyı ve üç serbestlik dereceli yapıyı simüle eden model binalar kullanılarak iki dizi deney yapılmıştır. Çalışmada ötelenmelerdeki ve ivmelerdeki azalmalar, model binaya eklenen viskoelastik sönümleyicilerin etkinliğinin ölçüsü olarak kullanılmıştır. Sönümleyicilerin sıcaklığa bağlılığı, sönümleyicinin çerçeve üstündeki yerleştirme problemi ile birlikte incelenmiştir. Deney sonuçları, viskoelastik sönümleyicilerin eklenmesiyle sismik koşullar altında yapısal performansın önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Sönümleyici etkinliğinin büyük ölçüde çevre sıcaklığına bağlı olduğu görülmüştür. Sönümleyicilerin yapı içindeki yerleşimlerinin önemi ve farklılıkları da vurgulanmıştır.



Şekil 1.18. a) Tipik VE sönümleyici b) VE sönümleyicinin çerçeveye diyagonal yerleşimi (Zhang ve ark., 1989)

Zhang ve ark. (1989) tarafından, yine aynı tip ve özelliklere sahip VE sönümleyicilerin modelleri kullanılarak ve modal bir yaklaşım izlenerek yaptıkları çalışmada VE sönümleyicilerin deprem etkileri altında etkili olabileceği gösterilmiştir. VE sönümleyicilerin eklenmesiyle, dikkate alınan tüm modlarda modal sönümleme oranlarında önemli bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. VE sönümleyicilerin binaya eklenmesiyle yapısal rijitliğin de arttığı ama bu rijitlik artışının tek başına bina performansını iyileştiremediği sonucuna varılmıştır.

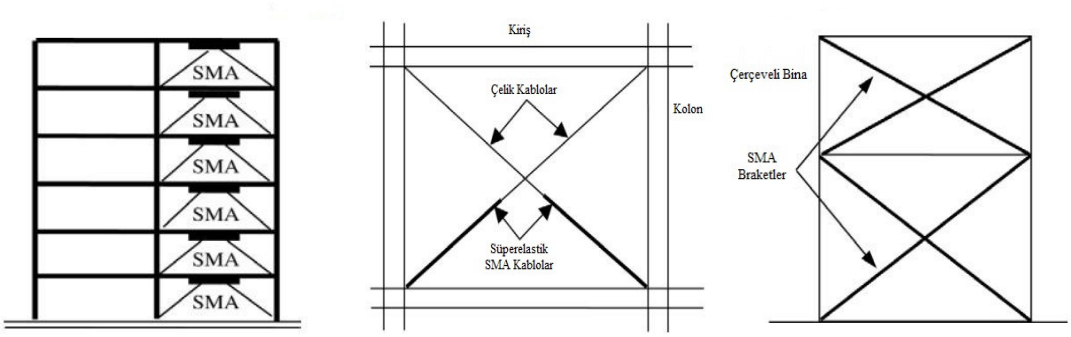
Viskoelastik malzemelerin özellikleri, frekans ve sıcaklığın karmaşık fonksiyonlarıdır. Örneğin, sıcaklık artışı viskoelastik malzemenin kayma modülünü azaltabilmektedir. Bu durumda VE sönümleyicilerdeki viskoelastik materyal kalınlığı gibi boyutlarda kısıtlamalar göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 1.18'de tipik VE sönümleyici ve sönümleyicinin çerçeveye diyagonal yerleşimi gösterilmiştir.

1.5.3.5. Şekil Hafızalı Alaşım Sönümleyiciler

Bazı alaşımlar (erime yoluyla birleşen metal-metal karışımı) belirli bir sıcaklığın üzerine ısıtıldığında, alaşımda daha önce mekanik etkilerle ortaya çıkmış plastik şekil değiştirme tamamen geri kazanılabilmektedir. Bu fenomen 1950'li yılların ilk yarısından bu yana Au-Cd, In-Tl, Cu-AI-Ni, Ti-Ni alaşımlarında gözlemlenmiştir ve bu alaşımlar şekil hafızalı alaşım (SMA) olarak isimlendirilmiştir (Tadaki ve ark., 1988).

Şekil hafızalı alaşımlar (SMA), yeni bir fonksiyonel malzemedir ve birçok alanda geliştirilen uygulamaları olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da yapısal kontrol için kullanılmaktadır. SMA malzemelerin, şekil hafıza etkisi (SME) ve psödoelastisite olmak üzere iki ana özelliği bulunmaktadır. Bu özellikler alaşımın termal veya stres kaynaklı tersinir histeretik faz dönüşümü ile ilişkili özelliklerdir. Bu benzersiz özellikler, SMA'nın yapı kontrolü için aktüatörler, pasif enerji dağıtıcılar ve sönümleyiciler olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Song ve ark., 2006).

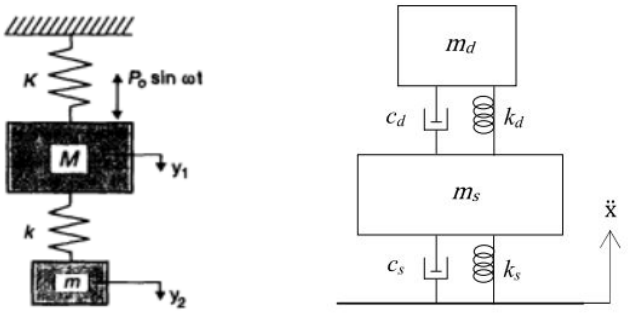
SMA alaşımlar arasında yaygın olarak kullanılan Nitinol (Ti-Ni alaşımı) ile üretilmiş süper elastik SMA tellerinin enerji dağıtımı özellikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Dolce ve Cardone (2001) yaptıkları çalışmada çekmeye maruz kalan süper elastik Nitinol tellerini incelemiştir. Çalışma sonucunda Nitinol tellerin sönümleme kapasitesinin sıcaklığa, yükleme frekansına ve yükleme döngülerinin sayısına bağlı olduğunu gözlemlenmiştir. Nitinol ve diğer SMA alaşımlar, eksenel yükleme döngüleri sırasında gerilim-şekil değiştirme eğrilerinde güçlü histeretik etkiler göstermekte ve enerji harcamaktadır. Bu durum geri merkezleme özelliği bulunan pasif sönümleme cihazlarının geliştirilmesi için SMA alaşımları kullanmayı olanaklı kılmaktadır. SMA alaşımlar pasif yapı kontrolünde izolasyon sistemlerinde ve enerji dağıtma sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabilmektedir (Şekil 1.19) (Dolce ve Cardone, 2001; Song ve ark., 2006)



Şekil 1.19. SMA malzemelerin pasif kontrol sistemlerde kullanımının şematik gösterimleri a) SMA sönümleyici b) SMA kablo braketli sistem c) SMA braketli sistem

1.5.3.6. Ayarlı Kütle ve Sıvı Sönümleyiciler

Ayarlı bir kütle sönümleyicinin bir binaya dahil edilmesinde amaç, diğer sönümleyici cihazlarında da olduğu gibi yapıya etkiyen dinamik dış kuvvetlerin etkisi altında yapısal elemanlara gelen enerji dağıtma talebini azaltmaktır. Bu azalma, yapısal titreşim enerjisinin bir kısmının ana yapıya eklenmiş bir ayarlı kütle sönümleyiciye (TMD) aktarılmasıyla gerçekleştirilmektedir. TMD, en basit haliyle kütle-yay-dashpot bileşenlerinden oluşan bir cihazdır (Şekil 1.20b). TMD'nin ilk örneği, ilk defa gemilerde sevk makinelerinden ve pervanelerden kaynaklanan periyodik titreşim kuvvetleri nedeniyle meydana gelen titreşimleri sönümlemek ve rezonansları engellemek için Frahm tarafından önerilmiştir. Önerilen sistem için 1909 yılında USA'da patent alınmıştır (Frahm, 1911). Frahm tarafından önerilen TMD sönümleyicinin şematik görünüşü Şekil 1.20a'da gösterilmiştir. Günümüzde binalarda kullanılan ayarlı kütle sönümleyicileri; geleneksel TMD'ler, sarkaç PTMD'ler, çift yönlü BTMD'ler ve ayarlanmış sıvı kolonu TLCD'ler olmak üzere dört farklı versiyondan oluşmaktadır(Gutierrez Soto ve Adeli, 2013), (Soong ve Dargush, 1997).



Şekil 1.20. a) Frahm'ın önerdiği TMD şeması (Frahm, 1911; Soong ve Dargush, 1997) b) TMD uygulanmış SDOF sistem şeması (Gutierrez Soto ve Adeli, 2013)

Şekil 1.20a'da verilen şemadaki TMD'li sistem düzeneği, yay rijitliği K olan ana kütle M'ye, k yay rijitliğine sahip bir yay ile bağlı olan m küçük kütlesinden oluşmaktadır. Basit bir harmonik yük altında, sönümleyicinin doğal frekansı (k/m) tüm sisteme etkiyen hareketin frekansı olarak ayarlandığında M ana kütlesi tamamen sabit tutulabilmektedir (Soong ve Dargush, 1997).

Ayarlanmış bir sıvı sönümleyici (TLD), ayarlı kütlenin sıvı, genellikle de su ile değiştirildiği bir TMD türüdür. Bu tip sönümleyicilerde su, yatay segmentte orifisi olan bir tüpte veya ortasında bir geçiş kapısı ve kapı üzerinde bir yarık bulunan bir tankta olabilmektedir. Boru veya tanktaki suyun çalkalanması, dış titreşimlerin etkilerini dengeler. TLCD'nin arkasındaki konsept yeni değildir, uzun yıllardır gemi yapılarını dalgaların dinamik etkisini stabilize etmek için kullanılmıştır, ancak binalardaki uygulaması ilk olarak Saoka ve ark. (1988), Sakai (1989) tarafından önerilmiştir (Soong ve Dargush, 1997).

Geleneksel TMD' nin avantajı, yerleşik bir teknoloji olması ve çok yüksek yapılar da dahil olmak üzere çok sayıda binada uygulanmasıdır. Dezavantajı, yalnızca belirli bir titreşim frekansı için ayarlanabilmesi ve bu frekansın belirsiz olması ve hatta bu frekansın güçlü yer hareketleri sırasında değişebilmesidir. Geleneksel TMD'nin diğer bir dezavantajı ise bina katlarına yaylar, viskoz sönümleyiciler ve aktivasyon mekanizmaları gibi çeşitli mekanik bileşenlerin kurulmasını gerektirdiğinden, başlangıç ve bakım maliyetlerinin yüksek oluşudur. TLD'ler ise az bakım maliyetine sahip sönümleyicilerdir, ayrıca olası bir yangın durumunda içerisindeki su yangın söndürmek için kullanılabilmektedir (Gutierrez Soto ve Adeli, 2013).

TMD ve TLD sönümleyiciler günümüzde özellikle gökdelen, kule, baca gibi yüksek yapıların rüzgâr ve depremlerden doğan titreşim davranışını düzenlemek, aşırı büyük deplasmanları ve salınım sayısını azaltmak için diğer yardımcı sönümleyici sistemlerle beraber kullanılmaktadır.

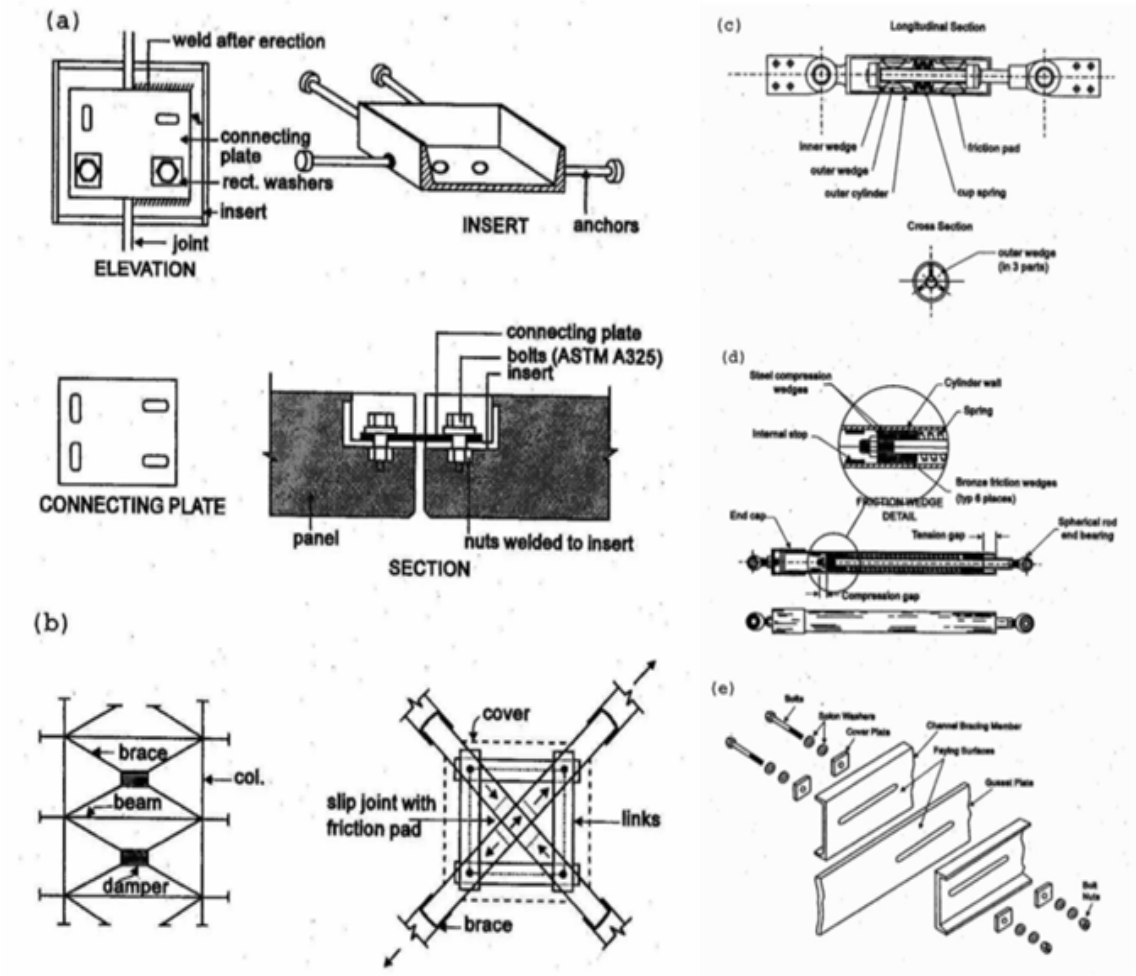
1.5.3.7. Sürtünmeli Sönümleyiciler

Mevcut yapıların rehabilitasyonu için iki alternatif yaklaşım izlenebilir. Bu yaklaşımlardan ilkinde yapı rijitliğinin artırılarak deprem kuvvetlerine karşı konulması söz konusudur. Yapıya perde duvar, çelik braket destek gibi kesme elemanları eklemek veya kolon ve kirişlerin kesitlerini büyütmek gibi yöntemlerle güçlendirme yapılmaktadır. Diğer yaklaşımda ise yapıya etkiyen deprem enerjisinin bir kısmını çeşitli

mekanizma ve yöntemlerle tüketilmesi ile yapıya daha az etkiyen deprem enerjisi ve daha küçük ivme ve deplasmanların meydana gelmesi amaçlanmaktadır.

Mantıksal olarak, deprem ve kasırgalardaki şiddetli rüzgâr gibi durumlarda yapılardaki ana yapısal elemanları hasardan korumak için alternatif bir enerji tüketme kaynağı bulmak tercih edilebilir görünmektedir. Bu nedenle yapılarda deprem veya rüzgârdan kaynaklanan yanal kuvvetlerin neden olduğu elastik ve elastik ötesi deformasyonları en aza indirmek için enerji dağıtımının kullanılması çok fazla sayıda araştırmaya konu olmuştur. Bilindiği gibi hareket eden bir cismin kinetik enerjisini tüketmek için mevcut tüm yöntemlerden en yaygın olarak benimsenen yol, sürtünmeden yararlanılan frenlerdir. Sürtünme ile, malzemelerin akma sürecini tahrip eden herhangi bir yöntemden çok daha fazla miktarda enerji tüketilebilmektedir. Otomobillere benzer şekilde, titreşen binaların hareketi akma veya hasar mekanizmalarından daha çok frenleme ile yavaşlatılabilir. Sürtünmeli sönümleyiciler de aslında bir fren gibi çalışan cihazlardır. Hareketlerden kaynaklanan enerjiyi sürtünme yoluyla ısı ve/veya aşınmaya harcanan enerji olarak tüketirler(Soong ve Dargush, 1997). Şekil 1.21 a-e'de günümüze kadar tasarlanıp üretilen ve birçok uygulaması yapılmış olan sürtünme sönümleyici türleri gösterilmiştir.

Bir yapının histerezis döngüleri önemli ölçüde dar ise veya rijitlik çabuk düşüyorsa, enerji soğurma ve dağıtma kapasiteleri düşüktür ve bu durumda yapıda daha büyük yer değiştirmeler beklenmelidir. Bu etki, kısa periyotlu, çok dar histerezis döngülerine sahip, düşük dayanımlı, esnek yapılar için önemlidir. Ülkemiz yapı stoğundaki 2-3 katlı yapıların çoğunun bu kapsamda olduğu değerlendirilebilir.



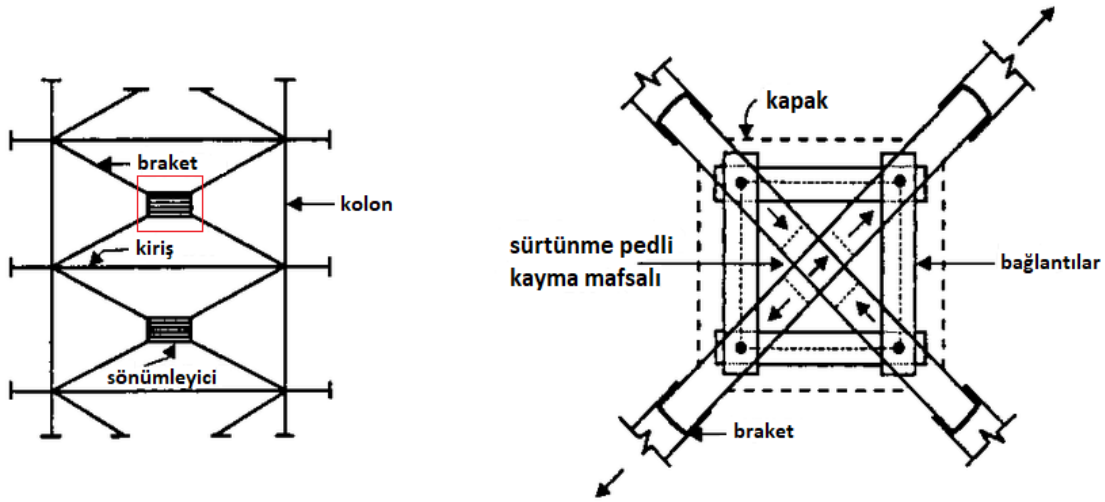
Şekil 1.21. Sürtünmeli Sönümleyici Tipleri a) Limited Slip Bolt Joint, b) X-braced (Pall Type) Friction Damper c) Sumitomo Friction Damper d) Energy Dissipation Restraint e) Slotted Bolted Connection (Soong ve Dargush, 1997)

1.5.4. Pall Tipi Sürtünmeli Sönümleyici

Pall tipi sürtünme sönümleyicinin geliştirilme sürecinde farklı sürtünme malzemeleri ve sürtünme yüzeylerine uygulanan çeşitli işlemlerle sürtünme davranışının geliştirilmesi adına yapılmış çalışmalar içerdiğinden önemlidir.

Pall ve Marsh (1982) yaptığı çalışmada çelik çerçeveli yapıda çelik braket desteklerin performans açısından etkisini geliştirmek için çapraz braketlerin kesişim bölgesinde sürtünmeli bir sönümleyici mekanizma geliştirmiştir. Sönümleyici, braketlerin çekme ve basınç kuvvetleri etkisiyle birbirine sürtündüğü kesişim bölgesinde özel işlem görmüş sürtünme yüzeylerine sahiptir. Sönümleyici mekanizma, çekme ve basınç kuvvetlerinin braketlere daha iyi aktarımı ve sürtünen parçaların aynı düzlemde kalabilmesi için çelik bağlantılarla desteklenmiştir. Çelik bağlantı elemanları yüksek dayanımlı cıvatalarla mekanizmaya bağlanmıştır. Braketlerden birindeki çekme kuvveti

sürtünme mafsalını kaymaya zorladığında, diğer braketteki sürtünme mafsalını aynı anda kaymaya zorlayan dört bağlantıyı harekete geçirmektedir (Şekil 1.22-23).



Şekil 1.22. X-braketli Sürtünme Sönümleyici (Pall ve Marsh, 1982)

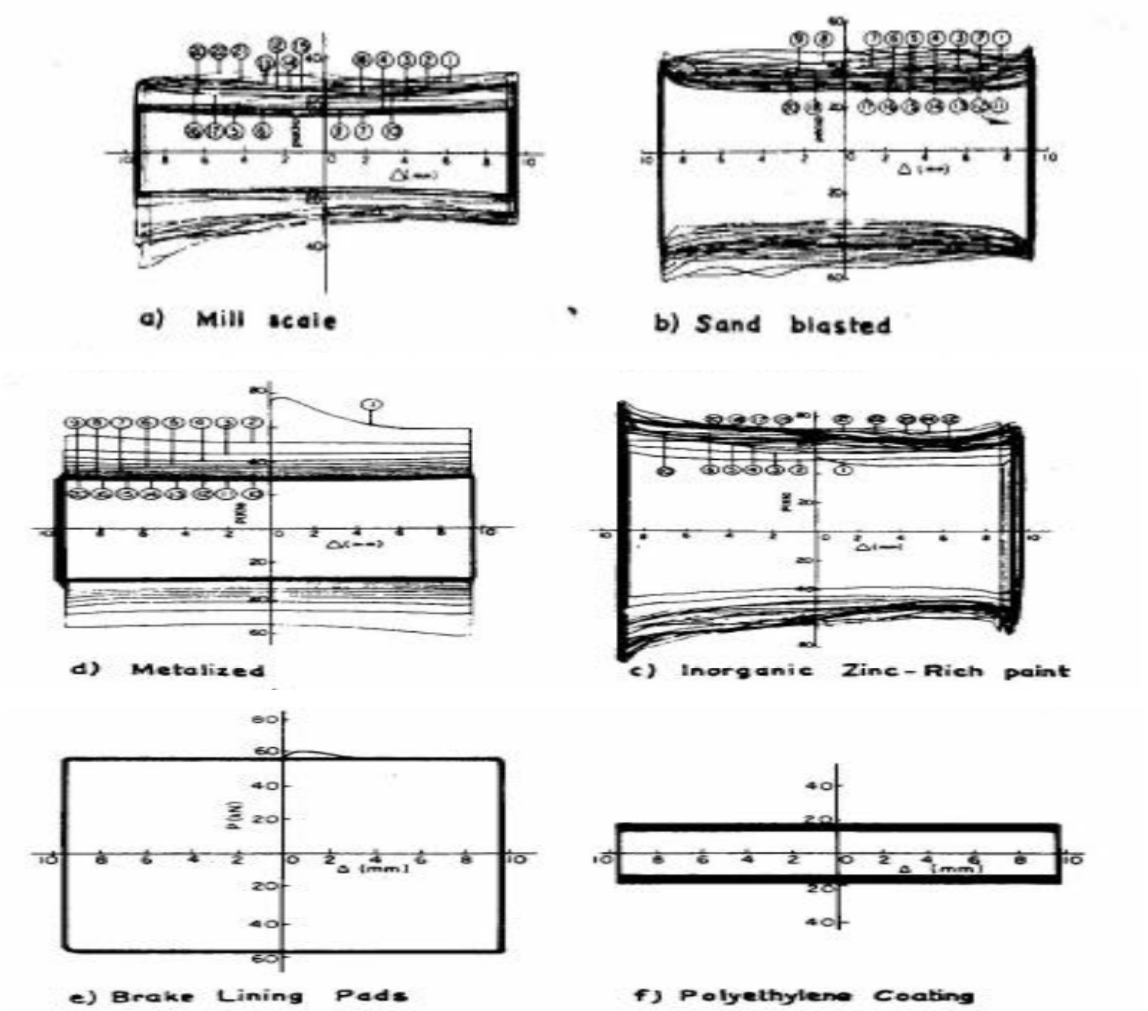
Şekil 1.23. X-braketli sürtünme sönümleyici örneği (Pall ve Pall, 2004)

Çelik braket destekler, diğer çözümlere göre nispeten ekonomiktir ve rüzgâr veya orta şiddetteki depremlerden kaynaklanan yanal ötelenmeleri kontrol etmede etkilidir. Ancak çelik braket destekleri büyük depremler sırasında bazı özelliklerinden dolayı iyi performans gösterememektedir. Çelik braketler;

- Daha rijit olmaları nedeniyle daha büyük deprem kuvvetlerini yapıya davet eder.
- Çelik braket desteklerin dar ve braketlerde basınç kuvvetleri etkisiyle oluşacak olası burkulmalardan dolayı bozulan histeretik çevrim grafiğinden dolayı enerji tüketme kapasiteleri oldukça sınırlıdır (Pall ve Marsh, 1982).

Çalışmada tersinir-tekrarlanır yükleme altında farklı sürtünme yüzeyi işlemleri üzerinde çeşitli statik ve dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Kayan çelik parçalarda fren

balatalı yüzey (brake lining), polietilen kaplamalı yüzey, hadde talaşlı yüzey (mill scaled), kumlamalı yüzey (sand blasted), metalize edilmiş yüzey (metalized) ve inorganik çinko boyalı yüzey (inorganic zinc rich paint) gibi farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuş çelik plakalar kullanılmıştır (Şekil 1.24 a-f). Bu işlemler, sürtünme yüzeyindeki mekanik özellikleri etkileyerek sürtünme katsayısını değiştirmektedir. Dolayısıyla artan sürtünme kuvvetiyle birlikte histerezis çevrim grafiklerindeki alanlar değişmektedir. Bu yöntemlerden kayan çelik yüzeyler arasına yerleştirilmiş ağır hizmet tipi bir fren balatası en iyi sonuçları vermiştir. Fren balatası ile yapılan deneyde performans açısından güvenilir, tekrarlanabilir ardışık histerezis çevrimleri elde edilmiştir. Histerezis eğrileri depremlerde karşılaşılandan çok daha fazla tersinir çevrim boyunca ihmal edilebilir azalma ile dikdörtgen şeklindedir (Pall ve Marsh, 1982).

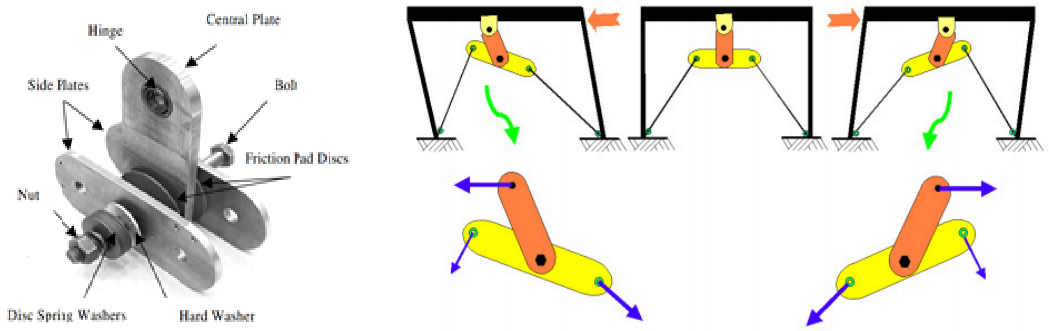


Şekil 1.24. Farklı işlemler uygulanmış sürtünme yüzeylerinden elde edilen histerezis eğrileri
a) Hadde talaşlı yüzey (mill scaled) b) Kumlamalı yüzey (sand blasted) c) Metalize edilmiş yüzey (metalized) d) İnorganik çinko boyalı yüzey (inorganic zinc rich paint) e) Fren balatalı yüzey (brake lining) f) Polietilen kaplamalı yüzey(Pall, 1982)

Farklı işlemler uygulanmış malzemelerin sürtünme pedi olarak kullanımıyla meydana gelen sürtünme davranışı farklılıklarını ortaya koyması açısından Pall tipi sürtünme sönümleyicinin geliştirilme süreci bu yöndeki çalışmalara önemli bir katkı sunmuştur.

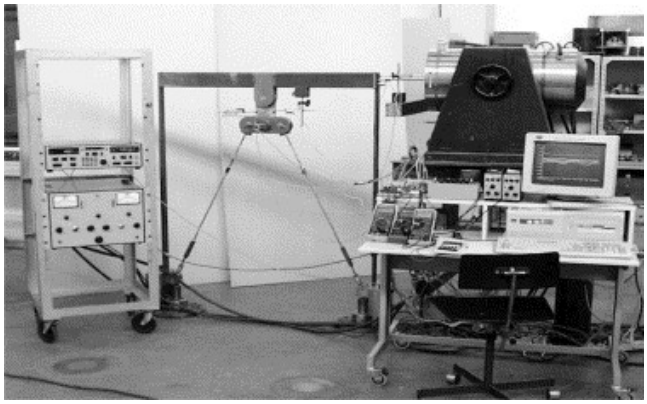
1.5.5. Rotasyonel Sürtünme Sönümleyici

Mualla (2000a) tarafından yapılan tez çalışmasında depreme karşı bina güvenliğini artırmak amacıyla yeni bir sürtünme sönümleyici cihazı tasarlanmıştır. Deprem sırasında binaya etkiyen sismik enerjiyi dağıtan sürtünme sönümleyici, mevcut binaların güçlendirilmesinde veya yeni binaların tasarımında kullanılabilmektedir. Tasarlanan sönümleyici cihaz, birbirine zıt yönlerde dönen (rotasyon hareketli) ve parçaları arasında sürtünme oluşturan birkaç çelik levhadan ve sürtünme pedlerinden oluşmaktadır (Şekil 1.25). Tez çalışması ve ardından yürütülen çalışmalarda, tasarlanan sürtünme sönümleyicinin özelliklerini ve performansını doğrulamak için deneyler yapılmıştır. Tasarlanan sürtünme sönümleyici, yürütülen deneylerde 1/3 ölçekli, tek katlı çelik çerçeveye chevron braket sistemi (ters V şeklinde) kullanılarak bağlanmıştır. Braketlerde yapısal çelik çubuklar yerine öngermeli çelik çubuklar kullanılmıştır. Çelik çerçeve modele monte edilen sürtünme sönümleyici çerçeve yanal deplasman yaptığında geometrik deformasyona uğrayarak önemli ölçüde kontrollü enerji dağıtımına neden olmaktadır. Cihazın iç parçaları arasındaki arayüzlerde sürtünme pedi olarak pirinç veya 0.35-0.45 sürtünme katsayısına sahip kompozit sürtünme pedi materyali gibi farklı malzemeler kullanılmıştır. (Mualla, 2000b) Bu cihaz, özellikle kompozit sürtünme pedi malzemesi kullanıldığında, birçok döngü boyunca degradasyona uğramadan çok kararlı bir histeretik davranış göstermiştir. Aynı zamanda sürtünme sönümleyici cihazın histeretik davranışının çelik çerçevenin yer değiştirme genliğine ve sürtünme pedleri üzerindeki normal yüke doğrusal olarak da bağlı olduğu görülmüştür. Testler sırasında, çelik plakalar ve sürtünme pedi arasındaki kayma fazının değişmesi nedeniyle sürtünme katsayısı değişmiş, bir miktar hıza bağımlı davranış gözlenmiştir. Çerçeve hareketinde harmonik yükleme prosedürü kullanılmıştır. Yükleme frekansları, deplasman genliği, cıvata sıkma kuvveti ve öngerilmeli çubuk kuvveti gibi parametrelerin farklı değerleri için yapı tepkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, bu sürtünme sönümleyici tarafından sağlanan ilave sönümleme kullanımı, bir yapıda büyük miktarda kinetik enerjiyi dağıtmakta ve böylece yapı hasarsız elastik kalırken yapısal süneklik ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır (Mualla, 2000a; Mualla, 2000b).



Şekil 1.25. Çalışmada kullanılan sürtünme sönümleyici ve çelik çerçevede çalışma şekli (Mualla, 2000b), (Mualla, 2000a)

Mualla ve Belev (2002) yine aynı rotasyonel sürtünme sönümleyici cihazı ile donatılmış, tek katlı çelik çerçevelerin dinamik tepkisi üzerine bir çalışma yapılmıştır (Şekil 1.26). Sürtünme pedi malzemesinin, sönümleyici ünitesi performansının ve yanal harmonik uyarılmaya karşı ölçeklendirilmiş model çerçeve tepkisinin değerlendirilmesi için kapsamlı deneyler yapılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analize dayanan sayısal simülasyonlar, Sönümleyici takılı çelik çerçevelerin sismik davranış biçimini değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışmada sönümleyici tasarımında kullanılacak parametreler belirlenerek tanımlanmış ve pratik tasarıma etkileri izlenmiştir. Çalışmada tasarlanan sönümleyicinin sünekliğe dayalı depreme dayanıklı yapı tasarımına hem yeni inşaatlar hem de mevcut yapıların iyileştirilmesi için uygulanabilir bir alternatif sunduğu ortaya konmuştur.



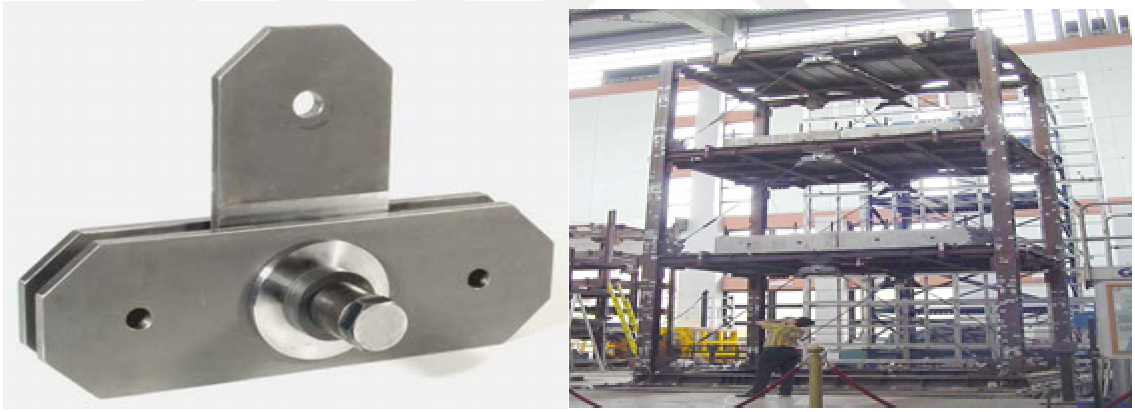
Şekil 1.26. Sönümleyici takılı çelik çerçeve ve deney düzeneği (Mualla ve Belev, 2002)

Mualla ve ark. (2002), Danimarka Teknik Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmada, geliştirilen sürtünme sönümleyici sistem ile donatılmış üç katlı bir çelik çerçeve binanın performansını değerlendirmeye yönelik uluslararası bir araştırma yürütmüştür. Çelik çerçeve sistemin enerjiyi dağıtma kabiliyeti, önceki araştırmalarda olduğu gibi hem deneysel hem de sayısal olarak kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Çalışmada sürtünme

sönümleyici cihazının güçlü histeretik performansının uygun sürtünme pedi malzemesi seçimine bağlı olduğu görülmüştür.

Deneylerde, tam ölçekli üç katlı çelik çerçeve bir test binası, sürtünme sönümlü sönümleyicilerin yerleştirildiği çerçeve yapı olarak kullanılmıştır (Şekil 1.27). Sarsma masası testi, binanın yüksekliği boyunca yerleştirilen farklı sönümleyici kayma direnci setleri için gerçekleştirilmiştir. Sönümleme sisteminin performansı, farklı deprem seviyelerine göre ölçeklendirilmiş uzak ve odağa yakın deprem ivme kayıtları altında doğrulanmıştır. Çelik çerçeve test binasının ve sürtünme sönümleyici cihazların sonlu elemanlar metodu ile düzlem çerçeve modelleri oluşturulmuş ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemi ile bilgisayar yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Karşılaştırma amaçlı kaydedilen bina tepki kayıtlarına göre sayısal ortamda oluşturulan modellerin gerçekte inşa edilmiş yapı ve sönümleme sisteminin önemli özelliklerini yansıtacak şekilde geliştirilmesi için çaba sarfedilmiştir.

Bu çalışmada bildirilen deneysel ve sayısal çalışmalar, hem yeni inşaat hem de mevcut yapıların sismik davranışının geliştirilmesi için geleneksel süneklik esaslı depreme dayanıklı tasarıma göre ümit verici bir alternatif olarak düşünülebilecek yeni sönümleme sisteminin verimliliğini göstermiştir.

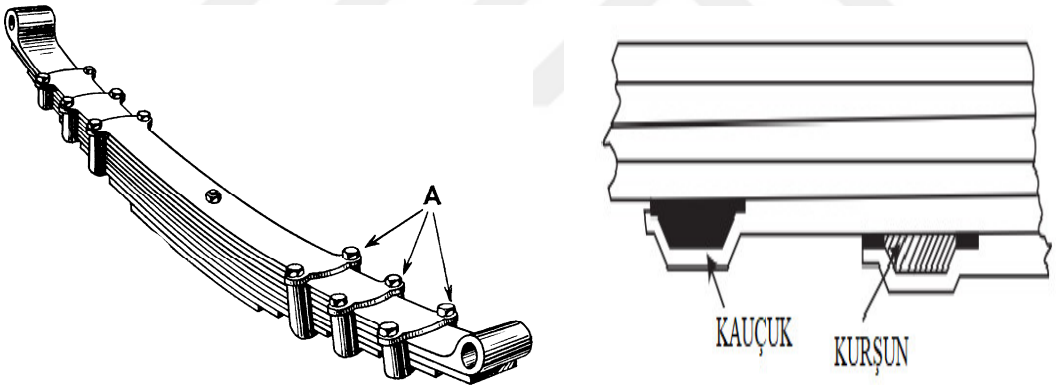


Şekil 1.27. Kullanılan sürtünme sönümleyici ve çelik çerçeve yapı (Mualla ve ark., 2002)

Mualla (2000a) tarafından tasarlanan rotasyonel sürtünme sönümleyici, uluslararası patentli bir cihaz olarak dünyanın dört bir yanında yaygın yapısal uygulamaları icra edilen sönümleyici bir cihaz haline gelmiştir. Hem çok fazla binaya uygulanması, hem de farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile etkinliği kanıtlanmış bir yöntem haline gelmiştir. DAMPTECH isimli firma tarafından istenilen kapasite, boyut ve özelliklerde farklı versiyonları ve braket sistemleriyle üretilerek talep edilen binalara montajı yapılmaktadır (DAMPTECH, 2023).

1.5.5.1. Rotasyonel Sürtünme Sönümleyicilerin Gelişim Tarihi

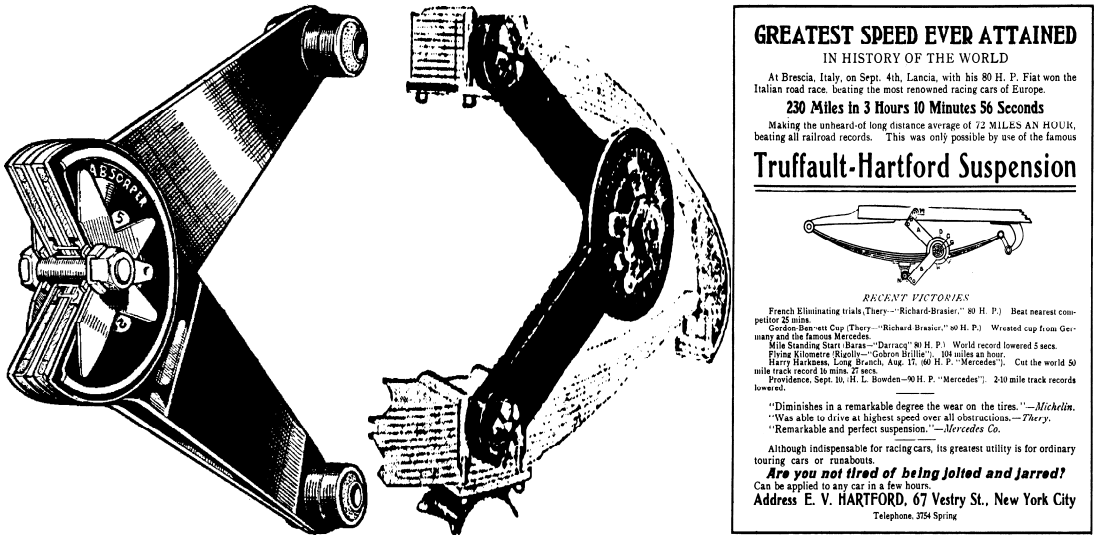
1880'li yıllarda içten patlamalı motorların icadı ve pnömatik lastik tekerleğin bulunması otomotiv sanayinin gelişimine zemin hazırlamıştır. 1900'lü yılların başında otomobilin yaygınlaşması sonucu rotasyonel sürtünme sönümleyicilerin gelişim süreci başlamıştır. Otomobillerin icadından önce atlı arabalarda kullanılan eliptik ve yarı eliptik yaprak yaylar (makas yay) yumuşak bir süspansiyon sağlamakla beraber, bu araçlarda sönümleme için özel bir cihaz bulunmamaktaydı. Yaprak yaylarda birbiri ardına dizilmiş çelik plakalar arasındaki sürtünme doğal bir sönüm sağlıyordu (Şekil 1.28). İlk zamanlarda motorlu araçlar için geliştirilmiş yollar bulunmadığından, atlı arabalara göre nispeten hızlı seyreden motorlu araçlar için aşırı bozuk bir tekerlek yuvarlanma yüzeyi araç içerisinde çok fazla titreşime neden olmaktaydı. Zamanla otomobillerin hızının gitgide artmasıyla titreşimlerin fazla olması, hem konfor açısından hem de aracın kontrolü açısından önemli bir sorun haline geldiğinden, yaprak yaylara ilaveten yüksek frekanslı titreşimleri sönümleyecek sönümleyiciler geliştirilmeye başlanmıştır (Şekil 1.29) (Dixon, 1999).



Şekil 1.28. Makas yay ve sürtünmeyi kontrol etmek için konmuş detay parçalar (Dixon, 1999)

Truffault, 1900'den önce makas hareketli kuru sürtünme damperini icat etmiştir. Bu damperler yağlanmış deri ile bronz disklerin konik diskli yaylarla birbirine bastırıldığı ve iki kolla çalışan kayan bir gövdeye sahip olan sönümleyicilerdir. Sürtünme miktarı, diskleri az ya da çok birbirine bastırarak sabite yakın bir sürtünme katsayısı elde etmek için normal kuvveti değiştiren bir basınç vidası sıkıştırılarak ayarlanmaktadır. 1900-1903 yılları arasında Truffault, Amerika Birleşik Devletleri'nde Hartford şirketinin teşvikiyle otomobiller için yeni bir versiyon geliştirmiştir. Bu versiyonun 1904'te, Amerika Birleşik Devletleri'nin yanı sıra Mors ve Peugeot gibi otomotiv şirketleri de

dahil olmak üzere Avrupa'da birkaç başka üreticiye de lisans verilerek üretimine başlanmıştır. Üretilen bu kuru sürtünmeli makas dampere "Andre–Hartford makas hareketli kuru sürtünme damperi" adı verilmiştir. Andre–Hartford kuru sürtünme damperi günümüzde kullanılan sürtünme sönümleyicilerinin atası olarak kabul edilmektedir. Otomotiv sektöründe kuru sürtünme damperlerinin yerini viskoz sıvı içeren damperler ve manyetoreolojik sıvı içeren sönümleyiciler almasına rağmen, düşük hızdaki titreşimlere maruz, büyük kütleleri olan ve önemli miktarda enerji tüketimini gerektiren inşaat mühendisliği yapılarında sönümleme ve titreşim önleyici olarak kullanımı uygundur (Dixon, 1999).



Şekil 1.29. Andre–Hartford makas hareketli kuru sürtünme damperi, makas yay üzerinde yerleşimi ve bir gazete reklamı (Dixon, 1999)

Günümüzde inşaat mühendisliği yapılarında kullanılan rotasyonel sürtünme sönümleyiciler tasarım açısından Andre-Hartford kuru sürtünme damperine benzemektedir.

Sürtünme sönümleyicilerin enerji tüketmedeki rolünü en çok etkileyen fenomen sürtünme kuvvetidir. Sürtünme kuvveti sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet ve sürtünme katsayısıyla orantılıdır. Sürtünme katsayısı ise malzemenin cinsine, yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişmektedir. Daha önce otomobillerdeki rotasyonel sönümleyiciler için yapılan çalışmalarda sürtünme malzemesi olarak pirinç, bronz, lastik, yağlı deri, ahşap gibi malzemeler kullanılmıştır.

Sürtünme sönümleyicilerin inşaat sektöründe kullanımıyla birlikte son yıllarda yapılan çalışmalarda ise, sürtünme malzemesinin deprem esnasında sürtünme yüzeylerinde ortaya çıkan ısıdan çok fazla etkilenmemesi, aşınmasının çok fazla

olmaması, sürtünme davranışının değişmemesi için farklı malzemeler denenmiştir. Bu malzemelerden biri Teflon (PTFE)'dur. Ayrıca patentli bazı sistemlerde kullanılan ve stabil bir sürtünme katsayısı aralığı sağlayan pirinç alaşım ve kompozit malzemeler de sürtünme pedi olarak kullanılmaktadır (DAMPTECH).

1.6. Sıcaklık ve Aşınmanın Sürtünme Sönümleyici Davranışına Etkisi

Sürtünme sönümleyici cihazlar, dinamik enerjileri absorbe etmek ve dağıtmak için mekanik ve yapı mühendisliğinde uzun süredir kullanılmaktadır. Bu tür sönümleyicilerin verimliliği ve uygunluğu, dinamik yükler altında sönüm mekanizması için ideal çözümler haline getirmektedir. Deprem rehabilitasyonu yapılan yapılarda sürtünme esaslı sönümleyicilerin kullanılması diğer enerji tüketen cihazlara göre birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar düşük üretim ve bakım maliyeti, çevresel etkilere daha az duyarlı olma ve ortam sıcaklığındaki değişikliklere daha az etkilenmeyi içerir. Ayrıca bu tür sönümleyicilerde şiddetli bir deprem sonrasında herhangi bir akma meydana gelmediği için değiştirme ihtiyacı bulunmamaktadır (Rahmani Samani ve ark., 2014).

Bir deprem sırasında yapıya monte edilmiş sürtünme sönümleyici birçok dinamik yükleme çevrimi yaşayabilmektedir. Çok kısa zamanda çok sayıda çevrimsel yüklemenin neden olduğu aşınma ve ısının etkisi kayma yükünün azalmasına neden olabilmektedir. Sürtünmeli sönümleyiciler için bu durum önemli bir handikaptır. Bu nedenle, ASCE/SEI-41 (2017) ve FEMA356 (2000) gibi kodlara göre, tasarımda kullanılan her tip ve boyuttaki sönümleyiciler gerçek bir yapıda kullanılmadan önce prototipler oluşturularak test edilmelidir. Bu tür prototipler yapının hâkim frekansına eşit bir frekansta yirmi tam tersine çevrilmiş döngü ile test edilmelidir.

Sürtünme sönümleyici parçalarının hareketi sırasında sıcaklığın yükselmesine neden olan ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısı daha sonra sönümleyici içindeki elemanlar aracılığıyla aktarılır. Sıcaklığın artması sönümleyici davranışını iki şekilde etkilemektedir; Bunlar sönümleyiciyi oluşturan elemanların termal deformasyonu ve sönümleyicideki kayma yüzeylerinin mekanik ve yüzey özelliklerini değişmesi olarak verilebilir. Bu olumsuz durumların meydana gelmesiyle birlikte sürtünen elemanlardaki aşınma miktarı değişebilmektedir.

Ortaya çıkan ısının olumsuz etkilerinin yanı sıra, aşınmanın kendisi de sönümleyicinin histeretik davranışını etkileyebilir. Mühendislik bakış açısından, aşınma genellikle ya düşük aşınma oranı ile hafif ya da yüksek aşınma oranı ile şiddetli olarak sınıflandırılmaktadır (Lim ve Ashby, 1987). Düşük aşınma oranına sahip temas yüzeyleri

orijinal halinden daha pürüzsüz hale gelirken, yüksek aşınma oranına sahip temas yüzeylerini orijinal halinden daha pürüzlü hale getirir. Bu nedenle aşınma, sönümleyicinin histeretik davranışını iki şekilde etkileyebilir; temas yüzeylerinden malzemenin aşınması ile sürtünen plakaların incelmesi ve bunun sonucu olarak daha az sıkıştırma kuvveti, diğeri ise sürtünme katsayısının değişmesidir. Bu nedenle, sürtünmeli sönümleyicilerde dinamik yükleme göz önüne alındığında yapısal ve ısıl süreçler birbiriyle çok bağlantılıdır. Bu işlemler çevrimler boyunca kayma yükünün artmasına veya azalmasına neden olabilmektedir. Sönümleyicilerin kararlı bir histeretik davranışa sahip olması için, ilgili parametrelerin araştırılması gerekir. Buna göre sönümleyici elemanlarının tasarımı için ünite sayısı, sürtünme pedi boyutu, sıkıştırma kuvveti, sürtünme malzemesi ve yüzey pürüzlülüğü gibi uygun geometrik ve mekanik parametreler seçilebilir. Bu çalışmada deneysel yöntemlerden yararlanılarak, kararlı bir histeretik davranış elde edilecek şekilde ilgili sönümleyici parametrelerinin belirlenmesine çalışılmıştır.

1.7. Tribolojik Özelliklerin Sürtünme Sönümleyici Davranışına Etkisi

Triboloji, özellikle sürtünme, aşınma ve yağlama ile ilgilenen bilim dalıdır. Sürtünmeyi içeren her konuda olduğu gibi deneysel sonuçların tartışılmasında da mutlaka tribolojik açıdan bir değerlendirme bulunmalıdır. Sürtünme kavramı, triboloji bilim dalında "katı bir nesnenin temas ettiği başka bir yüzeye göre teğet olarak hareket ettirildiğinde ortaya çıkan harekete karşı direnç" olarak tanımlanmaktadır (Rabinowicz ve Tanner, 1966). Aşınma kavramı ise "mekanik etkinin bir sonucu olarak katı yüzeylerden malzemenin çıkması veya kopması" olarak tanımlanır. Triboloji literatüründe tartışılan çeşitli aşınma tiplerinden, bu tez çalışmasında en ilgili olan ikisi adhezif aşınma ve abrezif aşınmadır.

Adhezif aşınma, "iki düz yüzey birbiri üzerinde kaydırıldığında meydana gelen ve bir yüzeyden kopan parçaların diğerine yapıştığı" aşınma türüdür. Bu parçalar daha sonra orijinal yüzeye geri dönebilmekte veya bağımsız aşınma parçacıklarına dönüşebilmektedir. Abrazif aşınma ise, "pürüzlü bir sert yüzeyin veya üstünde sert parçacıklar içeren yumuşak bir yüzeyin, daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığı ve bu yüzeyde bir dizi mikroskobik veya daha derin çizikler açtığı" aşınma türüdür. Bu aşınma türünde çiziklerden kopan malzeme genellikle bağımsız aşınma parçacıkları oluşturmaktadır.

Adhezif aşınma, sürtünme fenomeninde neredeyse evrensel olarak mevcuttur ve bazı abrazif aşınma ile bağlantılı olarak, test edilen sürtünme sönümleyicilerde de meydana gelen aşınmanın ana mekanizmasıdır. Genel olarak sürtünme ve aşınma süreçlerinde, bazen eşzamanlı, bazen sıralı ve genellikle birbirleriyle etkileşim halinde olan birçok farklı mekanizma söz konusu olduğundan, hiçbir açıklama gözlemlenen sürtünme davranışını tatmin edici bir şekilde açıklayamamaktadır.

1.8. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi

Yapılarda sismik davranışı iyileştirme adına güçlendirme yöntemleri yanında çeşitli rehabilitasyon yöntemleri de kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerden biri olan ve yapının enerji tüketme kapasitesini önemli derecede artırdığı birçok çalışmada tespit edilen pasif sönümleyiciler de gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan cihazlardır. Pasif sönümleyiciler arasında önemli bir kullanım alanı bulan rotasyonel sürtünmeli sönümleyiciler, bu çalışma kapsamında değerlendirilerek iki katlı, tek açıklıklı betonarme çerçeve yapılarda davranışı araştırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde özellikle köy, kasaba ve ilçe gibi yerleşimlerindeki yapı stoğunun büyük kısmını oluşturan, aynı zamanda yapısal kusur ve eksiklikleri bulunan, deprem yönetmeliklerine göre projelendirilmemiş, ötelenmelere karşı direnci düşük (esnek), az katlı mevcut betonarme yapılar için önerilen alternatif bir iyileştirme (rehabilitasyon) yönteminin araştırılmasıdır. Çalışmada, tasarımı yapılan iki farklı tipli ve yerleşimli rotasyonel sürtünmeli sönümleyicinin sürtünme pedi malzemesi ve sıkıştırma kuvveti (cıvata sıkma torku) parametrelerine göre deney ve analizlerinin yapılarak rehabilitasyona uygunluğu araştırılmıştır.

Tez çalışması şu hususlar bakımından önemlidir;

1. Rotasyonel sürtünme sönümleyicinin betonarme çerçevede çalışmasını gözlemleme,
2. Mantolama gibi güçlendirme yöntemlerine alternatif oluşturma,
3. Farklı sürtünme pedi malzemeleri ve sıkıştırma torku (normal kuvvet) kullanarak daha verimli sürtünme davranışı elde etme,
4. Daha az maliyetli üretim ve imalat kolaylığı sağlama,
5. Analitik ve deneysel çalışmanın karşılaştırmasını yaparak literatüre katkıda bulunma yönleri açısından önemlidir.

1.9. Tez Çalışmasının Kapsamı

Bu tez çalışmasında, birtakım kusurları bulunan 2 katlı betonarme çerçeveye, ters V (chevron) ve diyagonal olmak üzere 2 farklı tip çelik braket sistemi üzerinde, düşük maliyetli, imal edilmesi pratik 2 adet rotasyonel sürtünme sönümleyici monte edilerek sismik enerjinin büyük miktarda dağıtılmasının amaçlandığı alternatif bir yapısal sönümleyici sistem incelenmektedir.

Daha önceki çalışmalarda benzerlerinin üretilip halihazırda birçok yapıda kullanılmakta olduğu 2 tip rotasyonel sürtünme sönümleyici tasarımı yapılmıştır (Mualla, 2000a; Mualla, 2000b), (Mualla ve Belev, 2002), (DAMPTECH). Tasarlanan sönümleyicilerde sürtünme katsayısı, aşınma, mukavemet, ısı iletkenliği gibi özellikleri dikkate alınarak 4 farklı malzemeden (Teflon (PTFE), karbonfiber, pirinç, kurşun) sürtünme pedleri üretilmiş ve V tipi sönümleyici içerisinde testleri yapılmıştır. Kullanıma uygun görülen sürtünme pedleri ile Tip 1 ve Tip 2 olarak isimlendirilen sönümleyiciler üretilmiştir. Tip 1 ve Tip 2 sönümleyiciler üzerinde yürütülen testlerde elde edilen veriler FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında üretilen ve testlerden geçen sönümleyiciler iki katlı tek açıklıklı betonarme çerçevelere her katta 1 adet olmak üzere 2 farklı braket formasyonunda monte edilmiştir. 1 adedi yalın çerçeve referans olmak üzere, elde edilen 7 adet betonarme çerçeve sistemi laboratuvar ortamında statik itme deneylerine tabi tutularak, enerji tüketimi, rijitlik değişimi, süneklik, hasar dağılımı gibi yönlerden incelenmiş, sönümleyicilerin betonarme çerçeveye katkıları, davranış farklılıkları ve karşılaşılan muhtemel olumsuz yönler belirlenmiştir.

1.10. Tez Çalışmasının Katma Değeri ve Yaygın Etkisi

Bu tezde yürütülen çalışmanın, katma değer ve yaygın etki açısından aşağıdaki niteliklere sahip olduğu düşünülmektedir:

1. Bu tez kapsamında yürütülen çalışmayla yapı rehabilitasyonu alanında yenilikçi bir çalışma ortaya konmuştur. Yürütülen çalışmanın, rotasyonel sürtünme sönümleyicileri geliştirme aşamasında, malzeme bilimi ve makine mühendisliği gibi mühendislik dallarından yararlanılmıştır. Bu açıdan disiplinler arası bir çalışma olarak gösterilebilir.

2. Deprem etkilerini azaltma yöntemleri arasında sayılan sismik izolasyon ve enerji

dağıtma sistemlerinin binalarda kullanılması, yüksek süneklik ve dayanıma göre şekillenmiş geleneksel yapı tasarım felsefesine alternatif oluşturan yaklaşımlardır. Özellikle ülkemiz gibi depremselliği yüksek ülkelerde, yapısal sönümleyicilerin güçlendirme yöntemlerine alternatif bir rehabilitasyon yaklaşımı olarak önümüzdeki yıllarda daha fazla tercih edileceği öngörülmektedir.

3. Bu çalışmanın konusu olan rotasyonel sürtünme sönümleyiciler uluslararası patentli ve yurtdışı menşeili cihazlar olduğundan, binalarda kullanımına karar verildiğinde yüksek maliyetli ithalatlar ile karşılaşılmaktadır. Bu nedenle yerli patentli benzer cihazların geliştirilmesi için bu alanda akademik çalışma ve Ar-Ge çalışmalarının yapılması önem arz etmektedir. Bu açıdan yapılan tez çalışması bu alanda atılmış öncü bir adım olarak değerlendirildiğinde ilerleyen yıllarda ülke ekonomisine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

4. Gelecek çalışmalarda, bu çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında, mevcut sönümleyicilerin davranışını geliştirmek, maliyetini düşürmek, daha verimli çalışan farklı versiyonlarını üretmek veya bambaşka bir mekanizma ile yeni bir sönümleyici türü geliştirmek için tasarım ve deneysel çalışmalarının yürütülerek yeni alternatiflerin ortaya konulabileceği öngörülmektedir.

5. Ülkemiz yapı yönetmeliği TBDY (2018) ve diğer standartlarında TKDY (2020) sismik izolasyon cihazları ile ilgili hesap esasları ve kabul kriterleri bulunmasına rağmen, enerji dağıtma sistemleriyle ilgili kabul kriteri ve hesap esasları henüz mevcut değildir. Bu çalışmada sönümleyici kabul kriterleri ve hesap esasları açısından tüm dünyada kabul görmüş olan FEMA356 standardı incelenmiş, tasarlanan sönümleyicilerin bu standarttaki deneysel çalışma ve hesap esaslarına göre bulunan kabul kriterlerine göre incelemesi yapılmıştır. Önümüzdeki yıllarda ülkemiz yapı yönetmeliklerine dahil olması muhtemel sönümleyici kabul kriterleri için bir örnek teşkil ettiğinden yapılan tez çalışması önemlidir.

6. Ülkemizde kullanılacak ithal ve yerli sönümleyiciler için, kapasite, kalite kontrol ve kabul kriterleri açısından ön deneylerinin yapılması gerekmektedir. Bu konuda deney yapacak kontrol mühendislerine örnek bir deney bilgisi sağladığından yapılan çalışma etkilidir.

7. Rotasyonel sürtünme sönümleyicilerde de diğer sürtünme sönümleyici türlerinde de olduğu gibi davranışı büyük ölçüde değiştirip belirleyen en önemli parçalar sürtünme materyalleridir. Çalışmada tasarlanan iki farklı tipteki sönümleyicide kullanılan sürtünme pedi materyali (Teflon (PTFE), karbonfiber, pirinç ve kurşun plakalar) tercihleri açısından özgündür.

8. Çelik yapı çerçevelerin davranışı daha belirlenebilir olduğu için literatürde sönümleyici deneyleri çoğunlukla momente dirençli çelik çerçeve yapılarda yürütülmüştür. Sönümleyicilerin betonarme çerçeve yapı rehabilitasyonunda mühendislik uygulamaları çokça bulunmasına rağmen betonarme çerçevelerde deneysel çalışma azdır. Bu açıdan yapılan çalışma etkili ve önemlidir.

9. Sönümleyiciler üzerine yapılan çalışmaların çoğu "Hasar Kontrolü" performans aralığı hedeflenerek yapılan çalışmalardır. Bu nedenle sönümleyicili çerçevelerin performans değerlendirmeleri, sarsma tablası üzerinde deprem simülasyonu testleri veya zaman tanım alanında analiz gibi dinamik analiz yöntemleri ile yapılmaktadır. Sönümleyicili binalarda, deprem enerjisinin sönümlenmesi sonrası geri merkezleme yetisi istendiğinden, çoğunlukla sönümleyicili binanın elastik bölgede kalması beklenerek rehabilitasyon yapılmakta, bu nedenle analiz ve deneylerde taşıyıcı elemanlarda hasar ve çatlak oluşması beklenmemektedir. Dolayısıyla sadece yapısal tepkilere bakılmaktadır. Aslında FEMA356'da sönümleyici sistemlerin "Can Güvenliği" ile "Göçmenin Önlenmesi" performans noktaları arasında kalan "Sınırlı Güvenlik" performans aralığı için de kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu performans aralığını dikkate alarak yapılmış çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle sürtünme sönümleyici davranışının deplasman ve frekanstan etkilenmediği de dikkate alınarak yapılan bu çalışmada statik itme deneyi tercih edilmiştir. Bu yöntem ile göçme noktası kabul edilen %4 tepe ötelenmesine kadar gidilmiş, "Can Güvenliği" (%3 tepe ötelenmesi) performans noktasına kadar ve sonrasında taşıyıcı elemanlarda oluşan çatlak ve hasarlar gözlemlenerek, yalın referans çerçeveye göre göçme mekanizması ile enerji tüketim miktarı, çevrimsel grafik şekilleri, rijitlik değişimi gibi histeretik davranış farklılıkları ortaya konulmuştur. Bu açıdan yapılan çalışma öncü bir çalışma olarak nitelendirilmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Pall ve Marsh (1982) yaptıkları çalışmada çelik çerçeveli binalar için yeni bir asismik tasarım konsepti önermiştir. Çelik çerçeve binaların çelik çapraz sistemine kayan sürtünme cihazları monte edilerek deprem direnci ve hasar kontrolü potansiyelleri önemli ölçüde arttırılmıştır. Şiddetli deprem hareketleri sırasında sürtünme cihazı kaymakta ve titreşim enerjisinin büyük bir kısmı ana yapısal bileşenlerin elastik olmayan (akma) tüketiminden ziyade sürtünme cihazı ile mekanik olarak tüketilmektedir. Elastik olmayan zaman tanım alanında dinamik analizin sonuçları, diğer yapısal çerçeveleme sistemlerinin hesaplanmış tepkileriyle karşılaştırıldığında, sürtünme sönümlü cihaz monte edilmiş çelik çerçevelerin üstün performansını göstermiştir. Önerilen sürtünme cihazının yapıya gelen yükleri sınırlaması nedeniyle hem emniyet valfi hem de yapısal sönümleyici olarak işlev gördüğü belirlenmiştir. Sürtünme cihazının mevcut çerçeveli binalarda güçlendirme amaçlı, deprem direncini arttırmak için monte edilmesinin uygun olduğu ifade edilmiştir.

Filiatrault (1985) yaptığı tez çalışmasında, şiddetli depremler sırasında moment dirençli çerçevelerin ve çaprazlı moment dirençli çerçevelerin davranışını iyileştirmek için önerilen yeni bir sürtünme sönümleme sistemlerinin yeterlilik testlerinden elde edilen sonuçları sunmaktadır. Sistem temel olarak çerçeve çapraz bağlantılarının kesiştiği bölgede bulunan sürtünmeli fren balataları içeren özel bir mekanizmadan oluşmaktadır. Çalışmada 3 katlı sürtünme sönümlü - çaprazlı çerçeve modelinin simüle edilmiş deprem yükleri altındaki performansını incelenmiştir.

İncelenen model çerçeveler için rüzgâr, hareketli yük ve burulma yüklerinin etkileri ihmal edilirse, sürtünme sönümlü çaprazlı çerçevenin eleman boyutlarının diğer konvansiyonel ağır çerçevelere göre %47 oranında azaltılabileceği ve yine de güçlü deprem etkileri altında üstün bir performans elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Hem analitik hem de deneysel sonuçlar, geleneksel bina sistemlerine kıyasla sürtünme sönümlemeli çaprazlı çerçevenin üstün performansını göstermiştir. 0.9 g'lik yüksek bir ivmeye sahip deprem kaydı ile yapılan deneyde sürtünme sönümlü çaprazlı çerçevede hasara neden olmazken, moment dirençli çerçeve ve çaprazlı moment dirençli çerçeve büyük elastik olmayan deformasyonlara maruz kalmıştır.

Baktash ve Marsh (1987), sürtünme derzli (friction joint) eşmerkez braketli ve dışmerkez braketli çelik bina çerçevelerinin sismik kuvvetler altındaki davranışlarının karşılaştırılmasına ilişkin bir çalışma yapmıştır. Çalışmada lineer olmayan zaman tanım

alanında dinamik analiz kullanılmıştır. 2 farklı braketli, 10 katlı çelik çerçeve binada sürtünme derzinin kat deplasmanları, kolon eksenel kuvvetleri ve kolon momentleri açısından davranış farklılıkları ortaya konmuştur. Sürtünme cihazının etkinliği, elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında gösterilmiştir. Sürtünme sönümlemesinin özellikle önemli olduğu vurgulanmıştır.

Aiken ve ark. (1988) yaptıkları çalışmada, büyük ölçekli, çok katlı bir çelik konstrüksiyon yapının sismik davranışını geliştirmek için iki farklı türde enerji dağıtıcı cihaz kullanmıştır. Bu cihazlar enerji yaklaşımıyla tasarlanmış viskoelastik bir kayma sönümleyici ve tasarımında iteratif doğrusal olmayan analiz tasarım yöntemi benimsenen, neredeyse mükemmel dikdörtgen histeresis davranışına sahip bir sürtünme cihazıdır. Çalışmada 9 katlı moment dirençli bir çelik çerçeve, iki tür enerji dağıtıcı sönümleyicili durumda, moment dirençli yalın çerçeve durumunda ve konsantrik (eş merkezli) olarak desteklenmiş çelik çaprazlı durumda olmak üzere 4 ayrı konfigürasyonda test edilmiştir. Çok sayıda deney yapılarak dört farklı yapısal sistem karşılaştırılmıştır. Sönümleyici cihazlarla sönümlendirilmiş yapıların, moment dirençli yalın çerçeveye benzer taban kesme kuvvetlerine sahip olduğu ve kat ötelenmelerinin ise konsantrik olarak desteklenmiş çerçevenin seviyelerine indirgendiği bulunmuştur. İki farklı sönümleyicili yapının tepkisini öngörmek için uygun analitik yöntemler araştırılmıştır. Modal sönüm içeren bir doğrusal analiz yönteminin viskoelastik olarak sönümlenmiş sistem için iyi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yüksek sönümleme oranlı lineer elastik spektrumlarının kullanılması, kat kesme kuvvetleri ve kat ötelenmeleri açısından daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Sürtünme sönümleyicili yapının tepkisini doğru bir şekilde tahmin etmek için doğrusal olmayan bir analizin gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Constantinou ve ark. (1998) tarafından yapılan çalışmada Amerikan Ulusal Bilim Vakfı ve New York Eyaleti tarafından Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi himayesinde ve birçok şirketin desteklediği araştırma projelerinde pasif enerji dağıtım sistemleri ve yarı aktif kontrol sistemlerinin araştırılması, tasarımı ve uygulanması ile ilgili çalışmalar yapılarak geniş kapsamlı monografi raporlar halinde yayınlanmıştır. Adı geçen araştırmacılar tarafından hazırlanan raporda sönümleyiciler ve yarı aktif kontrol sistemlerinin ilave edildiği çeşitli sayıda katlara sahip test binalarının büyük ölçekli sarsma tablası ile deneyleri yapılarak elde edilen test sonuçları yorumlanmıştır.

Whittaker ve ark. (1988); Whittaker ve ark. (1991) tarafından yürütülen araştırmalarda, çelik levha ADAS (Added damping and stiffness) elemanlarının sismik performansı, bir dizi deneyde üç katlı bir yapının deprem simülatörü testleri ile araştırılmıştır. 3 farklı şekilde (dikdörtgen, üçgen ve X şekilli) üretilmiş ADAS elemanları ile rehabilite edilmiş, sünek, moment dirençli uzay çerçeve şeklinde üretilmiş deney binasında çok sayıda akma çevrimi için kararlı histerezis davranışları elde edilmiştir. Deneylerde 3 gerçek deprem kaydı, 1 adet de yumuşak zemin koşullarını temsil eden yapay deprem kaydı kullanılmıştır. ADAS elemanlarının binaya eklenmesiyle, şiddetli deprem simülasyonu sırasında çerçevenin tepkisi kabul edilebilir seviyelere ulaşmıştır.

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar, ADAS elemanlarının son derece iyi enerji dağıtma özelliklerine sahip orta rijitlikte, moment dirençli çerçeve yapı elde etmek için ve eşmerkezli braket içeren çerçeveleri etkili bir şekilde rehabilite etmek için kullanılabileceğini göstermiştir. ADAS elemanları ve chevron braketli uzay çerçeve yapıda rijitlik 2.5 kat artarken, dayanım ve enerji dağıtma özelliklerinin de önemli ölçüde arttığı görülmüştür. ADAS elemanlarının şiddetli deprem simülasyonları sırasında kararlı, daire şekilli histeretik eğriler elde edilmiştir.

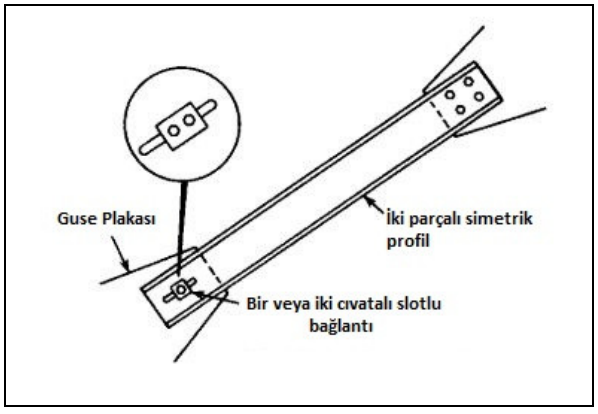
Filiatrault ve Cherry (1989) yaptığı çalışmada sürtünme sönümleyiciler ile donatılmış yapıların sismik tasarımını etkileyen parametrelerin incelenmesiyle ilgilenmiştir. Bu tür sistemlerin verimli bir şekilde tasarlanması için, büyük bir deprem sırasında yapısal tepkiyi en aza indiren kayma yükü dağılımının sönümleyiciler için belirlenmesi gerekmektedir. Bu dağılım, optimum kayma yükü dağılımı olarak adlandırılır. Çalışmada, bu temel tasarım parametresinin oluşturulması için basit bir prosedür sunulmuştur. Prosedüre göre ilk önce tek katlı sürtünme sönümleyicili yapı ile basit doğrusal olmayan mekanik sistem arasında bir benzetme yapılmaktadır. Daha sonra bu sistemin sinüzoidal temel uyarımına tepkisi mevcut bir analitik çözüm kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen çözüm, benzer sürtünme sönümlü yapının optimum kayma yükünün, yer hareketinin genliğine ve frekansına bağlı olduğunu ve kesinlikle yapısal bir özellik olmadığını açıkça göstermiştir.

Ayrıca, çok katlı sürtünmeli sönümlü bir yapının optimum kayma yükü dağılımı, yapının oturacağı bölgede beklenen deprem yer hareketinin özelliklerinden etkilenecektir. Bu bilgiler kullanılarak, mevcut bir stokastik deprem modelinden üretilen çok sayıda yapay ivmeölçer tarafından uyarılan çok katlı sürtünme sönümlü yapılar üzerinde sayısal duyarlılık ve parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları,

çok katlı sürtünme sönümleyicili bir yapıda optimum kayma yükü dağılımının hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için bir tasarım kayma yükü spektrumunun oluşturulmasına yol açmıştır. Spektrum, yapının ve yapının oturacağı bölgede beklenen yer hareketinin özelliklerini dikkate alır ve bu yeni yapısal sistemin sismik tasarımını büyük ölçüde basitleştirmiştir.

Fitzgerald ve ark. (1989) yaptıkları çalışmada binalardaki eş merkezli çelik braketlerde oluşan elastik olmayan burkulmayı önlemek için slotlu-cıvatalı bağlantılardan (SBC) yararlanılabileceğini ortaya koymuştur.

Binalarda depremlerden kaynaklı yanal kuvvetleri karşılamak için eş merkezli braketlerle desteklenmiş çelik çerçevelerin kullanılması, güçlü sismisite bölgelerinde yaygın bir tasarım uygulamasıdır. Eş merkezli braket uygulaması depreme dayanıklı tasarımın iki performans hedefini, yani "hasar kontrolü" ve "göçmenin önlenmesi"'ni yerine getirmek için çok etkili bir araçtır. Braket destek elemanlarının çekmede akması ve basınçta elastik olmayan burkulmaya uğraması temel enerji dağıtıcı mekanizmayı sağlarken, çoklu elastik olmayan deformasyon çevrimleri altında eleman davranışında doğal problemler oluşmaktadır. Bununla birlikte enerji dağıtımı, slotlu-cıvatalı bağlantılarda (SBC) (Şekil 2.1) sürtünme direnci ile de sağlanabilmektedir, böylece SBC braketlerde oluşan elastik olmayan burkulma ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Yapılan laboratuvar testleri, bu konseptin hem yeni binalarda hem de mevcut binaların sismik rehabilitasyonunda, yanal kuvvetlere dirençli bir sistem olarak kullanımının uygun bir alternatif olabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.1. Slotlu-civatalı bağlantı detayı (Fitzgerald ve ark., 1989)

Aiken ve Kelly (1990) yaptıkları birleşik deneysel ve analitik çalışmada büyük ölçekli, çok katlı çelik çerçeveli bir binanın sismik davranışını iyileştirmek için iki farklı türde enerji dağıtan cihazın kullanımına odaklanmaktadır. İncelenen enerji dağıtıcı

cihazlar, bir enerji yaklaşımı kullanılarak tasarlanmış viskoelastik kayma sönümleyici ve tersinir-tekrarlanır doğrusal olmayan bir analiz tasarım yönteminin benimsendiği neredeyse mükemmel dikdörtgen histeretik davranışa sahip bir sürtünme sönümleyici cihazıdır.

Çalışmada her iki sistemin de kapsamlı deprem simülatörü testleri yapılmıştır. Dokuz katlı, momente dirençli çelik bir çerçeve, çalışmanın temel binasını temsil etmektedir. Bina, her iki tip enerji sönümleyici takılıyken ve ayrıca moment dirençli ve eş merkezli çapraz konfigürasyonlarda test edilmiştir. Gerçekleştirilen çok sayıda test ile dört yapısal sistemin birçok farklı karşılaştırması yapılmıştır. Ek sönümleyicili yapıların, ötelemeleri eşmerkez çaprazlı çerçevenin seviyesine indirirken, moment dirençli çerçeveli yapılara benzer taban kesme kuvvetlerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

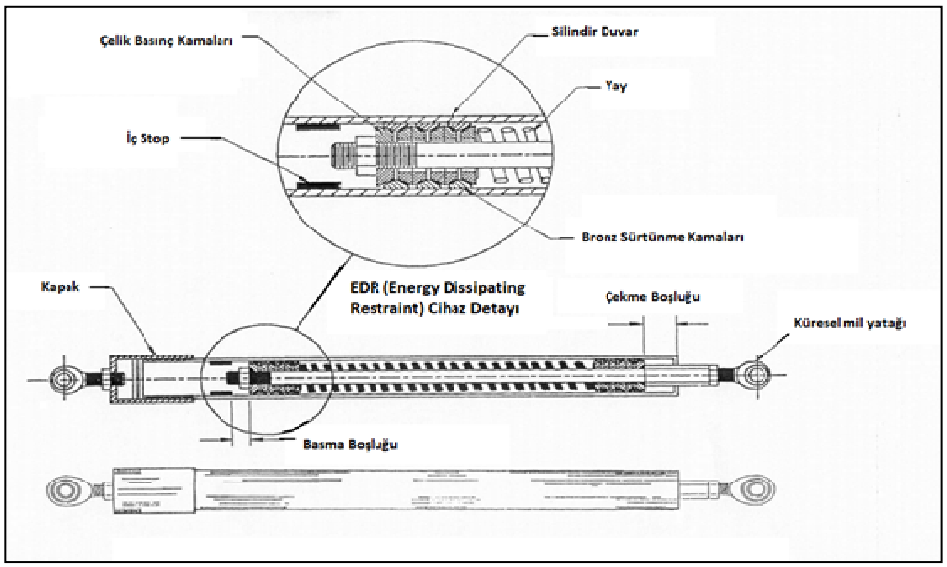
Kapsamlı analitik çalışmada ise, iki farklı sönümleyicili binanın tepkisini tahmin etmeye uygun analitik yöntemler araştırılmıştır. Mod bazında sönümlemeyi içeren doğrusal bir analizin, viskoelastik olarak sönümlü sistem için çok iyi sonuçlar ürettiği bulunmuştur. Ayrıca, yüksek sönüm değerlerine sahip lineer elastik tepki spektrumlarının kullanılması, kat kesme ve yer değiştirmeler için daha doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur. Çalışmada sürtünme sönümlü binanın tepkisini doğru bir şekilde tahmin etmek için doğrusal olmayan bir analizin gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada daha önce geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan bir doğrusal olmayan zaman tanım alanı analiz programı kullanılmış ve sürtünme cihazları mevcut elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Sönümleyicilerin önceki çalışmalardaki testlerinden, sürtünme sönümleyicilerin kuvvet-yer değiştirme tepkisinin yükleme frekansından, genliğinden, yükleme döngüsü sayısından ve sıcaklıktan bağımsız olduğu ortaya çıkmıştır (Aiken ve ark., 1988), (Aiken ve ark., 1992), (Aiken ve Kelly, 1990).

Aiken ve ark. (1993) 1986-1991 tarihleri arasında, Berkeley'deki California Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'ndeki deneysel araştırma programlarında yedi farklı pasif enerji dağıtım sistemini incelemiştir. Bu çalışmalarda, farklı cihaz türlerini, sarsma tablası deneylerinin sonuçlarını ve ilgili analitik çalışmayı açıklayarak bu çalışmalara genel bir bakış sunulmaktadır.

Çalışmalar kapsamında incelenen sistemlerden dördü sürtünme sönümleyici sistemlerdir ve bunlardan üçü (Sumitomo, Pall, Sürtünme, Kayma) Coulomb sürtünmesine dayanmaktadır. Kayma sönümleyicisi, yer değiştirmeyle orantılı, kendinden merkezli sürtünme direnci sağlayabilen bir cihaz olan Fluor Daniel EDR'dir. Diğer üç sistemin tümü farklı enerji dağıtma mekanizmalarına sahiptir. İncelenen bu

sönümleyiciler yumuşak çelik X-plakalarının akmasını kullanan ADAS elemanları, enerji tüketen eleman olarak 3M akrilik kopolimer kullanan viskoelastik kayma sönümleyiciler ve enerjiyi dağıtmak için alaşımda tersinir, stres kaynaklı faz değişikliklerinden yararlanan Nikel-Titanyum alaşımı şekil hafızalı cihazlar olmak üzere çeşitlidir. Çeşitli sistemlerin etkinliği, enerji dağıtıcıları olmayan ve enerji tüketen test binalarının tepkisi karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Cihazların aynı test yapısı kullanılarak çalışıldığı bazı durumlarda, doğrudan karşılaştırma da yapılmıştır. İncelenen sistemlerin tümü, deprem yüklemesine karşı geliştirilmiş yapısal tepki için faydalı özellikler sergilemiştir.

Nims ve ark. (1993) enerji dağıtıcı kısıtlama (Energy Dissipating Restraint-EDR) olarak isimlendirilen sürtünme cihazı üzerinde çalışmıştır. EDR, sismik bir olay tarafından yapıya verilen enerjiyi dağıtmak için kullanılabilen pasif bir sürtünme cihazıdır. Bu cihazın benzersiz özellikleri, güçlü bir şekilde kendi kendine merkezlenmesi ve sürtünme kuvveti yer değiştirmeyle orantılı olan pasif bir cihaz olmasıdır. Bu özelliklerin her ikisi de enerji yayılımı veya taban izolasyonu için kullanılan diğer sürtünme cihazlarında bulunmamaktadır (Aiken ve Kelly, 1990; Aiken ve ark., 1993), (Constantinou ve ark., 1992), (Pall, 1986), (Whittaker ve ark., 1988). Kayma kuvvetinin yer değiştirmeyle orantılı olması özelliği çok önemlidir, bu özelliğe sahip aktif bir cihaz tasarımı üzerinde çalışılmıştır (Akbay ve Aktan, 1990). EDR cihazı, diğer bazı pasif sürtünme cihazlarından mekanik olarak daha karmaşık olmamasına rağmen, çalışma açısından sofistike bir cihaz olduğu ifade edilebilir (Şekil 2.2). Bu cihaz orijinal olarak Berkeley'deki California Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nde test edilmiştir. (Richter ve ark., 1990), (Nims ve ark., 1993).

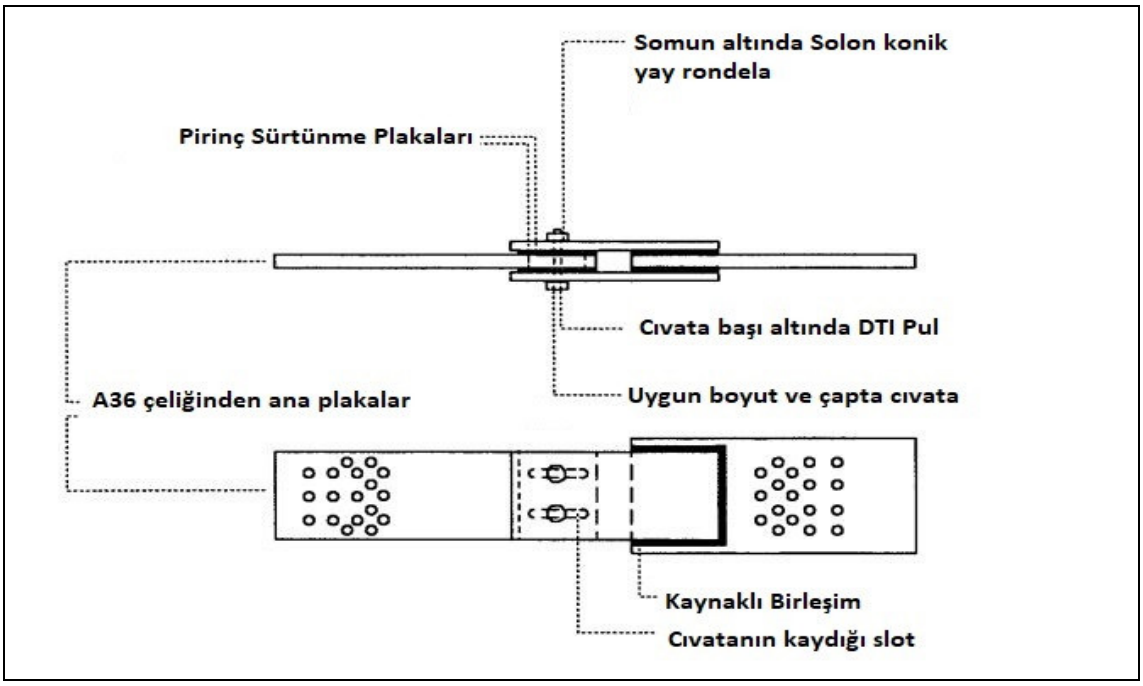


Şekil 2.2. EDR enerji dağıtma cihazının iç ve dış görünüşü (Nims ve ark., 1993)

Grigorian ve ark. (1993) slotlu cıvata bağlantıları (Slotted-Bolted Connections-SBC) üzerine çalışma yapmışlardır. SBC, çelik çapraz braketlerde kullanılabilen ve sürtünme yoluyla enerji dağıtabilen pasif cihazlardandır.

Binalarda kullanılan çelik çaprazlar deprem esnasında oluşan basınç kuvvetleri altında burkularak enerji tüketiminde rol oynarlar. Deprem etkileri gibi güçlü hareket enerjisini dağıtmanın bir yolu olarak çelik braketlerin burkulması yerine farklı mekanizmaların gerekli olduğu bilinmektedir. Slotlu cıvata bağlantıları (Slotted-Bolted Connections-SBC) bu enerji dağıtımını sağlayabilen mekanizmalardan biridir. SBC, uzun oluklu cıvata deliklerinde (Şekil 2.3) belirlenmiş bir sürtünme direncinde kayma yer değiştirmesinin meydana gelebildiği eşmerkezli braket elemanı bağlantılarıdır.

Sürtünme yüzeylerindeki tasarım normal kuvveti için gereken cıvata gerginliği seviyesi, slotlu-cıvatalı köşebent plakası bağlantısındaki Solon (Belleville konik yaylı) rondelalar tarafından sağlanmaktadır. Pullar başlangıçta kubbe şeklindedir ve belirtilen cıvata gerilim yükleri altında düz hale gelmektedir. Cıvata gerginliğini kontrol etmek için rondelaların sayısı ve yönleri (içbükey taraf yukarı veya aşağı) kullanılır. Tekrarlanan tersinir-tekrarlanır yükleme döngüleri altındaki geleneksel eşmerkezli çaprazlama sisteminin davranışının aksine, SBC sistemi dikdörtgen histerezis çevrimleri ürettiği görülmüştür.



Şekil 2.3. SBC (Slotted-Bolted Connections) kesit ve yan görünüşü (Grigorian ve ark., 1993)

Shukla ve Datta (1999) yaptıkları çalışmada optimal olarak yerleştirilmiş viskoelastik sönümleyiciler kullanılarak çok katlı bina çerçevelerinin sismik davranışının kontrolü araştırılmıştır. Bina tepkileri, yakın ve uzak rastgele yer hareketi kayıtlarına göre spektral analiz kullanılarak elde edilmektedir. Pasif viskoelastik sönümleyicilerin optimal konumları, katlar arası ötelenmenin ortalama karekök değeri yardımıyla elde edilen bir kontrol edilebilirlik indeksi yardımıyla bulunmuştur.

Viskoelastik sönümleyicilerin modellenmesi ve optimal yerleşiminin bina tepkilerini azaltması üzerindeki etkisini vurgulamak için, çalışmada viskoelastik sönümleyicilerin üç farklı matematiksel modeli ve viskoelastik sönümleyicilerin yerleştirilmesine ilişkin üç alternatif şema dikkate alınmıştır. Çalışmada dikkate alınan 20 katlı kesme çerçevesi modelinin davranışı, önerilen strateji tarafından kontrol edilmektedir. Viskoelastik sönümleyicilerin optimal yerleşim planının, çalışmada ele alınan diğer viskoelastik sönümleyicilerin yerleştirme şemalarına kıyasla bina tepkilerinde daha fazla azalma sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca sönümleyicilerin optimum yerleşimi, deprem kuvvetlerin doğasına, kullanılan toplam viskoelastik sönümleyici miktarına ve kullanılan viskoelastik sönümleyicilerin modellenmesine duyarlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Mualla (2000b) ve **Mualla (2000a)**'de bina güvenliğini artırmak için depremde binaya etkiyen enerjiyi dağıtmak için rotasyonel sürtünme sönümleyici cihazı tasarlamıştır. Sürtünme sönümleyici, mevcut binaların güçlendirilmesinde veya yeni binaların tasarımında kullanılabilmektedir. Çalışmada, tasarlanan sürtünme sönümleyicinin özelliklerini ve performansını doğrulamak için testler yürütülmüştür. Tasarlanan sönümleyici cihaz, birbirine zıt yönlerde dönen ve parçaları arasında sürtünme oluşturan birkaç çelik levhadan oluşmaktadır. Testlerde 1/3 ölçekli, tek katlı çelik çerçeveye chevron-braket sistemi (ters V) kullanılarak bağlanmıştır. Çaprazlarda yapısal çelik çubuklar yerine öngermeli çelik çubuklar kullanılmıştır. Cihazın iç parçaları arasındaki arayüzlerde sürtünme pedi olarak pirinç veya 0.35-0.45 sürtünme katsayısına sahip kompozit sürtünme pedi materyali gibi farklı malzemeler kullanılmıştır. (Mualla, 2000b) Bu cihaz, özellikle kompozit sürtünme pedi malzemesi kullanıldığında, birçok döngü boyunca degradasyona uğramadan çok kararlı bir histeretik davranış göstermiştir. Sonuç olarak, bu sürtünme sönümleyici tarafından sağlanan ilave sönümleme kullanımı, bir yapıda büyük miktarda kinetik enerjiyi dağıtmakta ve böylece yapı hasarsız elastik kalırken yapısal süneklik ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

Mualla ve Belev (2002) tarafından daha önce tasarlanan rotasyonel sürtünme sönümleyici cihazı ile donatılmış tek katlı çelik çerçevelerin dinamik tepkisi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Sürtünme pedi malzemesinin, sönümleyici ünitesi performansının ve yanal harmonik uyarılmaya karşı ölçeklendirilmiş model çerçeve tepkisinin değerlendirilmesi için kapsamlı testler yapılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analize dayanan sayısal simülasyonlar sönümleyici takılan çelik çerçevelerin sismik davranış biçimini değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışmada tasarımında kullanılacak parametreler belirlenerek tanımlanmış ve pratik tasarıma etkileri izlenmiştir. Çalışmada tasarlanan sönümleyicinin sünekliğe dayalı depreme dayanıklı yapı tasarımına hem yeni inşaatlar hem de mevcut yapıların iyileştirilmesi için uygulanabilir bir alternatif sunduğu ortaya konmuştur.

Mualla ve ark. (2002) Danimarka Teknik Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmada, geliştirilen sürtünme sönümleyici sistem ile donatılmış üç katlı bir çelik çerçeve binanın performansını değerlendirmeye yönelik uluslararası bir araştırma yürütmüştür. Çelik çerçeve sistemin enerjiyi dağıtma kabiliyeti, önceki araştırmalarda hem deneysel hem de sayısal olarak kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Sürtünme sönümleyici cihazının güçlü histeretik performansının uygun sürtünme pedi malzemesi seçimine bağlı olduğu görülmüştür.

Çalışmada tam ölçekli üç katlı çelik çerçeve test binası, sürtünme sönümlü sönümleyicilerin yerleştirildiği çerçeve yapı olarak kullanılmıştır. Sarsma masası testi, binanın yüksekliği boyunca yerleştirilen farklı sönümleyici kayma direnci setleri için gerçekleştirilmiştir. Sönümleme sisteminin performansı, farklı deprem seviyelerine göre ölçeklendirilmiş uzak ve odağa yakın deprem ivme kayıtları altında doğrulanmıştır. Çelik çerçeve test binasının ve sürtünme sönümleyici cihazların sonlu elemanlar metodu ile düzlem çerçeve modelleri oluşturulmuş ve lineer olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemi ile yazılım kullanılarak sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Karşılaştırma amaçlı kaydedilen bina tepki kayıtlarına göre sayısal ortamda oluşturulan modellerin gerçekte inşa edilmiş yapı ve sönümleme sisteminin önemli özelliklerini yansıtacak şekilde geliştirilmesi için çaba sarfedilmiştir.

Soong ve Spencer Jr (2002) yapısal kontrol konseptini uygulanabilir bir teknolojiye dönüştürmek adına yapılan çalışmaları ve son teknolojik gelişmeleri ortaya koyan bir makale yazmıştır. Makalenin odaklandığı alanlar pasif ve aktif yapısal kontrol sistemleridir. Bu makale, pasif ve aktif yapısal kontrol sistemlerin gelişimlerinin kısa bir tarihsel özetini ve hala gelişmekte olan teknolojinin en son ilerlemelerinin, en son

uygulamalarının bir değerlendirmesini içermektedir. Ayrıca bu sistemlerin sismik tasarım ve inşaat mühendisliği yapılarının rehabilitasyonu bağlamındaki avantajları ve sınırlamaları da irdelenmiştir.

Singh ve Moreschi (2002) yaptıkları çalışmada doğrusal davranan binalardaki pasif sönümleyicilerin optimum tasarımı için önerilen bir genetik algoritma yaklaşımının kullanımını göstermiştir. Çalışmada enerjinin dağıtımı için klasik viskoz sönümleyiciler, katı viskoelastik sönümleyiciler ve sıvı viskoelastik sönümleyiciler kullanılmıştır. Bu sönümleyicilerin yapıdaki optimum boyutunu ve konumunu belirlemek için bir genetik algoritma kullanılmaktadır.

Çalışmadaki genetik yaklaşım, bina tepkisinde istenen bir azalmayı elde etmek için belirli bir kapasiteye sahip sönümleyicilerin gerekli sayısını ve bunların bir binadaki optimum yerleşim yerlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Önerilen yaklaşımda, belirli sayıda sönümleyici kullanılması durumunda, istenen bina tepkisinde maksimum azalmayı elde etmek için yapıdaki en uygun sönümleyici konumları da bulunabilmektedir. Tepki azaltma performansı, taban kesme kuvveti, devrilme momenti veya kat ivmesi gibi, seçilen bir yanıt türündeki azalma olarak ifade edilmektedir. Üç tip sönümleme cihazı ve birkaç farklı performans ölçütü ile kurulan bir kesme kuvveti bina modeli ve burulmalı bina modeli için sayısal sonuçlar rapor edilmiştir.

Moreschi ve Singh (2003), yaptığı çalışmada, benzer tasarım özelliklerine ve parametrelerine sahip olan metal akma sönümleyicilerin ve sürtünme sönümleyicilerin optimum tasarımını ele almaktadır. Birçok kapsamlı test ve analitik çalışmalar sonucunda binaların sismik korunmasındaki etkinliği doğrulanan bu cihazlar, davranışlarını kontrol eden çeşitli parametreler nedeniyle doğrusal olmadığı için mevcut tasarım prosedürleri genellikle kullanışsızdır ve optimal değildir. Yürütülen çalışmada istenen bir performans hedefi için bir binanın farklı yerlerine monte edilen cihazların en uygun tasarım parametrelerini belirlemek için bir metodoloji sunulmaktadır. Metal akma sönümleyici için ilgili tasarım parametreleri, cihazın akma seviyesi, cihaz rijitliği ve braket desteklerin rijitliğidir. Sürtünme sönümleyici için parametreler ise, kayma yükü seviyesi ve braket destek rijitliğidir. Sönümleyici cihazlar ve bu cihazların eklendiği binalar doğrusal olmayan bir şekilde davrandığından, zaman tanım alanı yaklaşımıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımla global olarak en uygun çözümü elde etmek için genetik algoritmalar kullanılmalıdır. Önerilen optimal arama yaklaşımı, performans hedeflerinin seçiminde esnekliğe izin vermektedir. Çalışmada önerilen

optimal arama yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla, farklı performans hedeflerine sahip optimum sönümleyici tasarımlarının birkaç sayısal örneği sunulmuştur.

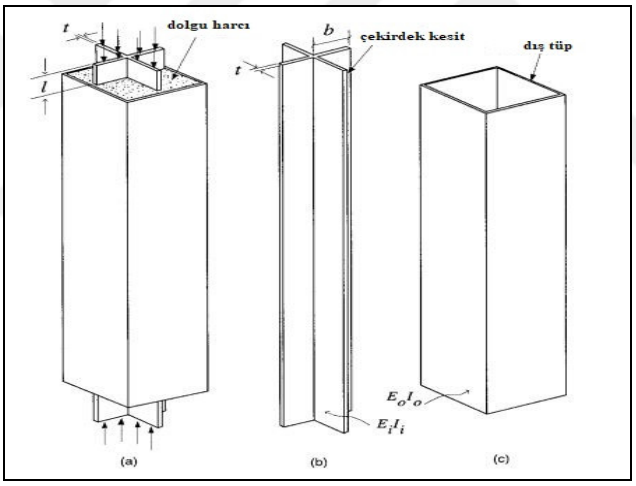
Lin ve ark. (2003) tarafından yürütülen çalışmada pasif enerji dağıtma sistemleri ile donatılmış yeni ve düzenli binalar için sismik yer değiştirmeye dayalı bir tasarım yöntemi sunulmaktadır. Substitute-structure yaklaşımını kullanarak ve efektif rijitlik, efektif viskoz sönüm oranı gibi pasif enerji dağıtma cihazlarının mekanik özelliklerini simüle ederek, rasyonel bir doğrusal iterasyon yöntemi önerilmiştir. Yöntemde önce binada bir hedef deplasman belirlenmekte ve ardından bu deplasmana karşılık gelen tasarım kuvveti, dayanım ve rijitlik elde edilmektedir. Pasif enerji dağıtma sistemlerine sahip birkaç bina modelinin deplasmana dayalı tasarım prosedürleri kapsamlı bir şekilde sunulmaktadır. Sonuçlar, dinamik esnek olmayan zaman alanı analizi ile doğrulanır. Çalışmada, önerilen deplasmana dayalı tasarım yönteminin basit olduğu ve pasif enerji dağıtım sistemleri ile donatılmış binaların doğrusal olmayan davranışını doğru bir şekilde tahmin edebildiği ortaya konmuştur.

Pasquin ve ark. (2004) sürtünme sönümleyicilerinin 9 katlı mevcut bina üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı, Montreal'deki mevcut bir binanın sismik iyileştirmesidir. Tek diyagonal ve chevron braket sisteme dahil, toplamda 161 sürtünme damperi yapıya monte edilmiştir. Bu iyileştirme, mevcut binanın güçlendirilmesi gerekliliğini büyük ölçüde minimuma indirirken, ötelenmeleri ve taban kesme kuvvetlerini azaltmıştır. Sistemi çözmek ve sönümleyicileri optimize etmek için doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmıştır. İyileştirme sonucunda geleneksel güçlendirme tekniklerine göre %50 ‘den fazla maliyet ve inşa süresinde tasarruf edilmiştir.

Pall ve Pall (2004) yaptıkları yeni çalışmalar ile Pall tipi sürtünme sönümleyici ilerleyen yıllarda bir takım değişiklik ve gelişmelere uğrarken, birçok yapının rehabilitasyonunda da uygulanmıştır. Rehabilitasyonu yapılan binalarda hissedilen ihtiyaç üzerine diyagonal braket üzerinde hem çekme hem de basınç kuvvetleri altında çalışan versiyonu da üretilmiştir. Pall tipi sönümleyicilerle gerçekleştirilen rehabilitasyon uygulamalarının bina sismik tepkisine etkileri birçok akademik çalışmada incelenmiş, diğer yapısal sistemlerle karşılaştırılması sonucunda sürtünmeli sönümleyicili yapıların üstün performansı gösterilmiştir. Sürtünme sönümleyicileri tarafından sağlanan ek sönümleme ile yapılarda sünekliğe bağımlılığın ortadan kalktığı vurgulanarak, binaların hasar görmeden elastik bölgede kaldıkları belirtilmiştir. Yeni geliştirilen Pall tipi sönümleyicileri de içeren yapısal sistemlerin ekonomik bir tasarım çözümü sağladığı,

binayı ve içindeki değerleri depremlere karşı korumak için hasar kontrol potansiyelini önemli ölçüde artırdığı birçok çalışmadaki sonuçlar ile ortaya konmuştur (Vezina ve ark., 1992), (Verganelakis ve Pall, 2004), (Vail ve ark., 2004), (Pasquin ve ark., 2004), (Filiatrault ve Cherry, 1990).

Black ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada sismik enerjinin büyük kısımlarını absorbe etmek için bir bina çerçevesinde metalik cihazlar kullanma fikrinden yola çıkarak, bağlantısız braket (Unbonded Brace by Nippon Steel Co.) olarak bilinen bir tür burkulması önlenmiş braket (BRB) üzerinde yürüttükleri kapsamlı bir test programından elde edilen sonuçları rapor etmiştir (Şekil 2.4). Çalışma sonucunda bağlantısız braketin, yeni ve mevcut yapıların depreme dayanıklılığını artırmak için geleneksel çerçeveleme sistemlerine göre güvenilir ve pratik bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. BRB elemanlar, önemli ve tekrarlanabilir bir enerji tüketme kabiliyeti sağlarken, yapısal ötelenmeyi de sınırlayabilmek için gereken rijitliği de sağlayabilen bir cihazdır.



Şekil 2.4. a) BRB'nin (Unbonded Brace) şematik görünüşü b) çekirdek eleman c) dış tüp (Black ve ark., 2004)

Symans ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada binaların sismik koruması için pasif enerji dağıtım sistemlerinin uygulanmasındaki mevcut uygulamaların ve son gelişmelerin bir özetini sunmaktadır. Çalışmada, pasif enerji dağıtma sistemlerinin çerçeveli binalarda uygulanması üzerine yoğunlaşılmıştır. Çalışma konuları enerji dağıtım sistemlerinin temel ilkelerini, seçilen pasif enerji dağıtım cihazlarının mekanik davranışının açıklamalarını ve matematiksel modellemesini, bu cihazların avantajlarını ve dezavantajlarını, enerji dağıtımını kullanan yapıların analizi ve tasarımı için kılavuzların ve tasarım felsefesini içermektedir. Pasif enerji dağıtım cihazları ve enerji dağıtım cihazlarının ilave edildiği yapılara özgü tasarım hususları detaylı bir şekilde

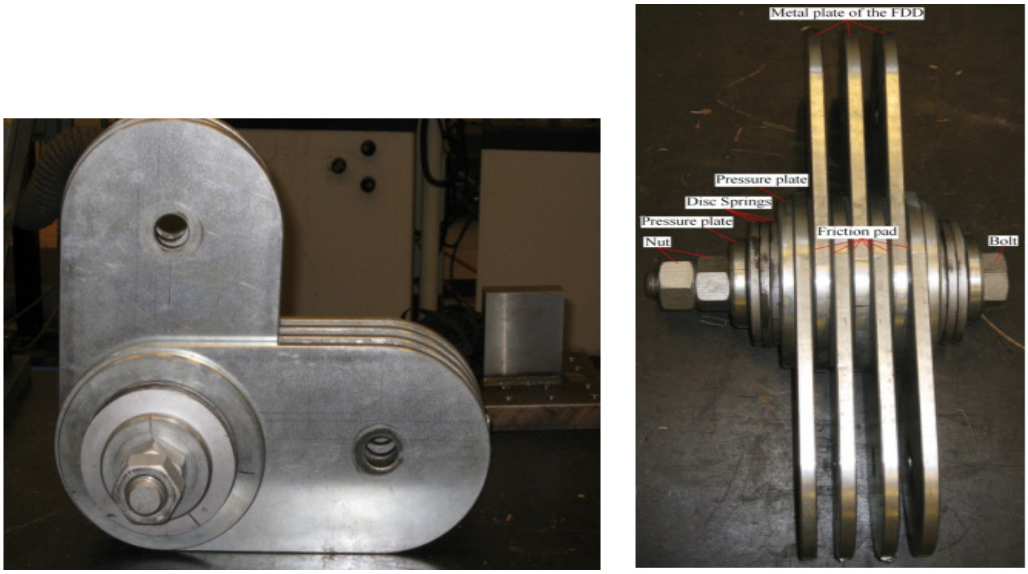
anlatılmıştır. Çalışmanın sonunda pasif enerji dağıtma sistemlerinin son uygulamalarından örnekler gösterilmiştir.

Golafshani ve Gholizad (2009) tarafından yapılan çalışmada ceket tipi açık deniz platformlarında dalga kaynaklı titreşimleri azaltmak için kullanılan sürtünme sönümleyicilerin performansı incelenmiştir. Okyanus dalgalarının rastgele doğası nedeniyle, bu cihazlarla donatılmış yapıların tepkisini değerlendirmek için tam bir stokastik analiz yöntemi kullanılmıştır.

Açık denizdeki platformun dalga kaynaklı tahriklere dinamik tepkisi, sürtünme sönümleyici cihazın ayarlanabilir parametrelerinin çeşitli düzenlemeleriyle izlenmiş, sürtünme sönümleyicinin kayma yükü ve yardımcı braket desteğinin rijitlik değeri için optimal değerler bulunmuştur. Bu optimal olarak düzenlenmiş histeretik sürtünme sönümleyici cihaz, dinamik yanıtı baskın olan derin su platformları için üst kısmın deplasman varyansında ve hızının varyansında önemli ölçüde azalmalar sağlamıştır.

Bu çalışma, ceket tipi açık deniz platformlarının yorulma ömrünü uzatmak için sürtünme sönümleyicilerinin mükemmel bir etkinliğini öngörmektedir. Ancak bu pasif cihazların etkinliği, dalga uyarımlarına yarı statik yanıt veren sığ su platformları için azalmaktadır. Sönümleyicilerde ayarlanabilir parametrelerin optimum değerleri deniz durumuna da bağlıdır ve sürtünme sönümleyicisini her deniz durumu için düzenlemek etkinliğini artırabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmadan elde edilen verilere göre sönümleyicinin etkinliği, başlangıç kayma yükünün ayarlanmasına daha duyarlı görünmektedir.

Jensen (2009) tarafından yapılan tez çalışmasında V şeklindeki sürtünme damperi cihazının stabilitesini göstermek için yapılan deneysel çalışmalar analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 2.5). Tez çalışmasında, Instron250 isimli test cihazında yapılan testlerden elde edilen veri örneklerinin deneysel olarak analizi, sürtünme sönümleyici cihazının mekanik parçalarının değerlendirilmesi, sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, sürtünmeli mekanik parçaların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada sürtünme damperi cihazı rijitliğinin parametrik bir analizi yapılmıştır. Ayrıca, enerji yayılım grafiklerini ve sürtünme sönümleyici bir cihazın kapasitesini etkileyen parametreler deneysel olarak gösterilmiştir. Genel olarak, yer değiştirme, başlangıç açısı, plakaları bir arada tutan ve sürtünme yüzeyinde normal kuvvet meydana getiren yüksek dayanımlı cıvatanın sıkılma sertliği, frekans ve plaka sayısı gibi parametrelerin enerji dağılımı, kapasitesi ve sönümleyici rijitliği üzerinde nasıl bir etkisi olduğu araştırılmıştır.



Şekil 2.5. Kullanılan sürtünme damperinin yan-ön görünüşü ve bileşenleri (Jensen, 2009)

Min ve ark. (2010) yaptıkları analitik çalışmada, tek katlı bir yapıya monte edilmiş bir sürtünme sönümleyicinin sönümleme kuvvetini belirlemek için basit bir tasarım prosedürü önermiştir. Analiz modeli, doğrusal olmayan bir Coulomb sönümleme kuvveti ile eşdeğer bir viskoz sönümleme kuvveti yaklaşıklığıyla eşdeğer bir kütle-yay-sönümleyici sistemine dönüştürülmüştür. Önerilen prosedür kullanılarak, hedeflenen bir tepki azaltma faktörünü karşılamak için gereken sürtünme kuvveti elde edilmiştir. On adet deprem kaydına maruz kalan farklı doğal frekanslardaki binalar için tepki azaltma faktörleri elde edilmiştir. Dinamik analiz sonuçlarına dayanarak, ortalama tepki azaltma faktörlerinin hedef değerlerle iyi bir şekilde eşleştiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, sismik tepkileri kontrol etmek için kullanılacak bir sürtünme sönümleyicinin basitleştirilmiş bir tasarım sürecini sunmuştur.

Takewaki (2011) binalara yerleştirilecek pasif kontrol ve enerji dağıtım sistemleri için optimallik üzerine çalışma yapmış ve elde ettiği bulguları kitap haline getirmiştir.

Performansa dayalı tasarımın gerektirdiği gereksinimleri esnek bir şekilde karşılamak için genellikle pasif kontrol sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bununla birlikte, yapı mühendislerinin bu pasif kontrol sistemlerinin optimal seçimi ve bunların yapı içindeki yerleşimi için optimum sonuçları verecek araçlara sahip değildir. Pasif kontrol sistemlerinin kullanımı sırasında özellikle bağlantı noktalarına yakın yapısal taşıyıcılarda yerel tepkilerin arttığı bilinmektedir. Ayrıca deprem hareketleri de birçok belirsizlik içermektedir. Bu nedenlerle bu tür belirsizliklerin bertaraf edilebileceği

optimallik kriteri bazlı ve optimal hassasiyet bazlı tasarım algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapının deprem etkilerine karşı performansının belirlenmesinde yer değiştirme, ivme ve deprem girdi enerjisi, üç ana hedef indeks olarak kabul edilmektedir. Kitapta, bu indeks parametreler dikkate alınarak binalar pasif kontrol sistemleri ve enerji dağıtım sistemleri uygun şekilde modellendiğinde, pasif kontrol ve enerji dağıtım sistemlerinin optimal miktarı ve yerleşiminin otomatik ve eş zamanlı olarak belirlenebildiği gösterilmiştir.

Monir ve Zeynali (2013) yaptıkları çalışmada, yeni geliştirilen bir sürtünme sönümleyicinin dinamik davranışı göstermiştir. Sürtünme sönümleyici, dokuz çelik şerit ve dokuz yüksek dayanımlı çelik cıvatadan yapılmıştır ve binalarda braket çapraz bağlantılarında kullanılabilmektedir. Tasarlanan cihaz, kare geometrik bir şekle sahiptir ve kare açıklıklara monte edilmektedir. Bu araştırma çalışması sırasında, modifiye edilmiş sürtünme sönümleyicinin prototipi bir Universal test cihazında test edilmiştir. Çalışmanın devamında sönümleyici bir SDOF çelik çerçeve içine yerleştirilerek, birkaç deprem kaydı altında sarsma tablasında test edilmiştir. Sistemin sayısal değerlendirmesi için SAP2000'de SDOF çerçeve modeli oluşturulmuş ve sarsma tablası testleri sırasında uygulanan aynı deprem kayıtları altında analiz edilmiştir. SAP2000'den elde edilen sonuçlar deneysel testler ile karşılaştırılarak sayısal modellemenin geçerliliği kanıtlanmıştır.

Çok katlı binalarda sönümleyici davranışını değerlendirmek için, sönümleyici değiştirilmiş ve sönümsüz dört katlı çerçeve modeli SAP2000'de oluşturularak çeşitli sismik kayıtlar altında analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar çok katlı binada yanal deplasmanların ve taban kesme kuvvetlerinin, modifiye edilmiş sönümleyicinin yerleştirilmesiyle önemli ölçüde azaldığını ve sönümleme sistemi tarafından önemli bir enerjinin dağıtıldığını göstermiştir.

Habibi ve ark. (2013), yaptıkları analitik çalışmada binaların tasarımındaki konvansiyonel dayanım ve yer değiştirmeye dayalı yöntemlere bir alternatif olarak, pasif enerji dağıtım sistemleriyle sismik güçlendirme için aşamalı, çok modlu, enerji tabanlı bir tasarım yöntemi önerilmiştir.

Yöntemde, eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sistemin modal akma kuvvetini ve süneklik faktörünü belirlemek için modal itme analizi kullanılmaktadır. Yönteme göre en yüksek katılım faktörlerine sahip iki mod hesapta dikkate alınmaktadır. Önerilen yöntemde her modun enerji katkısı, enerji spektrumları kullanılarak belirlenmekte ve

gerekli enerji dağıtım miktarı tahmin edilmektedir. Bulunan dağıtılması gereken enerji miktarı, orijinal yapıyı uygun enerji dağıtma sistemiyle güçlendirmede esas alınmaktadır. Çalışmanın sonunda, önerilen yöntemin etkinliği, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yapılarak doğrulanmaktadır. Önerilen yöntemin, uygulanması kolay bir yöntem olduğu ve hasarın enerji tüketen sistem içinde kalacak şekilde sınırlandırıldığı etkili bir güçlendirme tasarımı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Barmo ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada yapı tabanındaki veya üst yapının daha üst seviyelerinde özel olarak tasarlanmış izolasyon ve sönümleyiciler sistemi ile katlar arası ötelenmeleri ve zemin ivmelerini en aza indirmek için taban izolasyonu ve sismik sönümleyicilerin beraber kullanımını analitik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar kurşun-kauçuk izolatörler (LRB) ve düz kayıcı izolatörler (FSB) içeren izolasyon sistemlerini hibrit kullanılarak sismik izolasyon yapılmış binaların tepkisini, tabanda rotasyonel sürtünme sönümleyici (FDD) ilavesiyle ve geleneksel temeli olan bina ile periyot, deplasman, kesme kuvveti dağılımı ve bina yüksekliği açısından kıyaslamıştır. Çalışmada SAP2000 analiz programında çeşitli yüksekliklerdeki binalar için (sekiz, on iki, on altı ve yirmi katlı) El Centro Depremi kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında sismik analizi yapılmıştır. Sonuçlar, hibrit izolatör sistemi kullanımının, binanın yüksekliği arttıkça deplasman ve taban kesme kuvvetini azaltma açısından performansını arttırmada önemli bir etkiye sahip olduğunu, ancak binanın esnekliğinin artmasıyla katlar arası ötelenmelerde artış olduğu gözlenmiştir.

Anoushehei ve ark. (2017) pasif bir enerji dağıtma cihazı olan ve sismik yüklerin etkisindeki binaların tepkilerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan rotasyonel sürtünme sönümleyiciler üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada rotasyonel sürtünme sönümleyicisinin farklı sürtünme pedleriyle döngüsel davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla, dört sürtünme malzemesinden üretilmiş (alüminyum, galvanizli çelik, paslanmaz çelik, çelik (St37)) sürtünme pedlerine sahip bir sürtünme sönümleyicisi üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Deney sonuçları, sürtünme sönümleyicisinde kullanılan sürtünme pedlerinin FEMA356 kabul kriterlerine göre uygunluğu incelenmiştir.

Jaisee ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada sürtünme tipi pasif enerji dağıtma cihazları hakkında son teknolojik gelişmeleri ortaya koyan bir inceleme sunmaktadır. Çalışmada pasif sürtünme sönümleyiciler alanındaki gelişme ve uygulama açısından ilerlemenin kronolojisi sistematik olarak sunulmuştur. Çalışmanın amacı, daha sonraki çalışmaların kolaylığı için pasif sürtünme sönümleyicinin entegre ve bütünsel bir genel

bakışını sunmak ve bu alanda çalışacak araştırmacılar için gelecekteki araştırma yönlerini oluşturmaktır.

Çalışmada 187 adet literatür gözden geçirilerek sürtünme tipi pasif enerji dağıtma cihazları hakkında kapsamlı bir son teknoloji incelemesi sunulmaktadır. İnceleme sırasında, çeşitli sürtünme sönümleyici tiplerinin sistematik olarak kategorize edilmiş karakteristik özellikleri, sınıflandırma başlıkları altında daha ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Çalışma tarihine kadar her tip cihazda mevcut olan tüm çalışmaların detayları kronolojik olarak düzenlenmiştir. Farklı özel cihaz tiplerine ek olarak genelleştirilmiş çalışmalar ve bunların optimizasyonu, karşılaştırılması, diğer sönümleyicilerle hibrit kullanımları ve inşaat mühendisliği dışında diğer mühendislik alanlarındaki uygulamaları düzenli bir şekilde sunulmuştur. Çalışma sonunda, bu geniş ölçekli incelemeye dayanarak, bazı ana sonuç görüşler ve gelecekteki çalışmacılara tavsiyeler verilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Ülkemizde zaman zaman meydana gelen depremlerden dolayı betonarme yapılarda meydana gelen hasarlardan ve can-mal kayıplarından anlaşıldığı üzere, deprem etkilerine karşı gereken dayanıma ve enerji tüketim kapasitesine sahip olmadıkları, depremden kaynaklanan deplasman talebine yeterli cevap veremeyip çok büyük ötelenmelere maruz kaldıkları görülmektedir. Bu sebeple, başta güçlendirme yöntemleri olmak üzere, uygulanan bazı yapı rehabilitasyon yöntemleriyle bu yapıların depreme karşı davranışları iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Güçlendirme yöntemleri dışında yapı davranışını iyileştirecek başka rehabilitasyon yöntemleri de mevcuttur. Bir diğer rehabilitasyon yöntemi, yapılara ilave enerji dağıtım mekanizmaları eklemektir. Yapılara ilave enerji dağıtan mekanizmalar ekleyerek depremden kaynaklanan girdi enerjisinin bir kısmı bu mekanizmalarda tüketilebilmektedir. Deprem sırasında bir yapı üzerindeki atalet kuvvetlerinden dolayı oluşan sismik talep, yapıya gelen sismik enerji girdisi olarak düşünülebilir. Bu enerjinin bir kısmı, anında geri kazanılabilir kinetik enerji ve şekil değiştirme enerjisi olarak kendini göstermektedir. Ancak girdi enerjisinin çoğu, yapısal sönümleme ve yapıdaki lineer olmayan(plastik) deformasyon enerji kapasitesi tarafından dağıtılmalıdır. Plastik deformasyon enerjisi, çerçevedeki yapısal elemanlarda hasar oluşturarak, genellikle de yapısal elemanların belli bölgelerinde yoğunlaşarak (yığılı plastik davranış) plastik mafsallar üzerinde dağıtılmaktadır. Sönümleyici gibi ilave enerji dağıtım cihazları kullanıldığında, bu cihazlar girdi enerjisinin çoğunu kendi üzerinde dağıtabilmekte, böylece yapı üzerindeki enerji talebinin azalması sağlanabilmektedir.

Pasif enerji dağıtım mekanizmaları üzerine yapılan birçok çalışmada, yapılara eklenen sürtünme sönümleyicilerin yapı elemanlarına etkiyen deprem enerjisinin bir kısmını tüketerek taşıyıcı eleman hasarını azalttığı, böylece yapıda süneklik ihtiyacını ortadan kaldırdığı öne sürülmüştür (Symans ve ark., 2008). Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda çoğunlukla çelik yapı ve çelik çerçeve sistemler kullanılmıştır. Betonarme çerçeve ve binalarda yapılmış çalışmalar ise oldukça azdır.

Bu çalışmada incelenen rehabilitasyon yöntemi, güçlendirme yöntemlerine göre nispeten daha pratik ve uygulama esnasında yapısal işlevlerinin aksamadan devam edebileceği ekonomik bir yöntem olarak görülebilir. Daha önceden hazır hale getirilmiş sönümleyici ve braket desteklerin, rehabilitasyon yapılacak binaya sadece basit bir montaj işlemi ile eklenebilmesi pratiklik ve yapısal işlevlerin sürekliliği açısından avantaj haline gelmektedir.

Bu bölümde, çalışma kapsamında üretilmiş betonarme çerçevelerin ve bu betonarme çerçevelerin rehabilitasyonunda kullanılması tasarlanan farklı iki tipteki rotasyonel sürtünme sönümleyicinin özellikleri, malzeme özellikleri, deney düzenekleri, yükleme ve ölçüm teknikleri, elde edilen deney verilerinin değerlendirme yöntemleri gibi işlemler detaylı olarak sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmalar sırasıyla şunlardır;

1. Sürtünme Pedi Deneyleri:

Sürtünme sönümleyicilerde, plakalar arasındaki kayan arayüzde sabit bir sürtünme katsayısı elde etmek için özel malzemeler kullanılabilmektedir. Sürtünme sönümleyicide bu arayüz özel malzemelerden üretilmiş sürtünme pedi denen parçalar ile oluşturulmaktadır. Bu çalışmada da pirinç, Teflon (PTFE), karbonfiber ve kurşun olmak üzere dört farklı materyalden üretilmiş plakalar sürtünme pedi olarak kullanılmıştır. Malzemelerin sahip olduğu farklı sürtünme katsayısı, sürtünme kararlılığı, aşınma, korozyon, mukavemet ve ısı iletim özelliklerinden dolayı sönümleyici davranışı etkilenmektedir. Öncelikle bu malzemelerin V tipi sürtünme sönümleyicide belirli bir frekansta, 2 farklı genlikte (bu çalışmada 30 mm ve 50 mm genlikler kullanılmıştır), her genlik için 10'ar çevrimden oluşan çevrimsel yükleme deneyleri yürütülmüştür. Her bir sürtünme pedi materyali için değişken parametre olarak 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torku belirlenerek deneyler yapılmıştır.

Bu deneyler ile sürtünme pedlerinin farklı normal kuvvetler altında tükettikleri enerji miktarı, kayma yükü, çevrimler arasındaki enerji tüketim farkları, belirli bir çevrim sayısı sonrası sürtünme yüzeylerindeki aşınma miktarı ve muhtemel diğer hasarlar, sürtünme yüzeyindeki sıcaklık ve basınç değişimiyle ortaya çıkabilecek muhtemel sürtünme katsayısı değişimi ve buna bağlı olarak enerji dağıtımında ve kayma yükündeki değişiklikleri tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sönümleyicilerde sürtünme pedi olarak kullanımı uygun görülen materyallerden Tip 1 ve Tip 2 sürtünme sönümleyiciler üretilmiştir.

2. Tip 1 ve Tip 2 Sürtünme Sönümleyici Deneyleri:

Özellikleri itibarı ile kullanılabilecek sürtünme pedi malzemeleri belirlendikten sonra bu sürtünme pedleri, tasarımı yapılan iki farklı sönümleyicide (Tip 1 ve Tip 2) kullanılmıştır. Sönümleyici bileşeni çelik plakaları ve sürtünme pedlerini bir arada tutan, sıkıştırarak sürtünme yüzeylerinde normal kuvvet oluşturan yüksek dayanımlı cıvatalar farklı torklarda sıkıldığında farklı normal kuvvet değerleri vermektedir. Üretilen sürtünme sönümleyicinin betonarme çerçeveye uygun kapasitede ve verimli

çalışabilmesi için gereken normal kuvvet, dolayısıyla cıvataların sıkma torkları araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, sönümleyicilerin enerji tüketimi, kayma yükü, efektif rijitlik ve efektif sönüm değerleri tespit edilerek FEMA356'da belirlenen sönümleyici kabul kriterlerine göre değerlendirmeleri yapılmıştır (FEMA356, 2000).

3. Betonarme Çerçeve Numune Deneyleri:

Ülkemizde, özellikle eski yönetmeliklere göre inşa edilmiş yapıların sismik performansları düşüktür, gereken sünekliğe ve rijitliğe sahip olmayan yapılar çokça bulunmaktadır. Bu yapıların deprem şartlarına uygun hale getirilmesi için genellikle yüksek maliyetli, kaliteli işçilik gerektiren, uzun süre yapının kullanımını kısıtlayan, yapı ağırlığını artıran ve faydalı yapı alanını azaltan birtakım güçlendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Sünekliği düşük bu yapılarda, güçlendirme yerine sürtünme sönümleyici ve braket sistemlerinin kombine kullanılmasıyla, depremin yapıya etkiyen enerjisinin bir kısmı sönümleyicilerde tüketilebilmektedir. Böylece yapısal elemanlarda yüksek süneklik gerektiren enerji talepleri oluşmayacak, büyük hasarların önüne geçilecektir.

Bu çalışmada, deprem davranışı zayıf, az katlı betonarme çerçeve yapılarda geleneksel rehabilitasyon (güçlendirme vb.) yöntemleri yerine, tasarlanan sürtünme sönümleyici + braket bileşeni kullanımının nasıl bir sonuç vereceği araştırılmıştır. Bu tür yapıları temsilen üretilen iki katlı, tek açıklıklı betonarme çerçeveye, tasarlanan sönümleyiciler eklenmiş ve statik itme deneyleri yapılmıştır.

Özellikle, deprem enerjisinin yüksek binalara oranla az etkiyeceği düşük kat sayısına sahip yapılarda sürtünme sönümleyicinin tek başına etkili bir sistem olacağı öngörülmüştür. Daha önce betonarme çerçevelerde yapılan çalışma az olduğundan betonarme çerçevenin sönümleyicilerle çalışması araştırılmıştır. Diğer güçlendirme yöntemlerine göre gösterdiği performans açısından daha uygun bir çözüm olup olmadığı irdelenmiştir.

Çalışmada 1 adet yalın betonarme çerçeve referans numune olarak, 3 farklı sürtünme pedi ve 2 farklı sönümleyici tipiyle kombineli 6 adet de sönümleyicili betonarme çerçeve üretilerek statik itme deneyleri yapılmıştır. Bu tez çalışmasında yapılan analitik çalışmalar sırasıyla şunlardır;

Betonarme çerçeve deneyleri öncesi, referans çerçevenin akma yükünün tespiti ve yükleme protokolünü oluşturmak için deneylerde kullanılması planlanan betonarme çerçeve SAP2000 yapı analiz yazılımında modellenerek statik itme analizi uygulanmıştır. Referans çerçevenin yanı sıra, diğer sönümleyicili betonarme çerçeveler

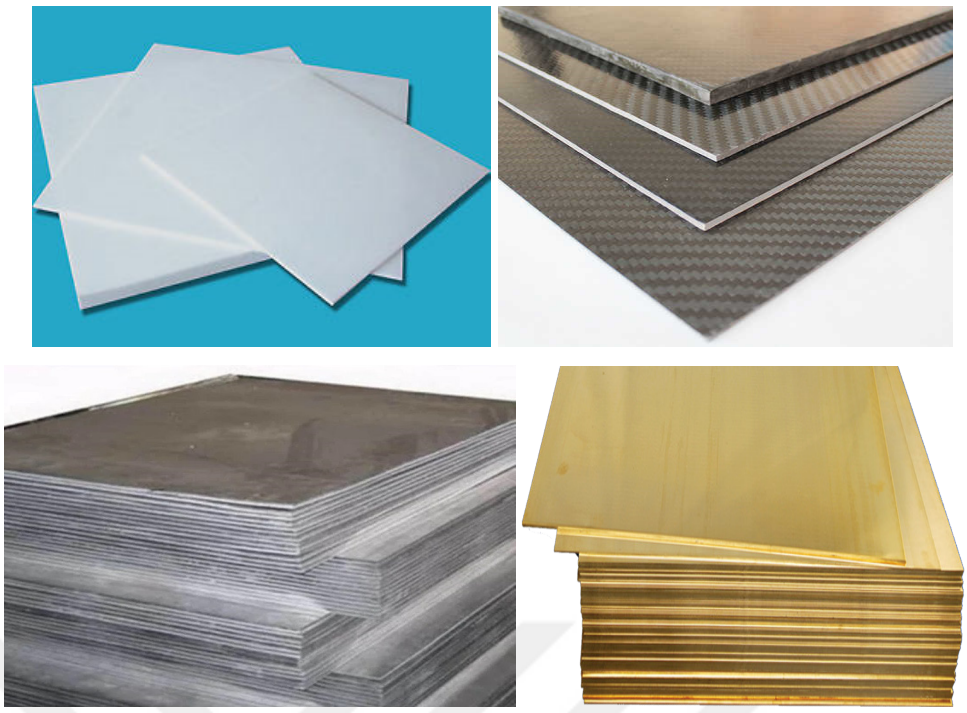
de SAP2000 (2015) yapı analiz yazılımında modellenerek statik itme analizi ile kapasite eğrileri bulunarak irdelenmiştir. Analizden elde edilen kapasite eğrileri deneysel çalışmalardan elde edilen yatay yük-deplasman zarf eğrileri ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Sürtünme Pedi Deney Numuneleri

Tez çalışmasında, sürtünmeli sönümleyicilerde davranışı büyük ölçüde belirleyen sürtünme pedleri 4 farklı malzemeden (Teflon (PTFE), Karbonfiber, Pirinç ve Kurşun) seçilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.1). Bu malzemelerden üretilen sürtünme pedlerinin kullanıma uygunluklarını belirlemek için tek mafsallı V tipi bir sönümleyici üretilerek, sürtünme yüzeyine etkiyen farklı eksenel yükler (farklı cıvata sıkma torkları) altında, belirli yükleme frekanslarında, çekme-basma adımlarından oluşan çevrimsel deneyler yapılmıştır. Elde edilen histerezis eğrileri ile kayma yükü, enerji tüketimi açısından değerlendirilmiştir. Sürtünme pedinin yüksek çevrimli deneyler sırasında deney başı, deney ortası ve deney sonunda sıcaklığı lazer termometre ile ölçülmüştür. Deney sonunda ise sürtünme pedleri ve çelik plakaların sürtünme yüzeyleri aşınma davranışı açısından gözlemsel muayene ile değerlendirilmiştir.

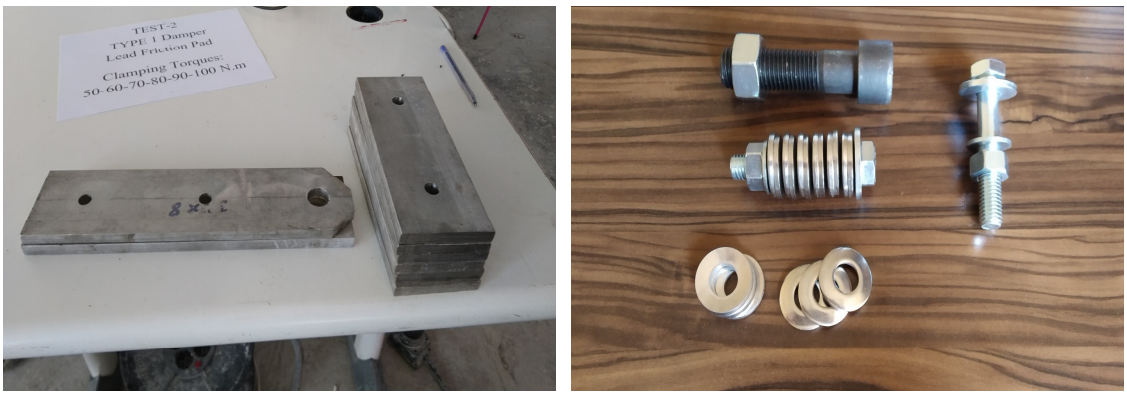
Her sürtünme pedi materyali için, üretilen V sönümleyicilerde birleştirme mafsalı cıvataları dijital bir tork anahtarı yardımıyla farklı torklarda (50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm) sıkılarak, her tork değeri için 10 çevrim 30 mm genlikte, 10 çevrim 50 mm genlikte sürtünme arayüzlerinde belirli eksenel yükler oluşturulmuş, daha sonra V tip sönümleyicideki gibi aynı şekilde çevrimsel testleri yapılarak enerji tüketim grafikleri ve kayma yükleri elde edilmiştir.

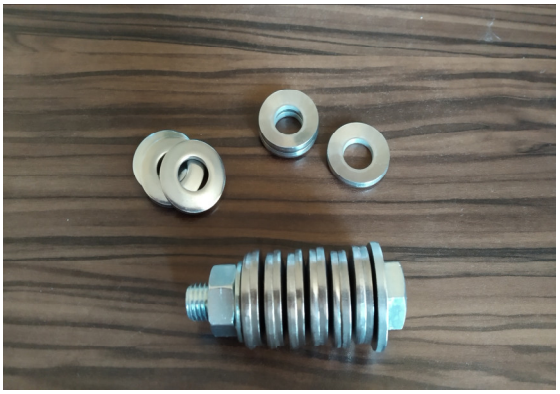
Sürtünme pedi malzemelerinin sürtünme davranışını daha sağlıklı tespit edebilmek amacıyla, her cıvata sıkma torku için yapılan deneylerde daha önce kullanılmamış sürtünme pedi numunesi denenmiştir. Ayrıca sönümleyicideki çelik plakalar tekrar kullanılacaksa, sürtünme yüzeyleri bir önceki deneyde oluşan kalıntılardan temizlenmiştir. Çünkü deneylerdeki bir diğer amaç, kullanılan sürtünme pedi malzemelerinin sabit bir sürtünme katsayısı sağlayıp sağlamadığını gözlemlemektir. Yüzeyinde yabancı madde ya da çizik gibi oluşumların bulunduğu sürtünme yüzeyleri farklı sürtünme katsayısı verebilmektedir. Kullanılan sürtünme pedi malzemelerinin sertlik derecesi, çelik plakaların sertlik derecesinden küçüktür. Bu nedenle sürtünme kaynaklı aşınmanın sürtünme pedinde oluşması beklenmektedir.



Şekil 3.1. Sürtünme pedi üretiminde kullanılan Teflon (PTFE), karbonfiber, kurşun ve pirinç plakalar (Anonim)

Tasarlanan sönümleyicilerde gövde plakası olarak 304 sınıfı paslanmaz çelik lamalar kullanılmıştır. Sönümleyici gövde plakaları 10x80 mm boyutlarındaki lamalardan uygun ölçülerde kesilerek üretilmiştir. Bağlantı ve sürtünme mafsallarındaki sıkıştırma cıvataları için uygun yerlere 13 mm ve 21 mm çapında ±1 mm toleranslı cıvata delikleri açılmıştır (Şekil 3.2 a). Bağlantı ve sıkıştırma elemanları, M12 ve M20 boyutlarında 8.8 kalitesindeki yüksek dayanımlı cıvata, somun ve pullardan seçilmiştir. Ayrıca sürtünme mafsallarındaki sıkıştırma cıvatalarında eksenel yük sürekliliğini korumak amacıyla M12 bulonla uyumlu, yay çeliğinden üretilmiş konik diskler (Belleville washer) kullanılmıştır (Şekil 3.2 b-c).





Şekil 3.2. a) Sönümleyicilerde kullanılan 304 kalite paslanmaz çelik gövde plakaları b) Sönümleyicide kullanılan cıvata, somun, pul c) Sönümleyicilerde kullanılan konik yaylar (Belleville washer)

Sönümleyicilerdeki sürtünme pedleri Teflon (PTFE), karbonfiber, kurşun ve pirinç malzemelerden belirlenen bir çapta kesilerek üretilmiştir. Sürtünme pedlerinin üretiminde 2-3 mm kalınlıklarında plakalar kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında kullanılması planlanan sürtünme pedlerinin ve 304 sınıfı çelik plakaların kullanıldığı 3 adet sürtünme sönümleyici deney elemanı üretilmiştir. Bu başlık altında, çalışma kapsamında üretilmiş V Tipi, Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyicilerin boyut, detay, üretimde kullanılan materyallerin malzeme özellikleri detaylı olarak sunulmuştur.

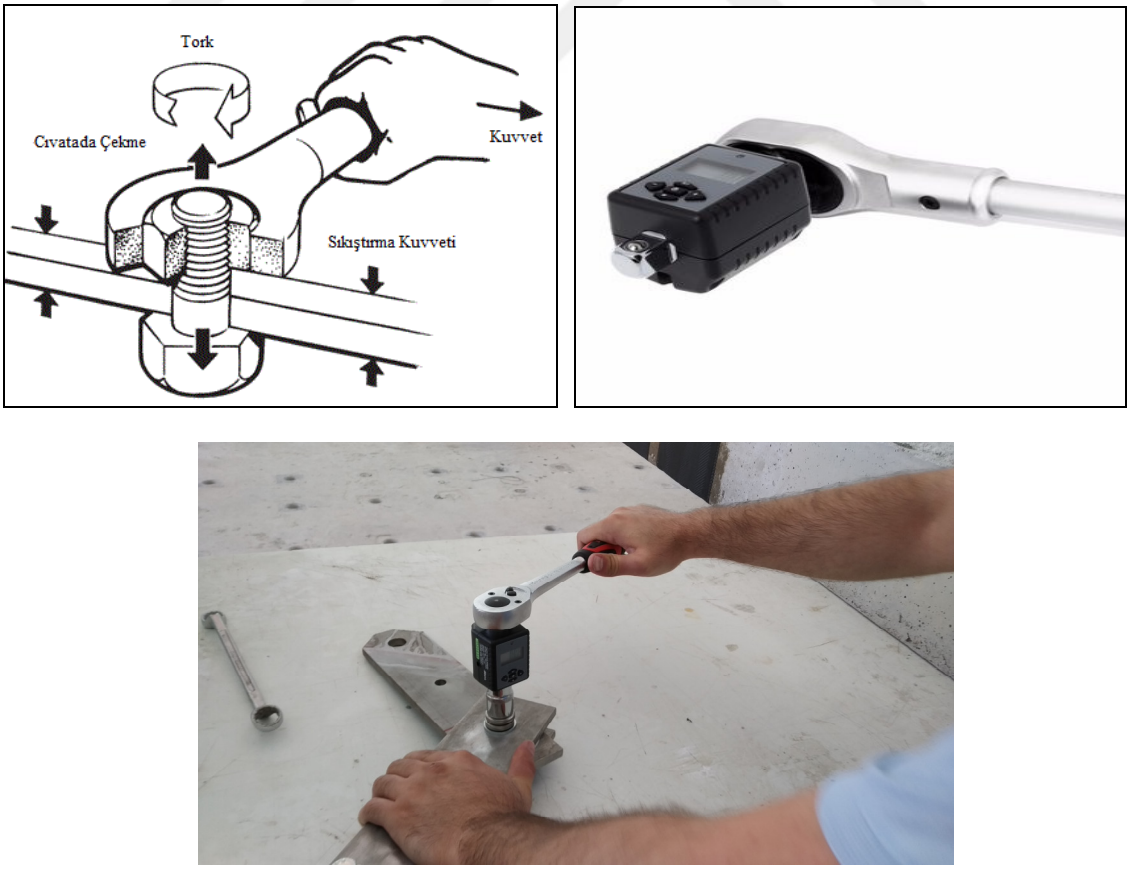
3.2. Sönümleyici Parametrelerinin Belirlenmesi

Çalışmada iki farklı tip sönümleyici tasarlanarak betonarme çerçeveye katkıları açısından farkları tespit edilmeye çalışılmıştır. Her iki tip sönümleyicide de mafsal sayısı, sürtünme pedi sayısı ve moment kolu uzunluğu özellikleri aynı tutulmuştur. Bu şekilde aynı parametrelere göre kayma yükü ve enerji tüketiminde her iki tip sönümleyicide de aynı değerler elde edilmiştir. Böylece sadece değişken parametre olarak belirlenen sönümleyici tipi (dolayısıyla montelendiği braket tipi), sürtünme pedi malzemesi ve cıvata torklarının (sürtünme yüzeylerine etkiyen normal kuvvetlerin) etkisi araştırılmıştır. Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerin çerçeve içerisinde yerleşimi, üzerinde bulunduğu braket tipi ve çalışma açısı (yön) farklılıkları nedeniyle, çerçevedeki betonarme elemanların etkileşimi, çerçevenin rijitliği, dayanımı ve aynı deplasman değerlerindeki enerji tüketimi gibi histeretik davranışları değişmektedir.

Cıvatalı bir bağlantıdaki cıvata kuvvetini doğrudan ölçmek geleneksel olarak zordur. Endüstride izlenen genel uygulama, cıvatayı sıkmak için gereken tork miktarını ölçmek ve ardından bu torku cıvata üzerindeki kuvvetle ilişkilendirmek olmuştur (Smartbolts). Çalışmada üretilen sönümleyicilerde mafsal cıvatası üzerindeki kuvvet, dolayısıyla sürtünme yüzeyindeki basınç kuvveti, cıvata sıkma torku ile

ilişkilendirilmiştir. Yapılan tez çalışmasında V sönümleyicide, her sürtünme pedi için mafsal cıvatası farklı torklarda (50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm) sıkılarak sürtünme yüzeyine gelen basınç değiştirilmiştir. Mafsal cıvatasının daha yüksek tork ile sıkılması cıvata üzerindeki öngerme kuvvetini artırmaktadır, böylece somun ile cıvata başı arasında kalan plaka ve sürtünme pedleri belirli bir kuvvet altında sıkışır (Şekil 3.3 a). Çalışmada cıvata sıkma torklarını ayarlamak için 17-340 Nm tork kapasiteli dijital tork anahtarı kullanılmıştır (Şekil 3.3 b,c). Böylece Denklem 1.1'de verilen Coulomb sürtünme yasasındaki normal kuvvet (N) çarpanı değiştirilmiştir. Denklem 1.1'deki diğer çarpan olan sürtünme katsayısı (μ) ise sürtünme pedi malzemesi çeşitlendirilerek değiştirilmiştir.

Sönümleyici-çerçeve etkileşimi, bina davranışını değiştirmektedir. Bu nedenle sönümleyicilerin değişik braket konfigürasyonları üzerinde yerleşimi, katlara konulması gereken sönümleyicinin ünite sayısı, sönümleyicilerin kayma yükü ve deplasman yapabilme kabiliyeti gibi unsurlar optimum çerçeve davranışını elde etme açısından birçok araştırmaya konu olmuştur ve olmaktadır (Hahn ve Sathiavageeswaran, 1992), (Chang ve ark., 1995), (Singh ve Moreschi, 2001), (Takewaki, 2011).

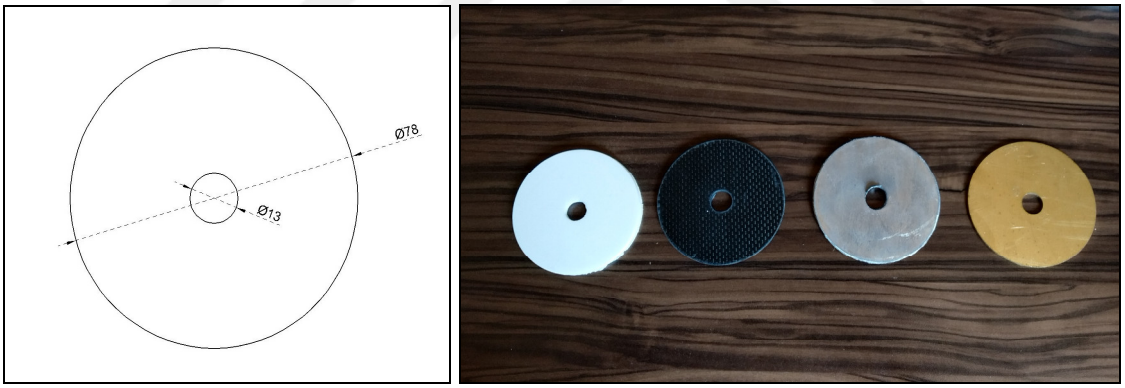


Şekil 3.3. a) Cıvata sıkma torku-sıkıştırma kuvveti ilişkisi (Smartbolts) b) Kullanılan dijital tork anahtarı c) Cıvata sıkma torkunun belirlenmesi

Sönümleyicilerdeki sürtünme pedi malzemesi ve cıvata sıkma torkunun yanı sıra bir diğer değişken de sönümleyicinin tipidir. Sönümleyici tipi; sönümleyicinin çerçevede çalışma yönü, sönümleyicinin bağlandığı betonarme elemanlar ve lokasyonu, sönümleyicinin montelendiği braket sistemi, sönümleyicinin deplasman yapabilme kapasitesi gibi özellikleri dolaylı olarak değiştiren bir parametredir. Sönümleyici ve braket sisteminin çerçeve davranışına etkisi, çerçeve-sönümleyici etkileşimi ile ilgilidir dolayısıyla bir optimizasyon problemi de ortaya çıkmaktadır.

3.3. Sürtünme Sönümleyicilerin Boyutları

Tez çalışması kapsamında üretilen sönümleyicilerin boyutları, kullanılacağı betonarme çerçevenin boyutları dikkate alınarak belirlenmiştir. Tek ünite (sönümleyicinin her mafsalında 2 sürtünme pedi 3 çelik plaka olacak şekilde) sönümleyicide yeterli kayma yükü ve deplasman sağlanabileceği düşünülerek çelik plaka boyutları mümkün olduğunca geniş ve uzun tutulmuştur. Ayrıca sürtünme pedlerinde oluşacak ısının iyi dağıtılabilmesi ve yeterli sürtünme yüzeyi alanı sağlaması için çapları büyük tutularak 78 mm, sürtünme pedi kalınlıkları ise 2-3 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.4)

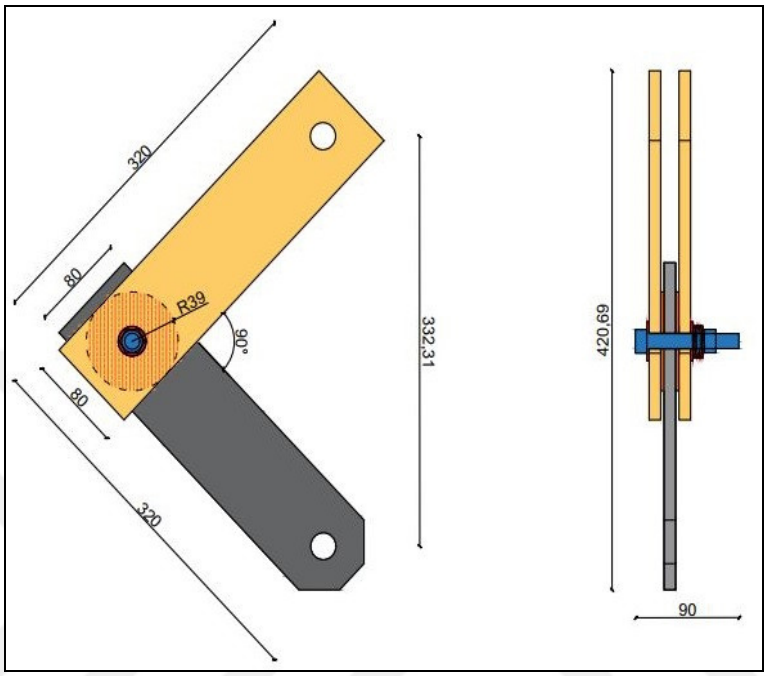


Şekil 3.4. a) Sönümleyicilerdeki sürtünme pedi ölçüleri b) Üretilen Teflon (PTFE), karbonfiber, kurşun ve pirinç sürtünme pedleri (Ölçüler mm cinsindendir)

Sönümleyicilerde kullanılan çelik plakalar belirlenirken, sönümleyicinin çalışması esnasında burkulmayı önleyebilecek ve sürtünme pedi yüzeyine cıvata öngermesinden kaynaklanan basıncı yeterince dağıtabilecek kesme rijitliğine sahip bir kalınlıkta olmasına dikkat edilerek 10 mm kalınlıkta plakalar kullanılmıştır. Sönümleyicilerdeki tüm çelik plakalar 10 mm kalınlığa sahiptir. Ayrıca çelik plakaların kalın bir kesite sahip olması sönümleyicilerdeki toplam ısı sığasını yükseltmektedir, bu şekilde sürtünme yüzeylerinde istenmeyen yüksek sıcaklıkların da oluşmasının önüne geçilmiştir.

a) V Tipi Sürtünme Sönümleyici Boyutları

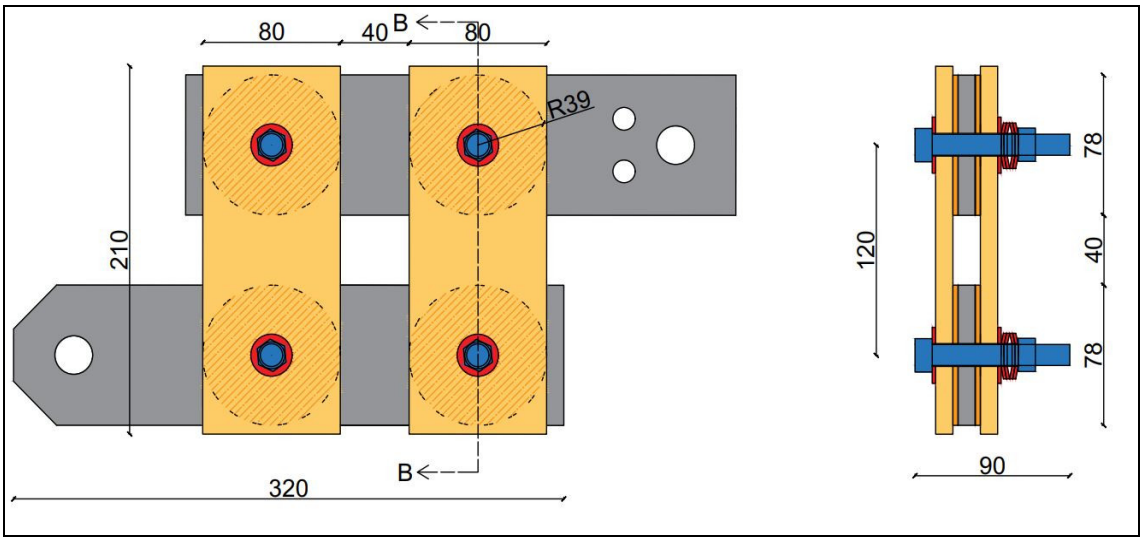
Sürtünme pedi deneyleri için üretilen V tipi sönümleyiciye ait boyutlar Şekil3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. V tipi sönümleyici boyutları (Ölçüler mm cinsindendir)

b) Tip 1 Sönümleyicinin Boyutları

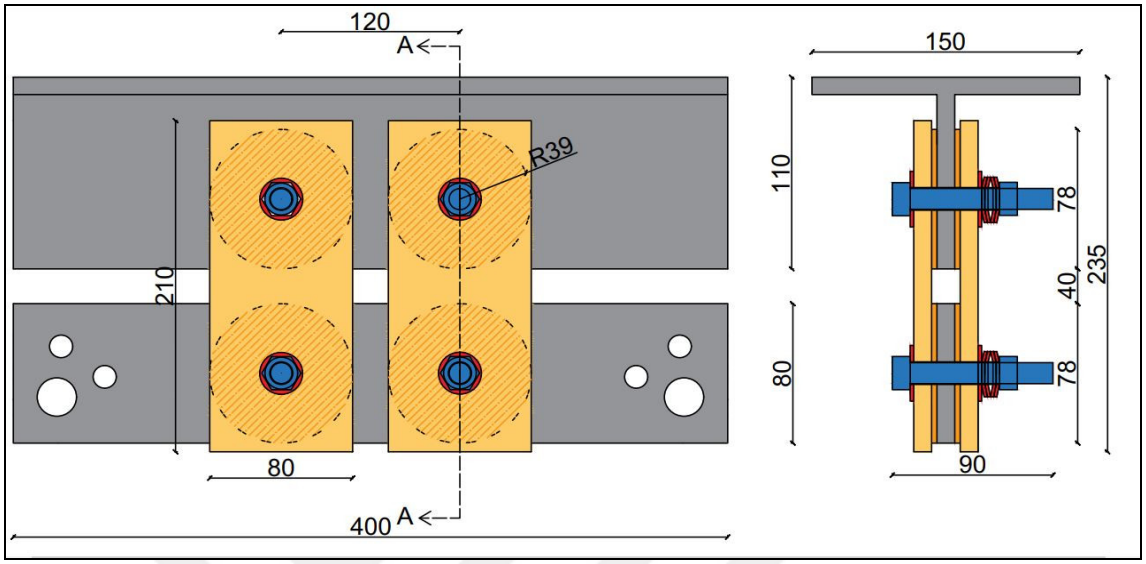
Betonarme çerçeve deneyleri için üretilen Tip 1 sönümleyiciye ait boyutlar Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tip 1 sönümleyici boyutları (Ölçüler mm cinsindendir)

c) Tip 2 Sönümleyicinin Boyutları

Betonarme çerçeve deneyleri için üretilen Tip 2 sönümleyiciye ait boyutlar Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Tip 2 tipi sönümleyici boyutları (Ölçüler mm cinsindendir)

3.4. Sürtünme Sönümleyici Numunelerin Malzeme Özellikleri

Bu bölümde V Tipi, Tip 1 ve Tip 2 sürtünme sönümleyici numunelerinin üretilmesinde kullanılan çelik levhalar ve sürtünme pedi malzemelerinin genel özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.4.1. 304 Kalite Paslanmaz Çelik

Dünyada en yaygın kullanılan paslanmaz çelik, 304 kalite ostenitik paslanmaz çeliktir. 304 paslanmaz çeliğin en yaygın kullanılma nedeni üretiminin kolaylığı ve birçok ortamda farklı şekillerde kullanılabilmesidir. Tipik olarak ağırlıkça %8 - 10 arasında nikel ve ağırlıkça % 18 - 20 arasında yüksek miktarda krom içermektedir. Ayrıca manganez, silikon ve karbon ana alaşım elementleri arasındadır. Kimyasal bileşimin ana metali ise demirdir. Alaşımda bulunan yüksek miktardaki krom ve nikel, 304 paslanmaz çeliğe mükemmel korozyon direnci sağlayan bileşenlerdir. Aşırı zorlu ortamlar için yetersiz özelliklere sahip olsa da, fiyat-performans açısından standart koşullarda üstün performans gösteren çelik türü 304 kalite paslanmaz çeliktir. 304 kalite paslanmaz çelik günlük hayatta hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, gıda işleme ekipmanlarının üretimi, kimyasal üretim sektörü, otomotiv sanayii,

ev aletleri ve mutfak eşyalarının üretimi, standart karbon çeliğini korozyona uğratabilecek ortamlardaki yapıların inşası gibi alanlarda kullanılmaktadır.

304 kalite paslanmaz çeliğin mekanik dayanımları ve sürtünme mukavemeti yüksektir. Bu sınıftaki çelik malzemeler şekil verme ve kaynaklanabilme kolaylığına sahiptir. Ostenitik bir çelik sınıfı olduğundan mıknatıslanma özelliği bulunmamaktadır. 304 kalite paslanmaz çeliğin akma mukavemeti 205-210 Mpa, kopma mukavemeti 515-720 Mpa, ve Brinell sertliği 201'dir.

Sönümleyiciler uzun yıllar boyunca uygun olmayan hava ve çevre koşullarına maruz kalabilmektedir. Bu nedenle sönümleyicinin üretildiği malzemelerin korozyona uğramaması gerekir. Korozyona uğrayan sönümleyici bileşenlerinde hem kesit kayıpları hem de sürtünen yüzeylerde oluşması muhtemel korozif tabaka nedeniyle sürtünme katsayısı değişebilmektedir. Bu sebeple çalışmada üretilen sönümleyicilerde 304 kalite paslanmaz çelik plakalar kullanılmıştır. Sürtünme mukavemeti yüksek olduğundan ve korozyona karşı dirençli olduğundan daha kararlı bir sürtünme davranışı elde edileceği öngörülerek çelik levhalarda 304 kalite paslanmaz çelik tercih edilmiştir.

3.4.2.Teflon (PTFE)

Teflon (PTFE), birçok yönden dikkat çekici polimer bir malzemedir. Polimerler arasında en geniş sıcaklık aralığında yararlı özellikler sergileyen yarı kristal yapıya sahiptir. Teflon (PTFE), -270ºC'de bile sünekliğini korur ve bazı durumlarda 540ºC'lere varan sıcaklıklarda kullanılabilmektedir. Tüm yaygın çözücü kimyasallarda çözünmez ve hemen hemen tüm asidik ve kostik maddelere karşı dirençlidir. Teflon (PTFE), en yüksek özdirence sahip malzemeler arasında gösterilmektedir, çok yüksek elektriksel yalıtkan dayanımına ve düşük yalıtkanlık kaybına sahiptir.

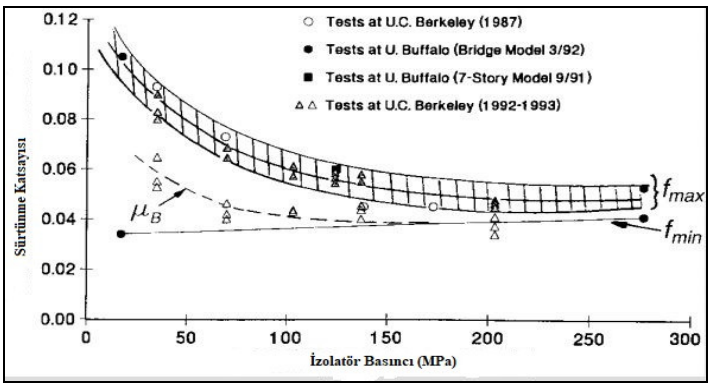
Çoğu malzemenin yüksek sıcaklıklarda düşük viskozite göstermesine rağmen, Teflon (PTFE)'un yüksek eriyik viskozitesine (380°C'de 10^{11} P) sahip olması, daha kapsamlı endüstriyel ve mühendislik kullanımını sınırlamaktadır. Bu durum, polimerlerdeki ucuz kalıplama yöntemleri olan enjeksiyon ve şişirmeli kalıplamanın kullanımını engellemektedir. Bu nedenle Teflon (PTFE) parça üretimi için yalnızca pahalı yöntemler olan sinterleme ve ekstrüzyon imalat prosesleri kullanılmaktadır.

Teflon (PTFE) ile temas eden birçok mühendislik malzemesi arayüzündeki sürtünme katsayısı (çelik yüzey ile μ_{statik} = 0.01-0.08) son derece düşüktür ve PTFE ile sürtünen yüzeylerin aşınmayı azaltan bileşiklerle de sinterlendiğinde, endüstriyel açıdan önemli bir yatak malzemeleri sınıfı oluşturmaktadır. Düşük sürtünme katsayısı ve

kimyasal kararlılığı ile birleştiğinde, Teflon (PTFE)'ye diğer malzemelerin yapışması neredeyse imkansızdır. Bu özellik genellikle temizleme kolaylığının önemli olduğu endüstriyel işleme teknolojisinde ve düşük sürtünme direnci istenen mekanik parça üretimlerinde kullanılır (Rae ve Dattelbaum, 2004), (DuPont).

Pasif enerji dağıtım sistemleri açısından ise çelik-Teflon (PTFE) arayüzünde kayma prensibiyle çalışan izolatörler, geçmişte köprülerdeki termal hareketleri ve ön gerilme, sürünme ve büzülme etkilerini karşılamak için yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Daha yakın zamanlarda, sismik izolasyon sistemlerinin bir parçası olarak, yapının ağırlığını geri merkezleme yeteneği sağlamak için küresel bir yüzey üzerinde hareket eden mafsallı bir sürgüden yararlanan FPS (Friction Pendulum System) gibi izolatör versiyonları uygulama evresine geçmiştir (Zayas ve Mahin, 1987), (Zayas ve ark., 1989). Bu sistemlerde de yatay hareket rijitliğinin az olması hedeflendiğinden, kayan yüzeyde pürüzlülüğü azaltılmış çelik-Teflon (PTFE) ikilisi kullanılmıştır (Dolce ve ark., 2005).

Çelik-Teflon (PTFE) kayma yüzeyli izolasyon sistemleri ile donatılmış yapıların sismik davranışının birçok sayısal analizi yapılmıştır (Mostaghel ve Tanbakuchi, 1983), (Fan ve ark., 1988). Tüm bu çalışmalarda ve mevcut tasarım pratiğinde sürtünme katsayısının Coulomb sürtünme yasasına uygun olduğu (yani kayma sırasında sürtünmenin sabit kaldığı) varsayılmaktadır. Çelik-Teflon (PTFE) kayma yüzeyi üzerine yapılan deneysel gözlemler (Constantinou ve ark. (1987), Hwang ve ark. (1990), Mokha ve ark. (1990)), sürtünme katsayısının kayma hızı arttıkça lineerden daha fazla arttığını, temas basıncının artmasıyla ise azaldığını belirtmiştir. Sürtünme katsayısının düşmesinde sıcaklık ve kayma çevrim sayısı da ihmal edilemez bir rol oynamaktadır (Tyler, 1977).



Şekil 3.8. Normal sıcaklıkta, parlatılmış paslanmaz çelikle temas eden PTFE esaslı kompozitin yükselen eksenel basınçla düşen sürtünme katsayısı (Soong ve Constantinou, 1994; FEMA356, 2000)

Mokha ve ark. (1990), Soong ve Constantinou (1994) yaptıkları çalışmalardan elde edilen bilgilere göre, çelik-Teflon (PTFE) arayüzlerinin üzerindeki basınç ve

sıcaklık arttığında sürtünme katsayısı azalmaktadır (Şekil 3.8). Çevrim sayısının çok olması ise iki farklı mekanizmaya bağlı olarak sürtünme katsayısını düşüren bir etkiye sahiptir. Çevrim sayısı arttığında sürtünen yüzeylerdeki sıcaklık artar ve sürtünme katsayısı azalır. Sürtünme katsayısını düşüren diğer bir etki de aşınmadır. Çevrim sayısı arttığında Teflon (PTFE) yüzeyde aşınma meydana gelmekte, yüzeydeki pürüzlülük azaldığından (cilalanma) sürtünme katsayısı azalan bir trend izlemektedir. Yağlanmış çelik-Teflon (PTFE) arayüzleri için sürtünme çok daha düşüktür ve Teflon (PTFE)'un aşınmasının yağlanmamış arayüzlere göre çok daha az olması beklenmelidir (Dolce ve ark., 2005).

Bu çalışmada da çelik ile sürtünmesinde en düşük sürtünme katsayısına sahip olması ve termal özellikleri nedeniyle, referans bir sürtünme pedi malzemesi olması bakımından Teflon (PTFE), sürtünme pedi deneylerine dahil edilmiştir.

3.4.3. Karbonfiber

Karbonfiber son yıllarda kullanımı sıklaşan kompozit malzemelerden biridir. Karbonfiber kompozitler bazı yapı çeliği türlerinden %80 daha hafifken, %400-500'e varan oranlarla daha dayanıklıdır. Karbonfiber takviyeli polimerler (Carbon Fiber Reinforced Polymer-CFRP) birçok endüstriyel alanda imalat için kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv (yakıt tankları, kaporta parçaları, tekerlek jantları, fren balataları, rotor, tampon ve şasiler), denizcilik (gemi gövdeleri), havacılık ve uzay teknolojileri (uçak parçaları, uydular), spor malzemeleri (bisiklet kadro ve jantları, golf sopaları, kayaklar, tenis raketleri, oltalar, yay ve oklar), enerji üretimi (türbin kanatları, yakıt hücresi, yel değirmenleri), tıbbi cihazlar, müzik aletleri, silah parçaları, protezler, robotik kollar, model araçlar, dronlar gibi malzemede hafifliğin yanında yüksek mukavemet istenen alanlarda kullanımı yaygındır. İnşaat mühendisliği alanında ise, yapıları güçlendirme amaçlı olarak karbonfiber (CFRP) lifli kumaşlar kullanılmaktadır. Kolon, kiriş, perde duvar gibi betonarme taşıyıcı elemanların çevresine epoksi bazlı reçine ile yüzeysel yapıştırma tekniğiyle karbonfiber lifli kumaşlar sarılarak dayanımlarının artırılmasında rol oynamaktadır. Karbonfiberin bir diğer kullanım alanı ise betonarmede donatı olarak kullanımı olup, bu amaçla geliştirme ve imalata yönelik araştırmalar sürmektedir.

Karbonfiber takviyeli polimer (CFRP) plakalar, karbonfiber lifler ile güçlendirilmiş bir polimer matris kompozit malzemedir. Plakaların üretiminde birbirini 90º açıyla kesen karbonfiber lif demetleriyle dokunmuş kumaşlar kullanılır. Elde edilmek istenen plaka kalınlığına göre karbonfiber kumaşı katman sayısı

artırılabilmektedir. Matris fazında kumaşlardaki lifleri sararak katmanları birbirine yapıştıran karbon bazlı reçine kullanılmaktadır. Karbonfiber takviyeli polimerler (CFRP) aşağıdaki özelliklerle karakterize edilir:

- Hafiflik,
- Yüksek mukavemet-ağırlık oranı,
- Çok yüksek elastisite modülü,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek korozyon direnci,
- Çok düşük termal genleşme katsayısı,
- Yüksek elektrik iletkenliği,
- Yüksek ısı direnci,
- Aşındırıcılara karşı yüksek direnç (asit, alkali, tuz, kötü hava vb.).

Yüksek kaliteli bir sürtünme malzemesi, değişken ve zorlu hizmet koşullarını karşılamak için kararlı sürtünmeye ve düşük aşınmaya sahip olmalıdır. Sürtünen yüzeylerde meydana gelen sürtünme ısınması nedeniyle sıcaklıkta büyük bir artış olabilmektedir. Sıcaklığın çok artması sürtünme malzemesinin etkinliğini olumsuz etkileyerek azaltmaktadır. Özellikle organik bir sürtünme malzemesi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, normal düşük sıcaklıktaki sürtünme katsayısı azalmaktadır (Guan ve ark., 2004).

Yapılan çalışmalar, karbonfiberin sürtünme davranışını iyileştirme amaçlı, içeriğine katıldığı kompozit sürtünme malzemelerinde, yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve yüksek iletkenlik vb. gibi mükemmel mekanik ve termal özellikleri sayesinde sürtünme katsayısının düşmesini engellediğini göstermektedir. Karbonfiberin 150ºC'nin altında mükemmel bir kendi kendini yağlama özelliği sağlaması nedeniyle sürtünme katsayısı nispeten düşük ve kararlıdır. Bununla birlikte, karbon fiberin yağlama kabiliyeti yüksek sıcaklıkta kaybolmaktadır (Li, 1987; Guan ve ark., 2004). Aksine, karbon lifler, yüksek sıcaklıkta yapısına katıldığı kompozitin sürtünme katsayısını artıran bir sürtünme değiştirici görevi görürken, mukavemet değeri düşük sıcaklıkta olduğu gibi hemen hemen aynı kalmaktadır.

Karbonfiberin yüzey özellikleri, kompozit malzemeler içine bir bileşen olarak girdiğinde aşınma davranışını etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda karbonfiberin aşınma hızı ve sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Karbonfiber ile güçlendirilmiş kompozitlerin aşınma oranı, diğer kompozitlerden daha düşüktür. Bu durum, karbonfiberin yüzey özelliklerinin, karbonfiber ile bağlayıcı matris arasındaki

bağlanma kuvveti üzerinde bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Karbonfiber lif yüzeyinin pürüzlülüğünü artıran birtakım modifikasyonların, karbonfiberi daha aktif hale getirerek, karbonfiber ile bağlayıcı (matris) arasındaki bağlanma kuvvetini daha fazla arttırabilmektedir. Sonuç olarak, karbonfiber ile güçlendirilmiş kompozitlerin aşınma özellikleri çok daha fazla gelişebilmektedir.(Guan ve ark., 2004)

Ma ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada doğal lif ve karbon lif takviyeli malzemeler arasındaki sürtünme ve aşınma performansının karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, karbonfiberin mükemmel ısıl iletkenliği nedeniyle, katıldığı kompozitin daha yüksek sürtünme kararlılığıyla sonuçlanmıştır. Karbonfiberle güçlendirilmiş disk şeklindeki (rotor benzeri) sürtünme malzemesi, değişken uygulanan basınç ve dönme hızı koşulları altında daha yüksek sürtünme torku ve daha düşük sıcaklık artış hızı sağlayabilmektedir. Karbonfiber liflerinin iyi dağılımı ve mükemmel mekanik özellikleri sayesinde, özellikle karbonfiber katkılı dönen disklerde başlangıç yüzeyinde daha az gözenek oluşumunu sağlanmış, diskte yüksek aşınma direncini artırmıştır (Ma ve ark., 2022).

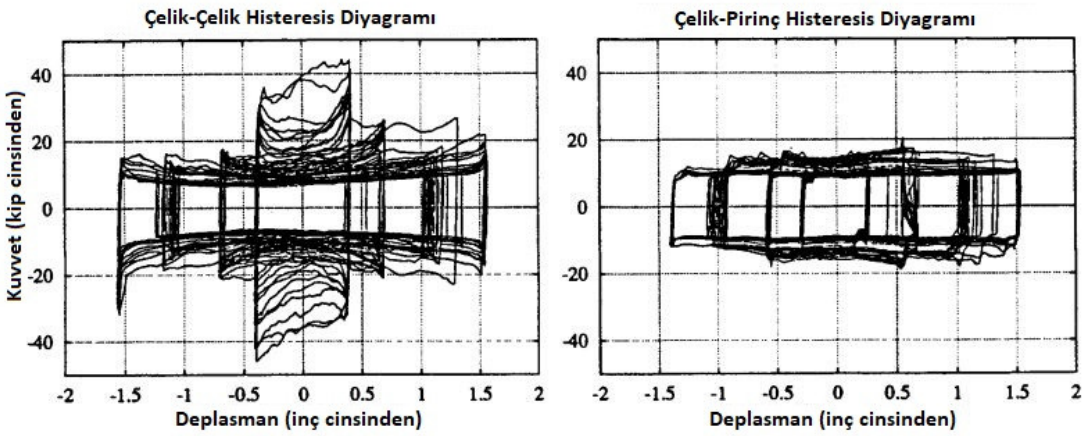
Bu tez çalışmasında da karbonfiberin yüksek mukavemeti, yüksek ısı iletme katsayısı, kararlı sürtünme davranışı ve yüksek aşınma direnci nedeniyle sürtünme pedi malzemesi olarak kullanımı uygun görülmüştür.

3.4.4. Pirinç

Pirinç, içerik olarak %60'ın üstünde bakır içeren bir alaşımdır. Genellikle bir bakır alaşımı olarak sınıflandırılır. İçerisinde %10'dan fazla çinko içermekle (çoğu alaşımda % 30'dan fazla) beraber, değişen oranlarda kurşun, arsenik, fosfor, alüminyum, mangan, demir, nikel, kalay gibi elementleri de alaşımı içeriğinde bulunabilmektedir. Pirinç, bakırdan daha güçlü ve sert olmasının yanı sıra şekil verilebilme ve çatlamalara dayanıklılık açısından bakırdan daha avantajlıdır. Öne çıkması istenen özelliğe göre alaşımdaki element oranları değişebilmektedir. Diğer metal elementlere göre nispeten daha düşük sürtünme katsayısına ve daha yüksek korozyon direncine sahiptir.

Fitzgerald ve ark. (1989), çelik braket elemanlarda burkulmayı önlemek ve enerji tüketimini iyileştirmek için slotlu cıvatalı bağlantılarda kaymanın gerçekleşmesine izin veren bir sürtünme cihazı önermiştir. SBC bağlantının ilk versiyonu sayılan bu cihaz, üzerinde slot bulunan bir guse plakasından, ve yine üzerinde slot bulunan iki sırt sırta U profilden oluşmuştur. Guse plakasına iki yandan yaslanan U profiller, slotlardan geçirilmiş Belleville rondelalı cıvatalarla sıkıştırılmıştır. Cihazdaki kayar arayüz sadece çelikten oluşmaktadır. Daha sonra Grigorian ve ark. (1993) tarafından yürütülen

çalışmalar sonucu Fitzgerald'ın önerdiği slotlu cıvatalı bağlantı cihazına benzeyen yeni bir versiyon önerilmiştir. Bu yeni cihazda kayan ara yüze pirinç plakalar eklenerek kayma yüzeyinde bir iyileştirme tanıtılmıştır. Pirinç-çelikten oluşan arayüz daha kararlı bir sürtünme özelliği sergilemiştir. Grigorian ve ark. (1993) slotlu bağlantılı üç katlı bir çelik bina modelinin deprem simülatörü testlerini gerçekleştirmiş ve cihazın tepkiyi azaltmadaki etkinliğini göstermiştir.



Şekil 3.9. Çelik-çelik ve çelik-pirinç sürtünme yüzeylerinin histeretik eğri karşılaştırması(Grigorian ve ark., 1993)

Pirinç, yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı bir yapının yaşam süresi boyunca kayma yükünü başarıyla tutabilmektedir. SBC cihazlarında çelik ve pirinç plakalar cıvatalar yardımıyla birbirine sıkıldığından, cıvatadaki öngerme kuvvetinin düşmesine yol açan kesit kayıpları önemlidir. Kesit kayıpları genellikle korozyon ve mekanik aşınma gibi durumlar sonucunda ortaya çıkmaktadır. Pirinç sürtünme pedleri yüksek korozyon direncine sahip olduğundan, SBC tipi sürtünme sönümleyicilerin sürtünme kuvvetlerini indükleyen metal olarak yaygın kullanılmaktadır. Çelik-çelik sürtünme yüzeylerine göre çelik-pirinç yüzeylerinin daha kararlı histerezis davranışı gösterdiği görülmüştür (Şekil 3.9) (Grigorian ve ark., 1993).

Pirinç malzemenin çelik ile temasında tribolojik özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada sıcaklık, hız/yük ve yük/sıcaklık etkileşimlerinin sürtünme katsayısı üstünde büyük etkisi olduğu görülmüştür. Taguchi tekniğine göre yapılan deneylerde değişken parametrelere göre çelik ile pirinç arayüzünde 0.2-0.35 aralığında değişen sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının, sıcaklığın yükselmesiyle arttığı görülmüştür (Davim, 2000).

Pirinç malzemesinin sahip olduğu yüksek korozyon direnci, yüksek ısı iletim katsayısı ve kararlı sürtünme davranışı nedeniyle pirinç sürtünme pedlerinin tasarlanan sürtünme sönümleyicilerde kullanılması planlanmıştır. Çalışmada sürtünme pedi olarak

kullanılan pirinç malzeme %60 bakır, %40 çinko içeriğine sahip “60/40 Brass” olarak isimlendirilen alaşımdır.

3.4.5. Kurşun

Kurşun metali, gümüş, bakır, çinko gibi metallerle beraber doğada bulunan, diğer metallere göre yumuşak, kolayca şekillendirilebilen, korozyona dirençli, yüksek özgül ağırlığına sahip, düşük erime noktası ve düşük çekme dayanımı olan, sünek bir elementtir. Kullanım alanlarına bakıldığında akülerde, yeraltı kablolarının izolasyonunda, mermi çekirdeklerinde, çeşitli alaşımların bünyesinde, radyasyon yalıtımlarında, bazı kimyasalların ve boyaların içeriğinde, gemi ve bazı araçlardaki denge balastlarında, çatı kaplamalarında, bazı asitlerin (sülfürik asit vb.) depolama tanklarının yapımında, elektronikte lehim malzemesi ve yarı iletkenlerde sık kullanıldığı görülmektedir. İnşaat mühendisliği alanında ise bazı izolatör ve sönümleyicilerde kullanılmaktadır. Sismik izolasyon sistemlerinde yatay rijitlik ve enerji tüketim kapasitesi sağlamak amacıyla kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin (LRB) çekirdek kısmında bulunmaktadır. Bir diğer kullanım alanı ise kurşun ekstrüzyon sönümleyicilerde (LED) akma malzemesi olarak kullanımıdır.

Ekstrüzyon, yüksek üretim miktarları, düşük maliyetleri ve artan fiziksel özellikleri nedeniyle en önemli metal şekillendirme işlemlerinden biridir. Kurşun yumuşak bir metal olduğu için ekstrüzyon işlemi ile kolayca işlenebilmektedir. Bir diğer özelliği ise diğer metallere göre sürtünme katsayısının yüksek olmasıdır. Muhtemelen sürtünme katsayısının yüksek olmasında aşınma mekanizmasının diğer metallerden farklı olması rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, kurşun metalinin sahip olduğu yüksek sürtünme katsayısı, korozyona dirençli olması ve yeterli sayılabilecek bir basınç dayanımı sebebiyle kurşun sürtünme pedlerinin tasarlanan sürtünme sönümleyicilerde kullanılması planlanmıştır.

3.5. Seçilen Sürtünme Pedi Malzemelerinin Sürtünme Katsayıları

Sıfırdan büyük bir normal kuvvetin etkisi altında, birbiri üzerinde kayan veya kaymak üzere olan katı malzemeler arasındaki sürtünme katsayısı, göreceli katkıları duruma göre değişen birkaç faktörün bir fonksiyonudur. Bu faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Malzemelerin kompozisyonu
- Her bir katının yüzey finişi (pürüzlülük, yüzeylerde kayma yönünü belirleyen yivler, yüzeyde yağ ve yabancı materyallerin bulunması, korozyon)
- Çevredeki ortamın doğası (nem, sıcaklık)

• Katıları temas halinde tutan kuvvet (yük)

• Göreceli hareketin hızı

• Göreceli hareketin doğası (örneğin, tek yönlü, ileri geri, sabit, değişken vb.)

• Temasın doğası (uyumlu ve uygun olmayan yüzeyler)

• Arayüzey bölgesinin sıcaklığı

• Yüzeylerin önceki kayma geçmişi

• Test makinesinin özellikleri ve malzemelerin tutturulduğu fikstürler (Blau, 1992).

Çalışmada kullanılan 4 farklı sürtünme pedi malzemesinin kuru sürtünme durumunda statik ve dinamik sürtünme katsayıları aşağıdaki gibi verilebilir;

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan sürtünme pedi materyallerine ait sürtünme katsayısı değerleri (Blau, 1992);(engineeringlibrary.org, 2023),(Barrett, 1990)

Sürtünen Malzeme Çifti	**μ_S**	**μ_D**
Paslanmaz çelik-Teflon (PTFE)	0,04-0,08	0,04-0,08
Paslanmaz çelik-Karbon	0,40-0,64	0,27-0,50
Paslanmaz çelik-Pirinç	0,35-0,51	0,24-0,44
Paslanmaz çelik-Kurşun	0,95	0,80-1,40

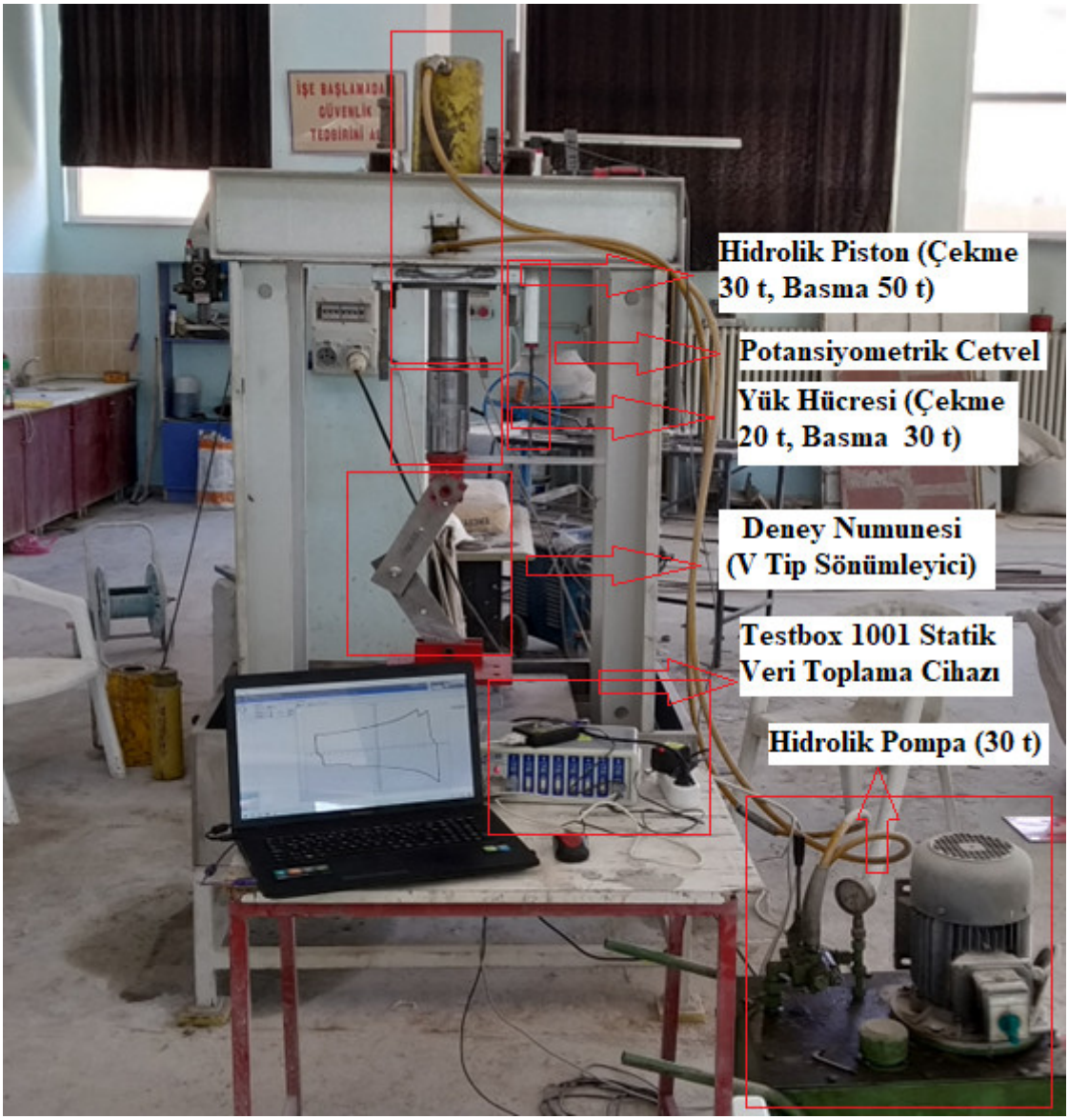
Yukarıdaki Çizelge 3.1'de verilen bilgilere bakıldığında sürtünme katsayılarının belirli bir aralıkta değişkenlik gösterebildiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının bulunmasında izlenen deney yöntemlerinin farkı ve yukarıda bahsedilen faktörler nedeniyle bulunan değerler değişiklik göstermektedir. Yalnız deneylerden elde edilen sürtünme katsayılarına bakıldığında sürtünme katsayısı hakkında genel bir fikir edinilmektedir. Teflon (PTFE) hem düşük sürtünme katsayısı hem de basınç ile daha fazla düşen sürtünme kuvveti nedeniyle sönümleyicide kullanımı uygun değildir. Sönümleyicilerde sürtünme katsayısının daha az değişken ve yeterli enerjiyi dağıtabilecek büyüklüğe sahip olması istenmektedir.

3.6. Sürtünme Sönümleyici Deney Düzeneği

Tez çalışmasının ilk safhasında, tasarlanan rotasyonel sürtünme sönümleyicileri test etmek amacıyla KTÜN Deprem Laboratuvarında bulunan boru test cihazı modifiye edilerek 20 ton çekme, 30 ton basma yapabilen, ± 15 cm strok aralığına sahip sönümleyici test cihazı teşkil edilmiştir. Test cihazı maksimum 500 bar basınçla çalışan, deney düzeneğine 30 ton basınç, 20 ton çekme yükü sağlayabilen hidrolik pompa ile beslenmiştir. Sönümleyicileri deney düzeneğine bağlamak için yük hücresi ucuna ve

düzenek tabanına ±0.5 mm toleranslı M20 bulona uygun, çelik mafsallı bağlantı detayları takılmıştır. Oluşturulan mafsallı bağlantı detayları sönümleyicinin deney boyunca aynı düşey eksen üzerinde hareket etmesini ve bağlantı noktalarında oluşabilecek istenmeyen moment etkilerinin ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Sönümleyicilerin çevrimsel yük davranışlarının elde edilebilmesi için tasarlanan bu deney düzeneğinde, sönümleyici numunelere yarı statik çevrimsel yükleme (düşük hızda sıfıra yakın ivme ile) uygulanmıştır. Test cihazında çekme-basma strokunu ölçebilmek için OPKON marka, yaylı, 500 mm uzunluğunda potansiyometrik cetvel kullanılmıştır. Test cihazının üst bağlantılarına düşeyde çalışacak şekilde sabitlenen potansiyometrik cetvel, yük hücresi ucunda bulunan mafsallı bağlantı detayındaki yatay çelik plakaya bastırılmıştır. Bu şekilde, yük pistonunun çekme-basma hareketiyle birlikte, sönümleyicilerdeki yer değiştirme büyüklükleri hassas bir şekilde ölçülmüştür. Test edilen sönümleyici numuneye uygulanan çekme-basma yükünü ölçmek için 20 ton çekme, 30 ton basma yükü ölçebilen kum saati tipi bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi, hidrolik piston ve üst mafsallı bağlantı detayı arasındaki birleşimler, bileşenlerdeki yivlere göre diş açılarak üretilmiş çelik ara bağlantı parçaları ile sağlanmıştır. Sönümleyici test düzeneği Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

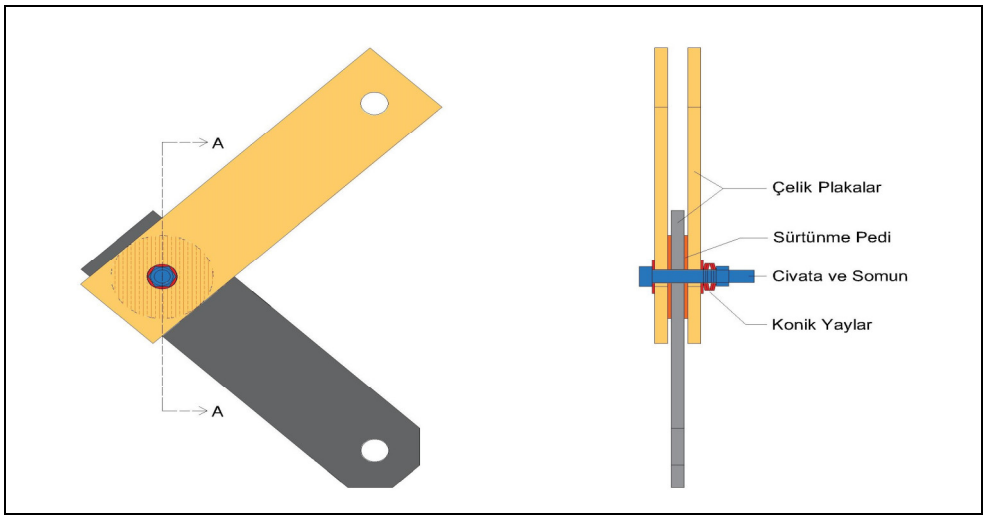
Deneyler, iki farklı genlik ve iki farklı frekansta gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği sabit hızda çalıştığından 30 mm genlikte 0.1 Hz, 50 mm genlikte 0.06 Hz frekansta deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı sıkıştırma torklarında sıkılmış cıvatalara sahip V tipi sönümleyiciler 10'ar çevrimden, Tip 1 ve Tip 2 sönümleyiciler ise 20'şer çevrimden oluşan bir dizi deplasman kontrollü döngüsel yüklemeye tabi tutulmuş ve histerezis eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Sönümleyici yükleme düzeneği bileşenleri

3.7. V Tipi Rotasyonel Sürtünme Sönümleyicilerin Hazırlanması

Sürtünme pedi deneyleri için üretilen V sönümleyici, bir iç ve 2 dış çelik plakanın kullanıldığı (1 ünite), tek mafsal üzerinde 2 adet sürtünme pedine sahip rotasyonel sürtünme sönümleyicidir. Sürtünme mafsalı M12 cıvata ile sıkılmıştır ve somun altında 4 adet seri bağlı Belleville rondelası (konik yay) bulunmaktadır. Çalışmada sürtünme pedi deneylerinin yapıldığı V tipi rotasyonel sürtünme sönümleyiciler Şekil 3.11'de verilen görünüşlerdeki gibi birleştirilerek hazırlanmıştır. Deney düzeneğine plakaların uçlarında bulunan M20 uyumlu bulon delikleri ile dönebilen mafsallı olarak bağlanmıştır. Şekil 3.12'de ise sönümleyici deney düzeneğine monte edilmiş bir V Tipi sönümleyici gösterilmiştir.



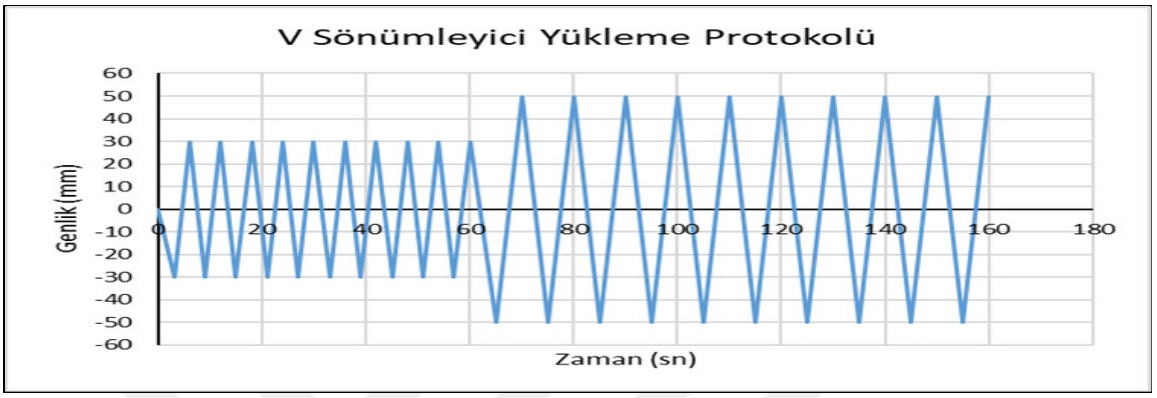
Şekil 3.11. V Tipi Sönümleyici ön ve yan görünüşü

Şekil 3.12. Deney düzeneğine yerleştirilmiş V Tipi sönümleyici

3.7.1. Sürtünme Pedi Deneylerinde İzlenen Yükleme Protokolü

Teflon (PTFE), karbonfiber, pirinç ve kurşun malzemeler ile üretilen sürtünme pedlerinin enerji tüketimi, sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenmesi için 1 üniteli (3 çelik plaka, 2 sürtünme pedi ve tek mafsaldan oluşan) V tipi rotasyonel sürtünme sönümleyici tasarlanmıştır. Sürtünme pedi deneyleri 30 mm ve 50 mm genlikte, farklı cıvata sıkma torklarında (50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm) yürütülmüştür. Deneyler, iki farklı genlik ve iki farklı frekansta gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği sabit hızda

çalıştığından 30 mm genlikte 0.1 Hz, 50 mm genlikte 0.06 Hz frekansta deneyler yapılmıştır. Şekil 3.13'de V tipi sönümleyicinin yükleme protokolü verilmiştir. Farklı sıkıştırma torklarında sıkılmış cıvatalara sahip V tipi sönümleyiciler 10'ar çevrimden oluşan bir dizi deplasman kontrollü döngüsel yüklemeye tabi tutulmuş ve histerezis eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 3.13. V tipi sönümleyici yükleme protokolü

Şekil 3.13'deki V tipi sönümleyici yükleme protokolüne göre yürütülen deneylerde elde edilen yük-deplasman (genlik) grafikleri aşağıda verilmiştir. Grafiklerde 30 mm genlikte elde edilen 10 çevrim ile 50 mm genlikte elde edilen 10 çevrime ait grafikler ayrı ayrı verilmiştir.

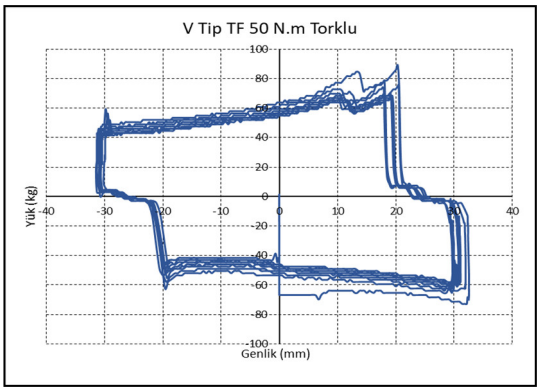
3.7.2. Sürtünme Pedi Deney Sonuçları

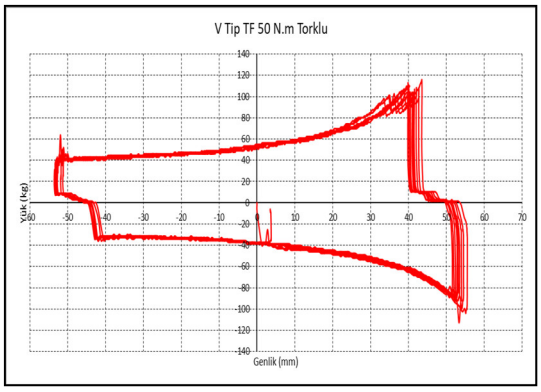
Sürtünme pedi (V tipi sönümleyici) deneyleri, sürtünme pedlerinin kayma yükünü (dolayısıyla enerji tüketimini), sürtünme kararlılığını ve aşınma davranışını tespit etmek amacıyla yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar aşağıda iki başlık altında sunulmuştur.

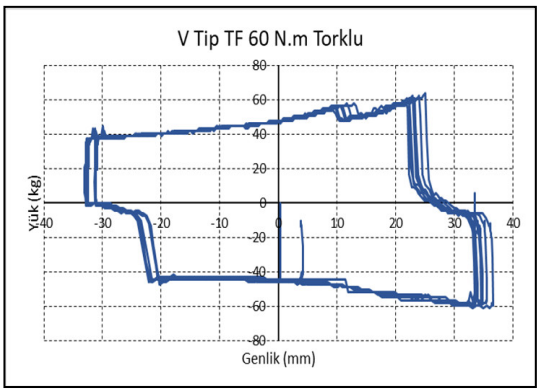
3.7.2.1 Sürtünme Pedlerinin Kayma Yükleri ve Enerji Tüketimleri

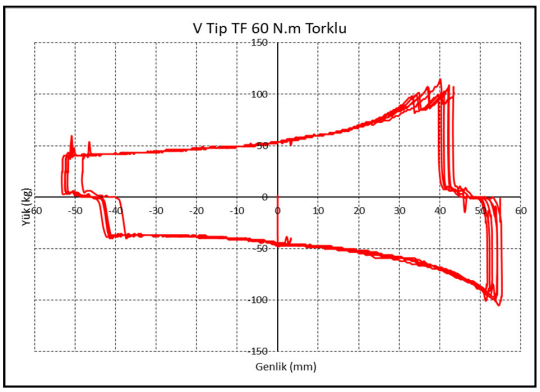
Tez çalışmasında üretilen 2 farklı tip rotasyonel sürtünme sönümleyici için belirlenen değişken parametrelerden ilki sürtünme yüzeyine gelen eksenel yük (cıvata sıkıştırma torku) ikincisi ise sürtünme pedi malzemesidir. Sürtünme davranışını değiştiren etkenler, Coulomb sürtünme kuvveti denkleminde (Denklem 1.1) yer alan sürtünme katsayısı (μ), ve sürtünme yüzeyine dik gelen eksenel yükün büyüklüğü (N) ve bu yüke etki eden unsurlar olarak ifade edilebilir. Sürtünme katsayısını değiştiren unsurlar, sürtünen malzemelerin cinsi, sürtünme yüzeyindeki sıcaklık, sürtünme

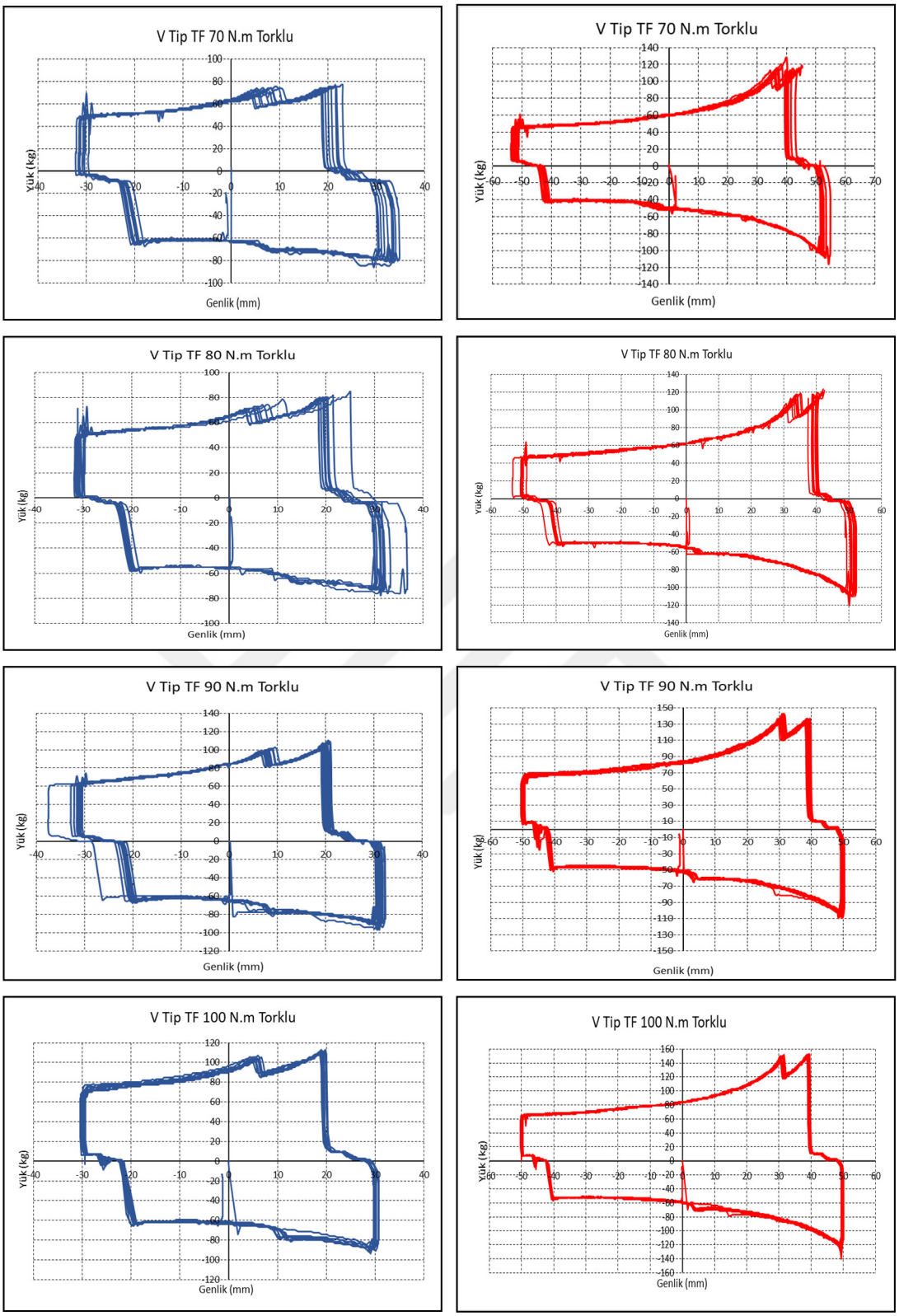
yüzeyinin pürüzlülüğü, sürtünme yüzeyindeki aşınma tipi, sürtünme yüzeyindeki muhtemel yabancı maddeler gibi birçok etken sıralanabilir. Sürtünme yüzeyine dik gelen kuvvet, sürtünme sönümleyicideki mafsal cıvatalarının belirli torklarda sıkılmasıyla ölçülen öngerme yüküyle sağlanmaktadır. Öngermenin sürekliliği, cıvataların somunlarında gevşeme olmamasına bağlıdır. Cıvata üzerindeki öngermeyi sürtünme yüzeyine sağlıklı bir şekilde yayabilmek için, kullanılan çelik plakaların yeterli kalınlıkta olması gereklidir. Kalınlığın yetersiz olduğu durumlarda, cıvata başı ve somun altında yeterli kalınlık ve çapta basınç plakalarının bulundurulması faydalıdır. Çalışmada üretilen sönümleyicilerdeki çelik plaka kalınlığı gerilmeyi yayabilecek kesme rijitliğine sahip olduğundan (t=10 mm) ilave basınç plakasına gerek görülmemiştir. Rotasyonel sönümleyicilerde eksenel yük kaybına neden olan başka bir unsur ise sürtünme yüzeylerinde hareketle beraber meydana gelen aşınmadır. Sürtünme pedi ve sürtünme plakalarındaki aşınma sonucu plaka kalınlıklarında düşüş olduğunda, cıvata başı ve somun arasındaki öngerme azalmaktadır. Bu durumu telafi edebilmek için konik yay rondela (Belleville rondelası) kullanılmıştır. Üretilen sönümleyicilerde her cıvata üzerinde yay çeliğinden üretilmiş, aynı yönlü olarak üst üste yerleştirilmiş 4 adet M12 uyumlu Belleville rondelası kullanılmıştır. Bu şekilde aşınmalar konik yayların genliği olan 2-3 mm kalınlığa kadar tolere edilebilmektedir.







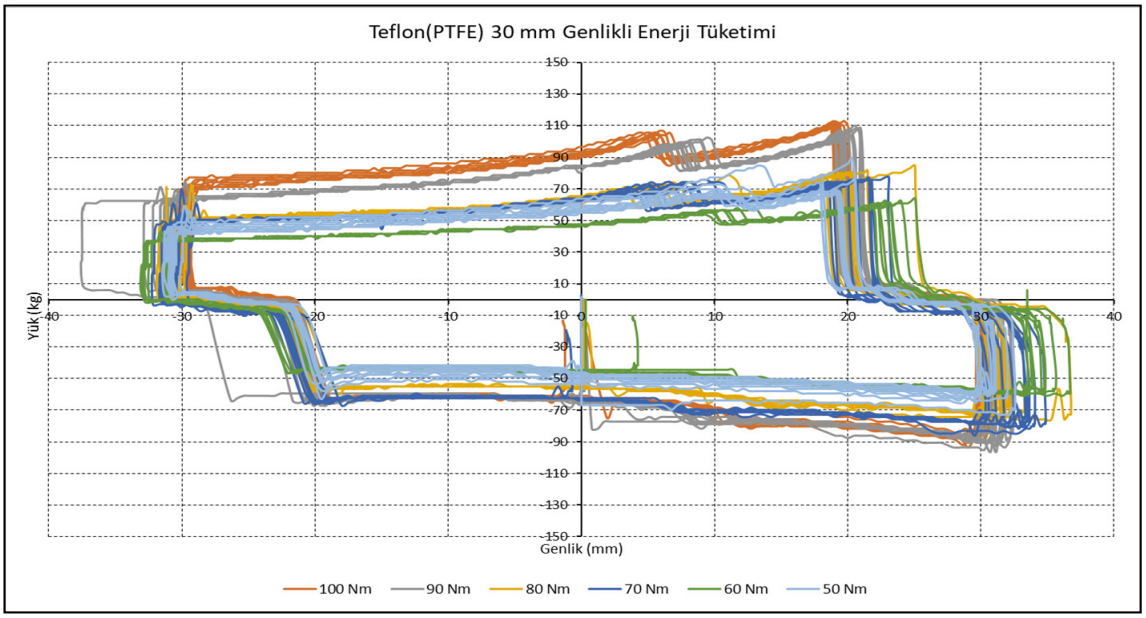




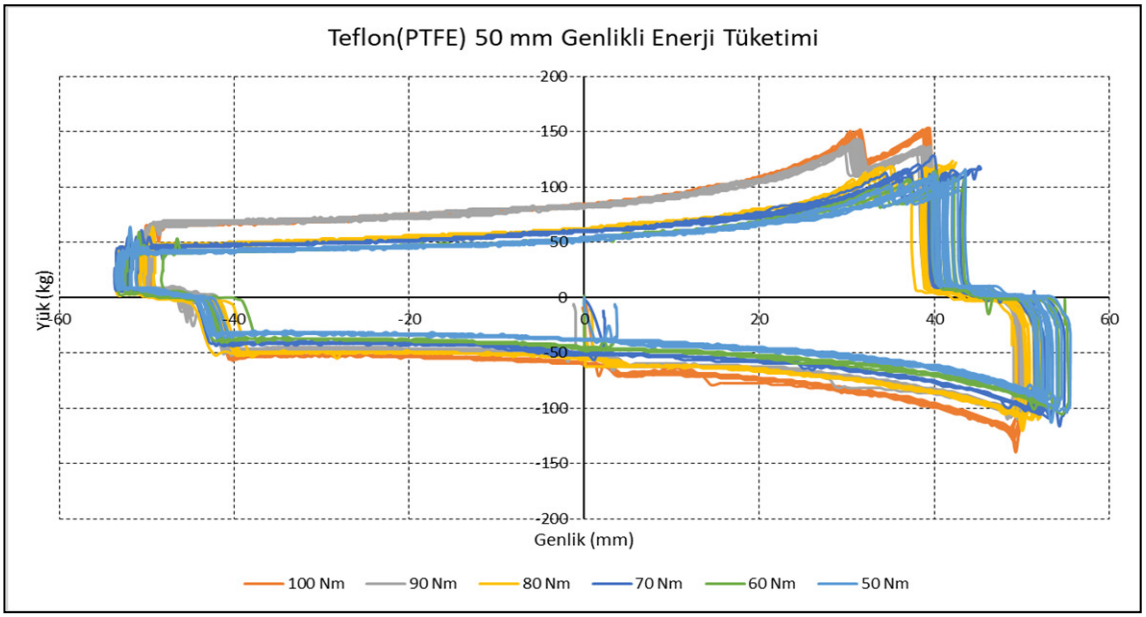
Şekil 3.14. Teflon (PTFE) sürtünme pedinin 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında 30 mm - 50 mm genliklerde çevrimsel deney grafikleri

Şekil 3.14'de verilen çevrimsel grafiklerden görüldüğü gibi aynı cıvata sıkma torklarında elde edilen 30 mm ve 50 mm genlikli grafiklerde kayma yükü olarak ifade

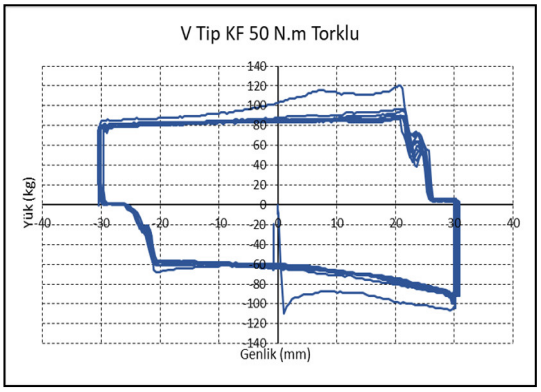
edilen eğrinin y eksenini kestiği noktalar hem pozitif yönde hem de negatif yönlerde yaklaşık olarak aynı değerlerdir. Eğriler her genlik ve torkta ± %5 civarında sapma ile aynı yolu izlemiştir. Teflonun (PTFE) literatürde yapılan birçok çalışma sonucunda elde edilen bilgilerle, çok değişmeyen bir sıcaklık ve sabit basınç altında kararlı bir sürtünme davranışı gösterdiği zaten bilinmektedir. Diğer yandan cıvata sıkma torku (sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet) arttığı halde kayma yükü çok fazla artmamıştır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da sırasıyla 30 mm ve 50 mm genlikte, farklı cıvata sıkma torklarında elde edilen histeretik eğriler üst üste konarak karşılaştırılmıştır.

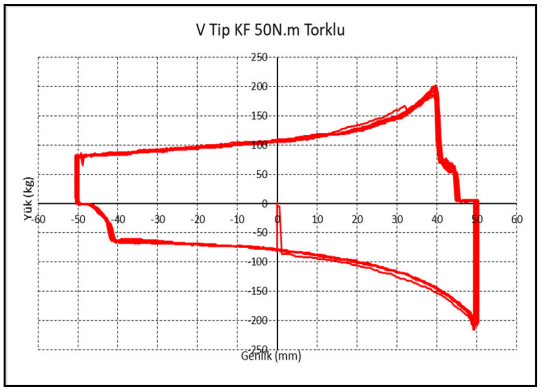


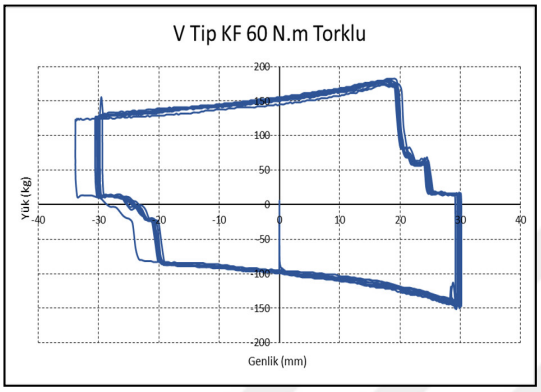
Şekil 3.15. Teflon (PTFE) sürtünme pedinin 30 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması

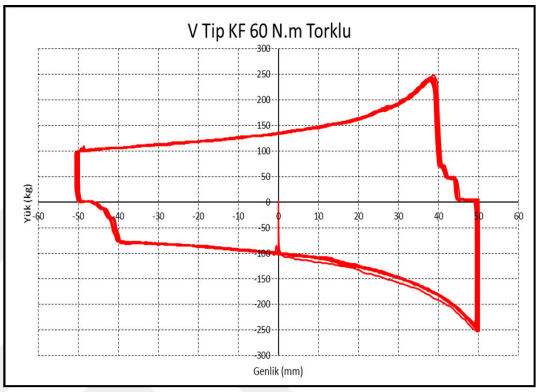


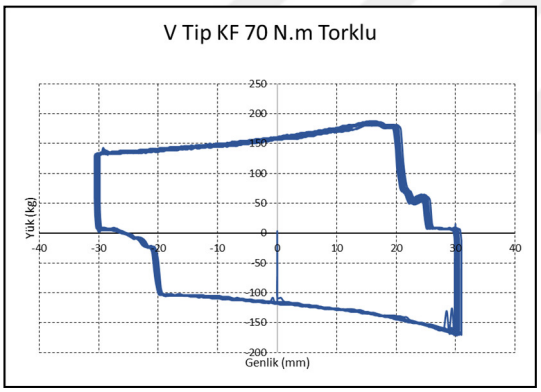
Şekil 3.16. Teflon (PTFE) sürtünme pedinin 50 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması

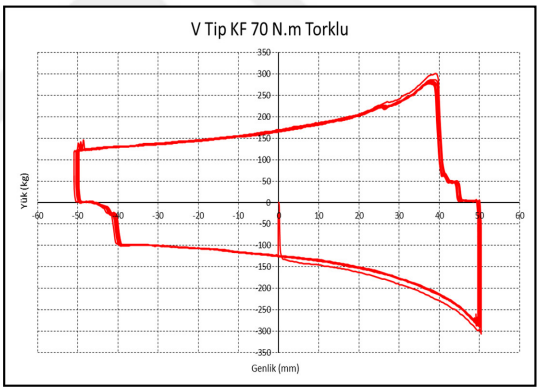

V Tip KF 50 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

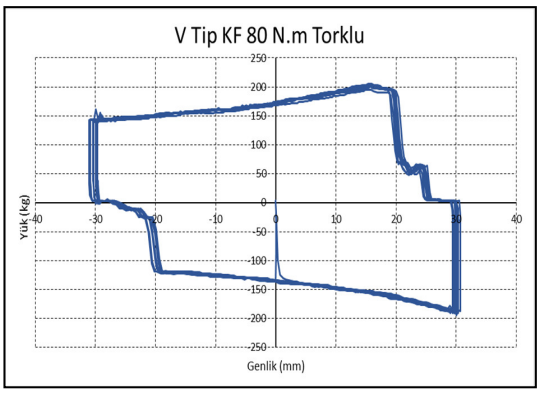

V Tip KF 50N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

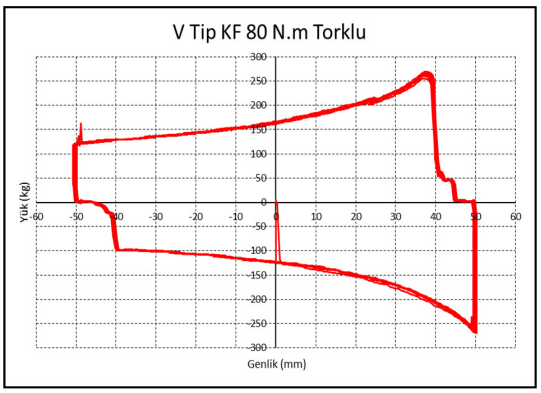

V Tip KF 60 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

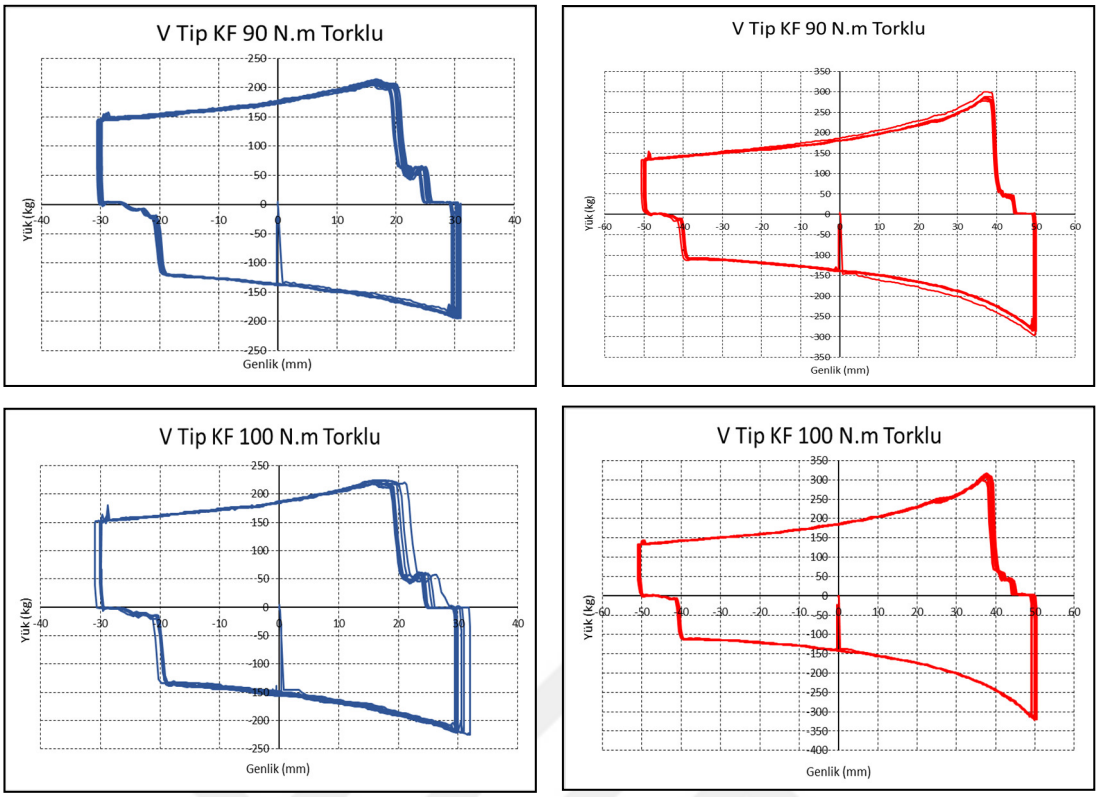

V Tip KF 60 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip KF 70 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip KF 70 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

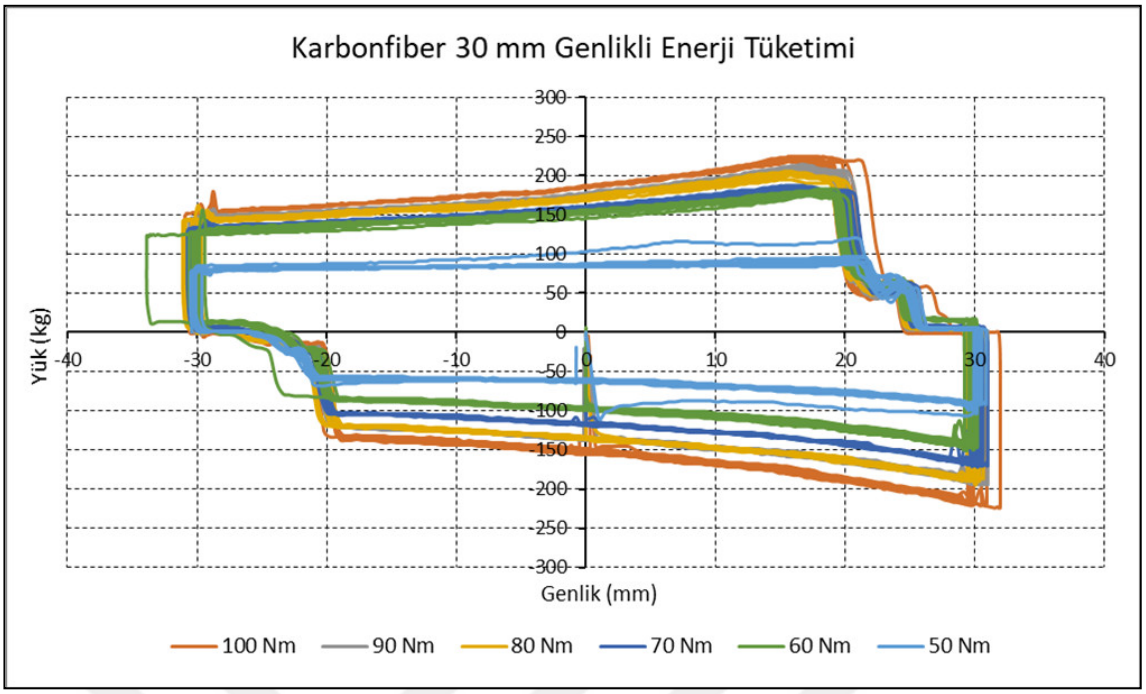

V Tip KF 80 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip KF 80 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

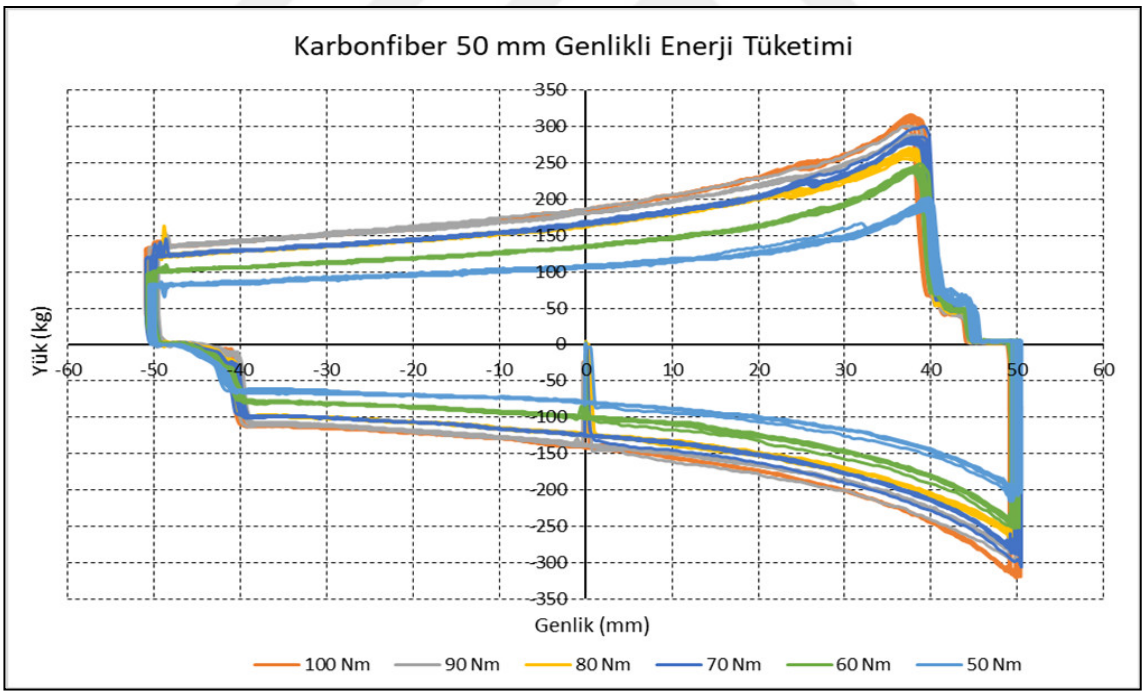


Şekil 3.17. Karbonfiber sürtünme pedinin 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında 30 mm - 50 mm genliklerde çevrimsel deney grafikleri

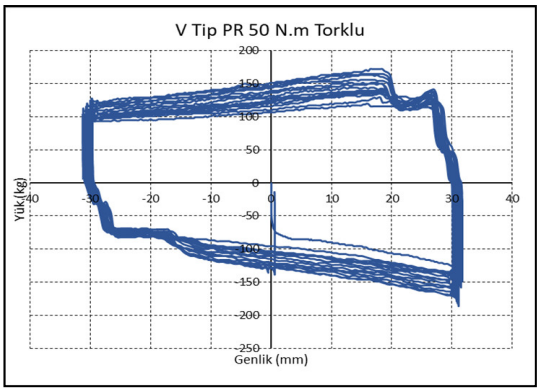
Şekil 3.17'de verilen çevrimsel grafiklerden görüleceği gibi aynı cıvata sıkma torklarında elde edilen 30 mm ve 50 mm genlikli grafiklerde kayma yükü olarak ifade edilen eğrinin y eksenini kestiği noktalar hem pozitif yönde hem de negatif yönlerde yaklaşık olarak aynı değerlerdir. Eğriler her genlik ve torkta ± %5 civarında sapma ile aynı yolu izlemiştir. Karbonfiber çok değişmeyen bir sıcaklık ve sabit basınç altında kararlı bir sürtünme davranışı göstermiştir. Diğer yandan cıvata sıkma torku (sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet) arttığı halde kayma yükü Teflon (PTFE) numunelere göre daha fazla artmamıştır. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da sırasıyla 30 mm ve 50 mm genlikte, farklı cıvata sıkma torklarında elde edilen histeretik eğriler üst üste konarak karşılaştırılmıştır.

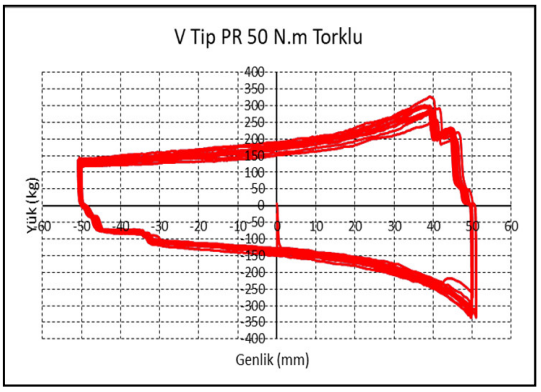


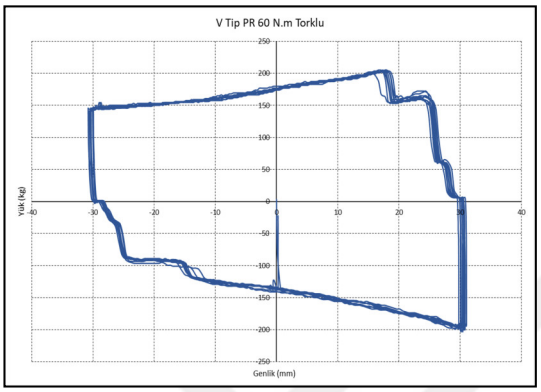
Şekil 3.18. Karbonfiber sürtünme pedinin 30 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması

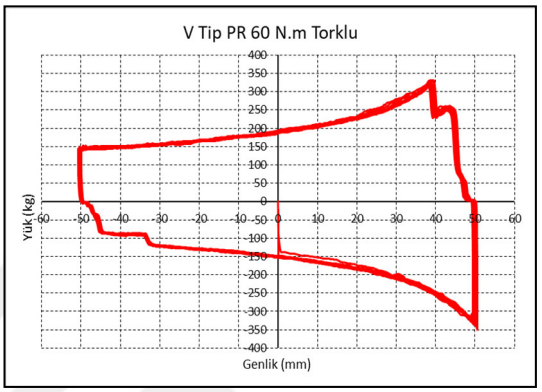


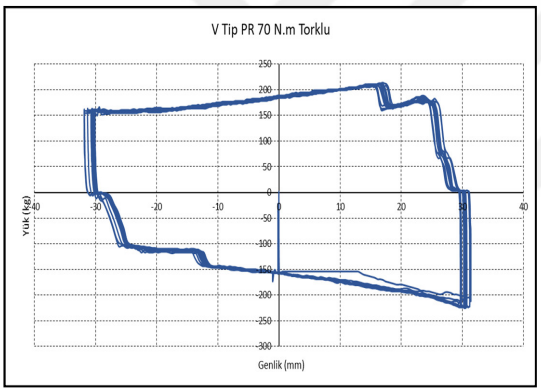
Şekil 3.19. Karbonfiber sürtünme pedinin 50 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması

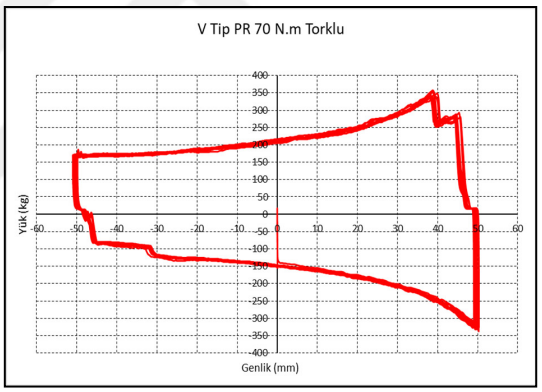

V Tip PR 50 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

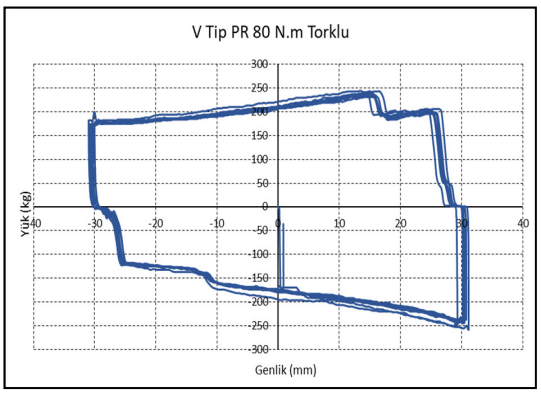

V Tip PR 50 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

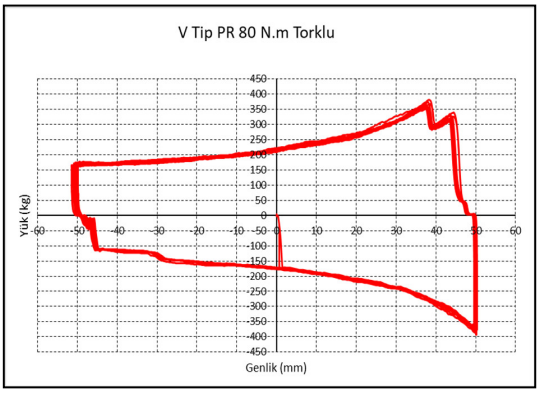

V Tip PR 60 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

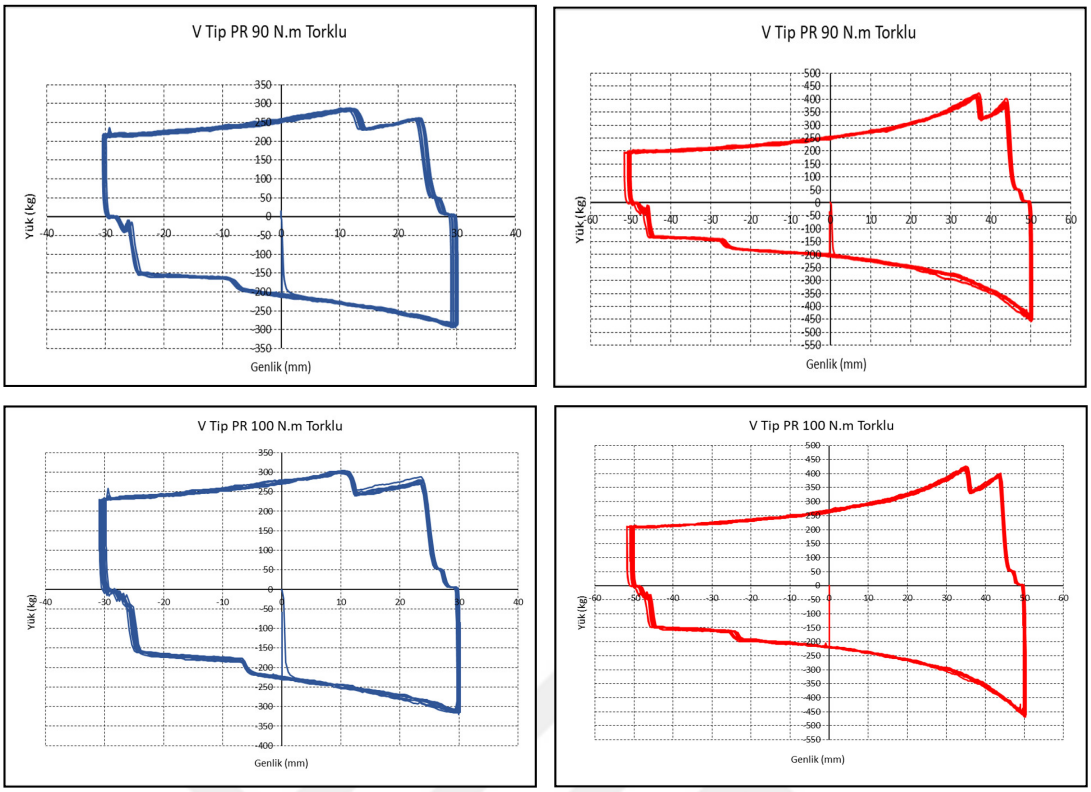

V Tip PR 60 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip PR 70 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip PR 70 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

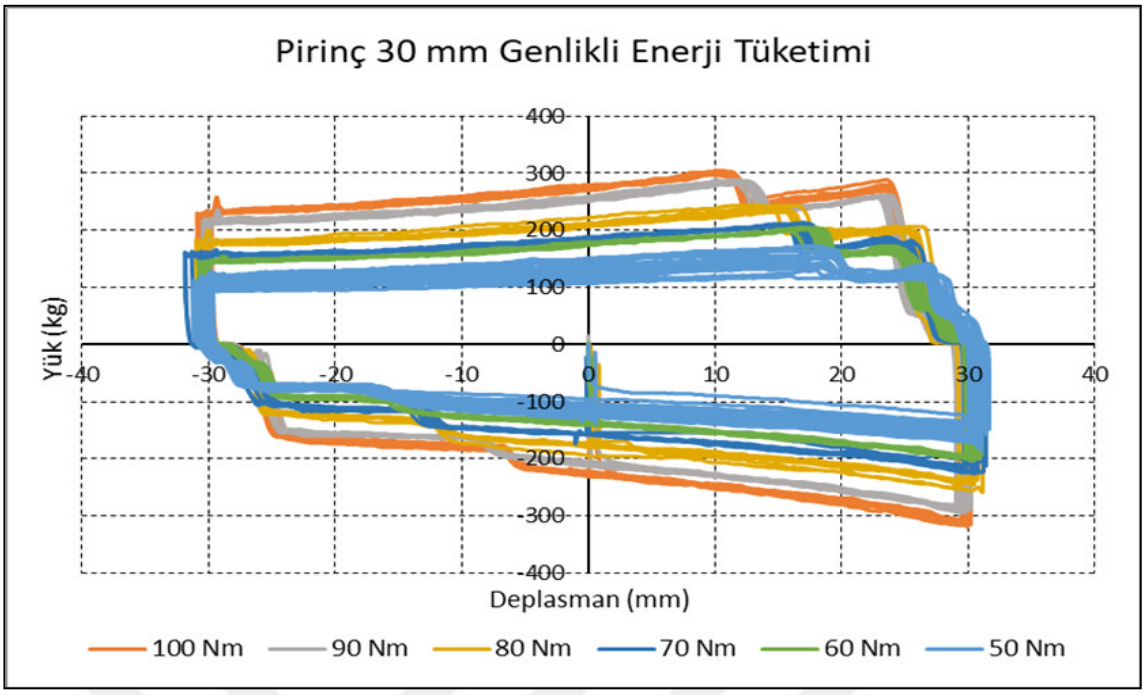

V Tip PR 80 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip PR 80 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

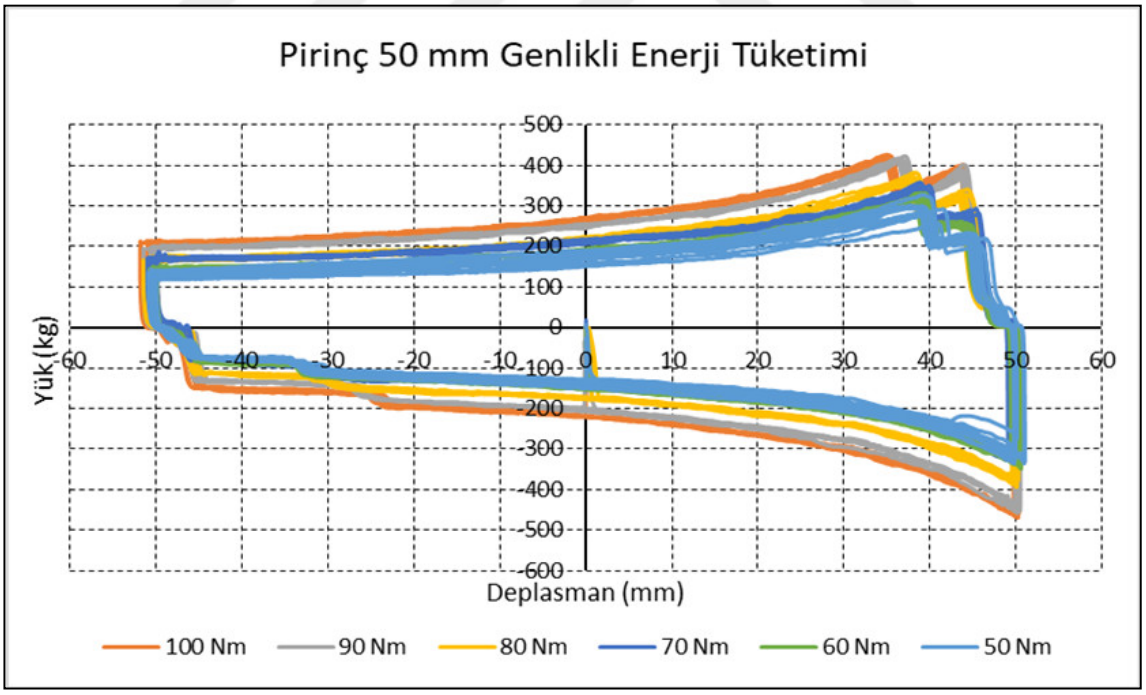


Şekil 3.20. Pirinç sürtünme pedinin 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında 30 mm - 50 mm genliklerde çevrimsel deney grafikleri

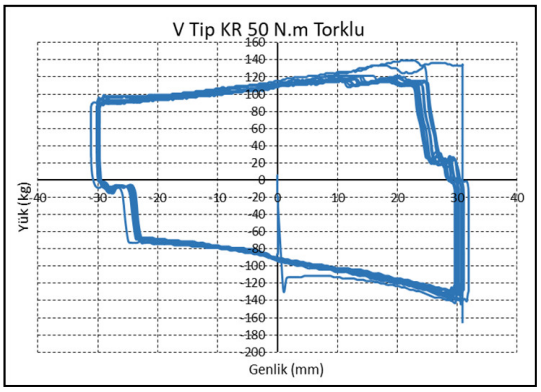
Şekil 3.20'de verilen çevrimsel grafiklerden görüldüğü gibi aynı cıvata sıkma torklarında elde edilen 30 mm ve 50 mm genlikli grafiklerde kayma yükü olarak ifade edilen eğrinin y eksenini kestiği noktalar hem pozitif yönde hem de negatif yönlerde yaklaşık olarak aynı değerlerdir. 50 Nm cıvata sıkma torkunda deneyi yapılan pirinç numunede eğriler ± % 5-10 civarında sapma göstermiştir. Çevrimsel eğriler diğer torklarda ± %5 civarında sapma ile aynı yolu izlemiştir. Pirinç sürtünme pedi numuneleri kararlı bir sürtünme davranışı göstermiştir. Diğer yandan cıvata sıkma torkunun (sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet) artışı ile birlikte kayma yükü de artmıştır. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de sırasıyla 30 mm ve 50 mm genlikte, farklı cıvata sıkma torklarında elde edilen histeretik eğriler üst üste konarak karşılaştırılmıştır.

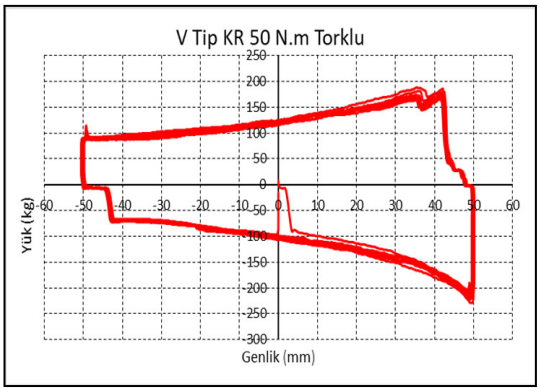


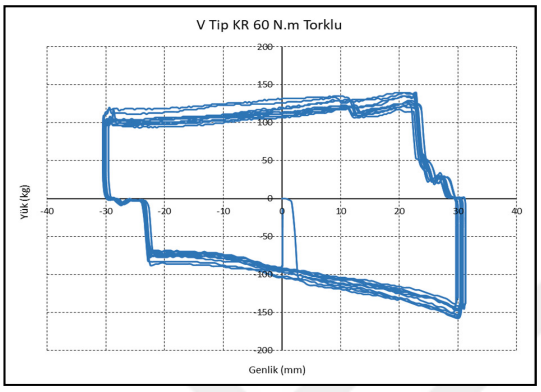
Şekil 3.21. Pirinç sürtünme pedinin 30 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması

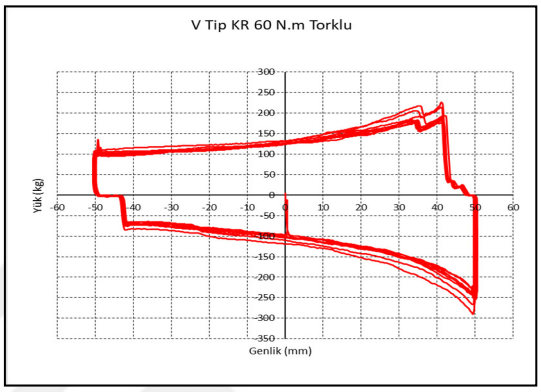


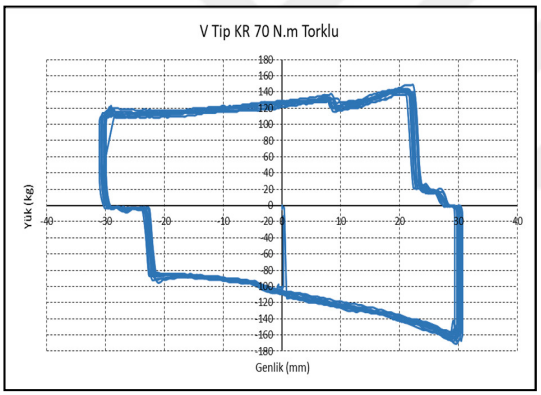
Şekil 3.22. Pirinç sürtünme pedinin 50 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması

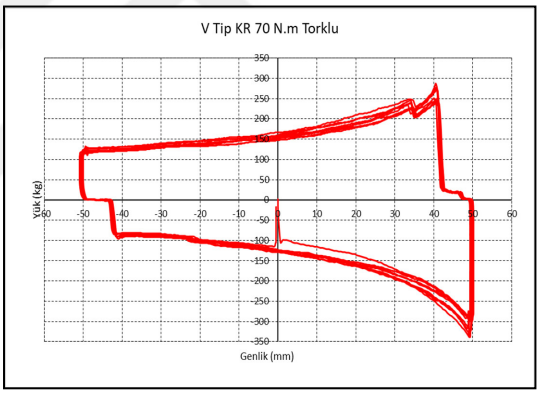

V Tip KR 50 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

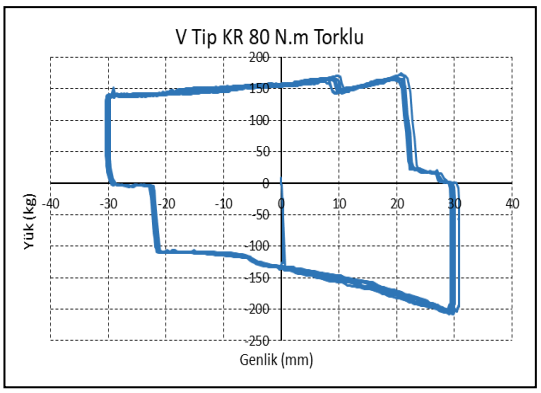

V Tip KR 50 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

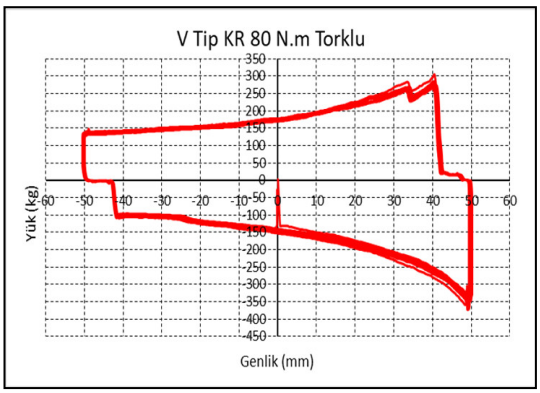

V Tip KR 60 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

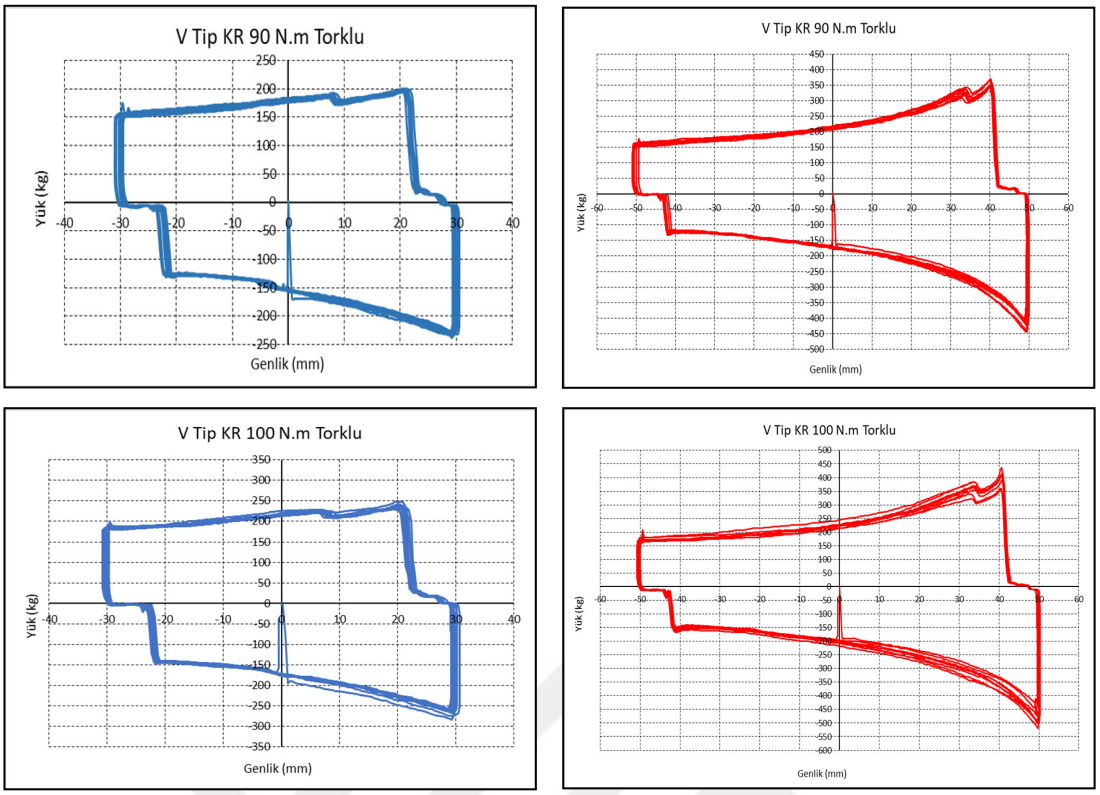

V Tip KR 60 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip KR 70 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip KR 70 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

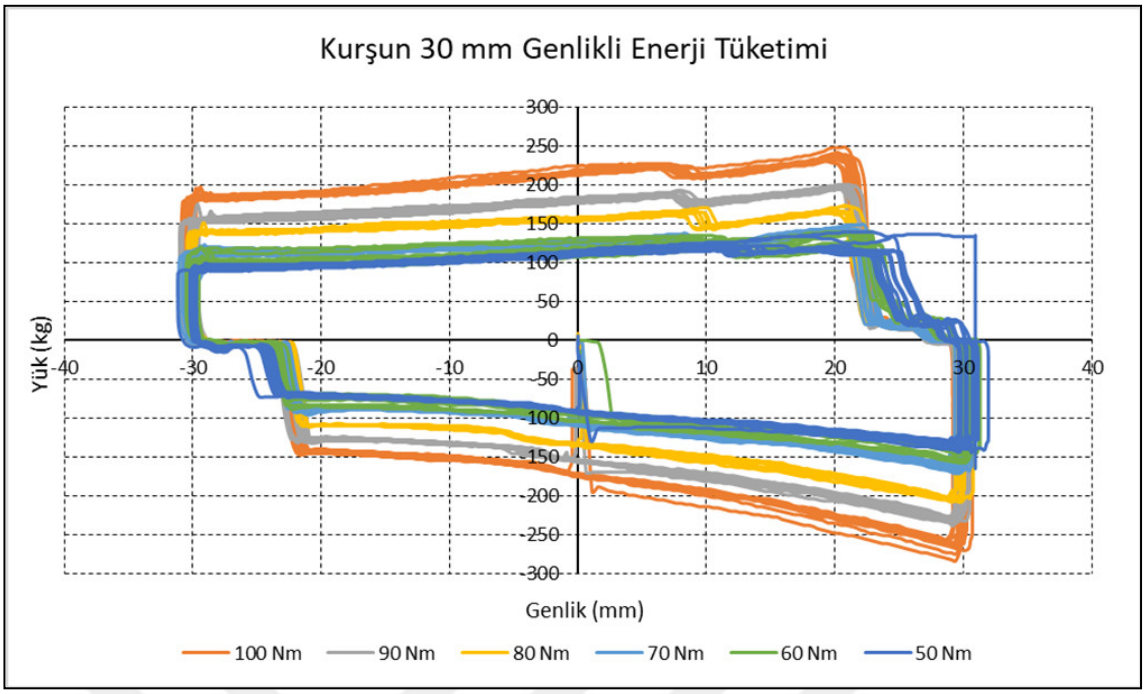

V Tip KR 80 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)


V Tip KR 80 N.m Torklu
Yük (kg)
Genlik (mm)

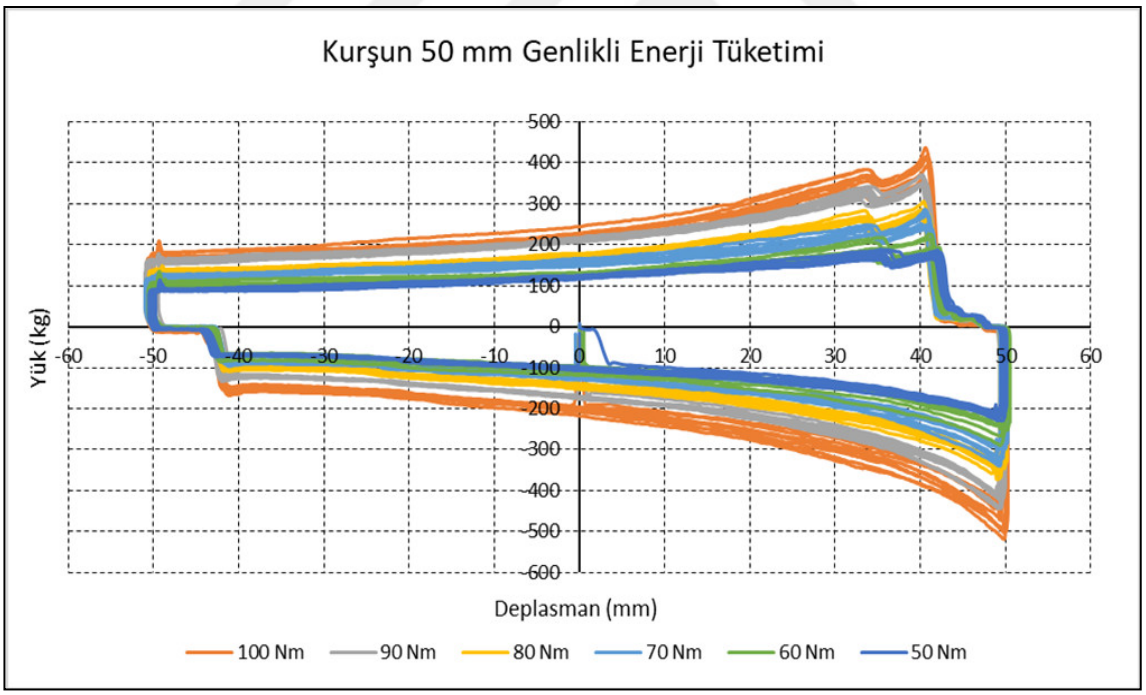


Şekil 3.23. Kurşun sürtünme pedinin 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında 30 mm - 50 mm genliklerde çevrimsel test grafikleri

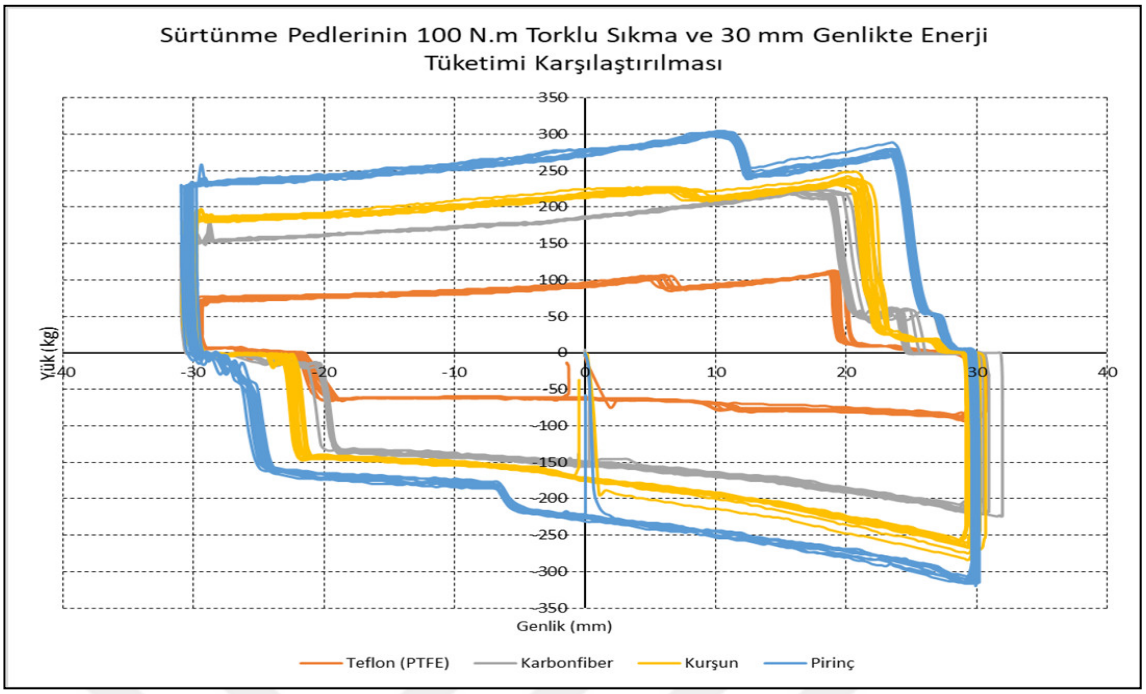
Şekil 3.23'de verilen çevrimsel grafiklerden görüldüğü gibi aynı cıvata sıkma torklarında elde edilen 30 mm ve 50 mm genlikli grafiklerde kayma yükü olarak ifade edilen eğrinin y eksenini kestiği noktalar hem pozitif yönde hem de negatif yönlerde yaklaşık olarak aynı değerlerdir. Çevrimsel eğriler her genlik ve torklarda ± %5 civarında sapma ile aynı yolu izlemiştir. Kurşun sürtünme pedi numuneleri, karbonfiber ve pirinç numuneler gibi kararlı bir sürtünme davranışı göstermiştir. Diğer yandan cıvata sıkma torkunun (sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet) artışı ile birlikte kayma yükü de artmıştır. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de sırasıyla 30 mm ve 50 mm genlikte, farklı cıvata sıkma torklarında elde edilen histeretik eğriler üst üste konarak karşılaştırılmıştır.



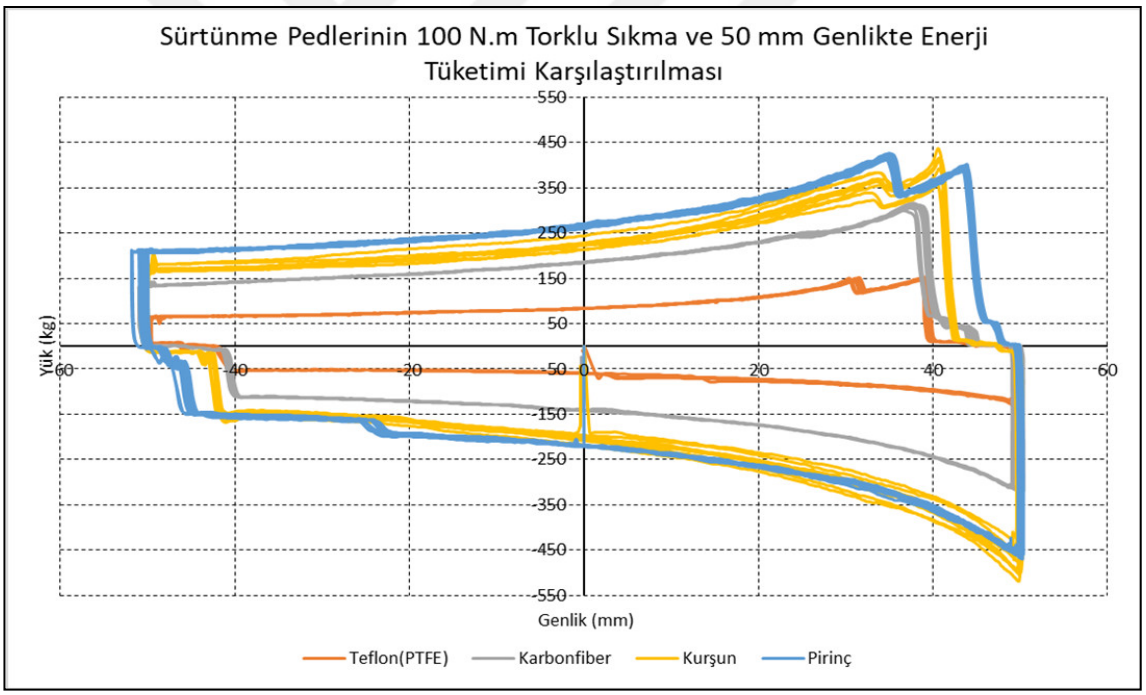
Şekil 3.24. Kurşun sürtünme pedinin 30 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması



Şekil 3.25. Kurşun sürtünme pedinin 50 mm genlikte ve 50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm cıvata sıkma torklarında çevrimsel deney grafiği karşılaştırması



Şekil 3.26. 100 Nm cıvata sıkma torkunda ve 30 mm genlikte elde edilen çevrimsel grafik karşılaştırması



Şekil 3.27.100 Nm cıvata sıkma torkunda ve 50 mm genlikte elde edilen çevrimsel grafik karşılaştırması

SAP2000 yazılımında yapılan statik analizde referans betonarme çerçevenin (RN) maksimum dayanım değeri 3318,63 kg olarak bulunmuştur (Şekil 5.2), (Çizelge 5.2). Her katta 1 sönümleyici bulunacağı ve Tip 1, Tip 2 sürtünme sönümleyicilerin tek üniteli (her mafsalda 3 çelik plaka ve 2 sürtünme pedi olacak şekilde) ve her sönümleyicinin 4 sürtünme mafsalına sahip olacağı düşünüldüğünde, her iki tip sönümleyicide de 100 Nm cıvata sıkma torkunda elde edilen kayma yükünün yeterli olacağı hesap edilmiştir. Bu

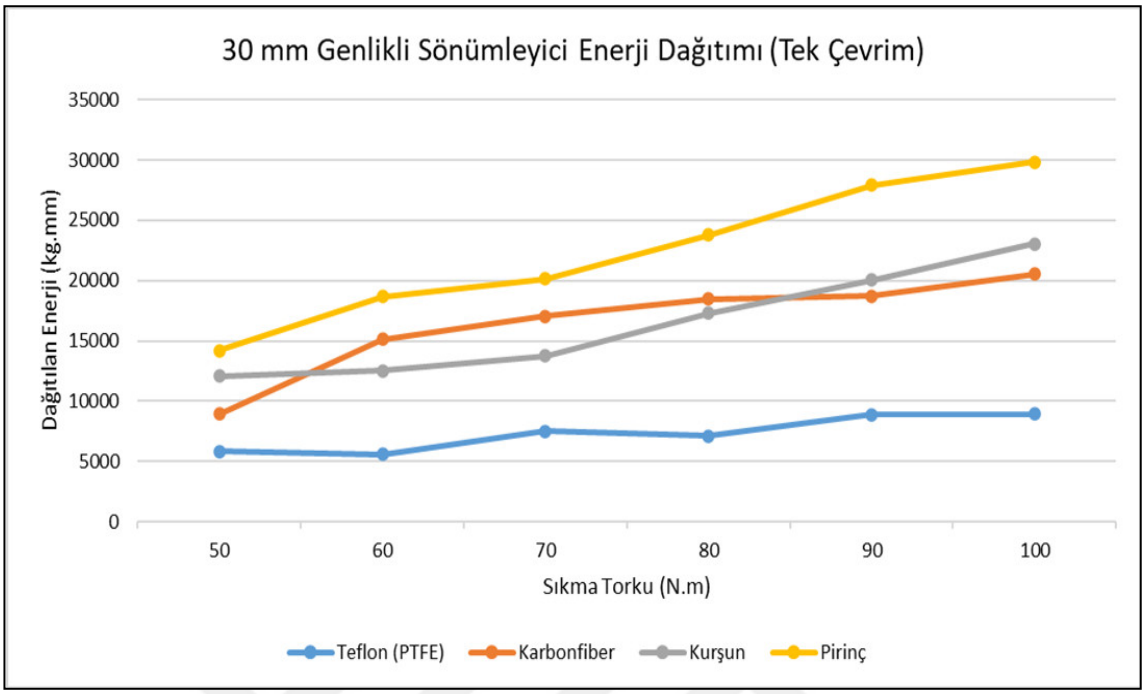
sebeple 100 Nm cıvata sıkma torkunda 4 sürtünme pedi materyali için elde edilen çevrimsel grafikler 30 mm ve 50 mm genlikte ayrı ayrı Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de karşılaştırılmıştır.

V tipi sönümleyici deneylerinde elde edilen grafikler incelendiğinde her cıvata sıkma torkunda elde edilen ortalama kayma yüklerine ve 30 mm – 50 mm tasarım genliklerine göre hesaplanan yaklaşık dikdörtgen alanı değerlerinden sürtünme pedlerinin tek çevrimde sönümlediği ortalama enerji (kg.mm) miktarları hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Bulunan enerji alanlarına göre 30 mm ve 50 mm genlikte, her sürtünme pedi materyalinin enerji dağıtım değerleri ayrı ayrı grafik şeklinde gösterilmiştir (Şekil 3.28 ve Şekil 3.29).

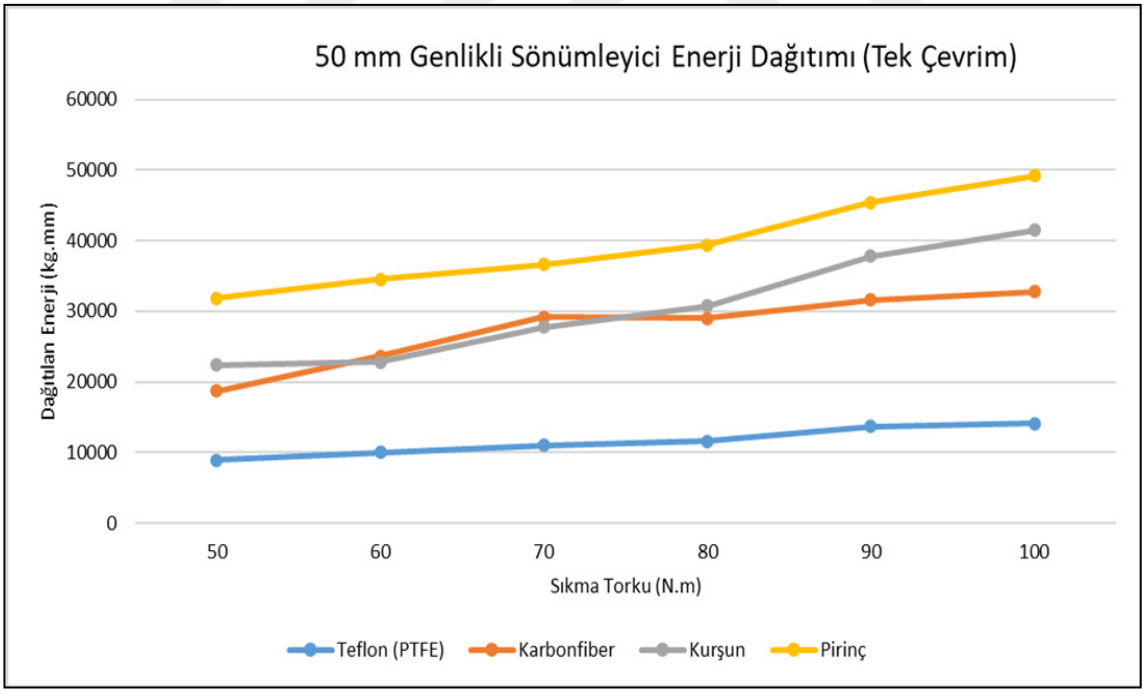
Çizelge 3.2. Yaklaşık dikdörtgen alanın hesaplanmasına dayalı olarak tek bir döngüde sürtünme pedleri tarafından tüketilen ortalama enerji miktarı (kg.mm)

MALZEME	**TEFLON**		**KARBONFİBER**		**KURŞUN**		**PİRİNÇ**	
SIKMA TORKU (Nm)	**GENLİK (mm)**							
	30	**50**	**30**	**50**	**30**	**50**	**30**	**50**
50	5820	8900	8940	18700	12060	22400	14220	31900
60	5580	10000	15120	23700	12540	22800	18660	34500
70	7500	11000	17040	29200	13740	27800	20160	36600
80	7140	11600	18480	29000	17280	30800	23760	39400
90	8880	13700	18720	31600	20040	37800	27900	45400
100	8940	14100	20520	32800	23040	41500	29820	49200

Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'da verilen grafiklerde Teflon (PTFE) sürtünme pedlerinin artan cıvata sıkma torku (sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet) değerlerine rağmen enerji tüketiminde çok fazla artış olmadığı görülmektedir. Bu davranışın sebebi Teflon (PTFE) malzemesinin benzersiz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Teflon (PTFE) artan basınç ve sıcaklık değerlerinde sürtünme katsayısı düşen bir malzemedir. Deneylerden sonra incelenen Teflon (PTFE) sürtünme pedi yüzeylerinde diğer sürtünme pedi materyallerinin aksine çizilme ve aşınma yerine cilalanma oluştuğu ve daha pürüzsüz hale geldiği görülmüştür. Ayrıca 3 mm kalınlığındaki Teflon (PTFE) sürtünme pedlerinin artan normal kuvvetin etkisiyle elastik şekil değişimine uğradığı tahmin edilmektedir. Bu nedenlerle Teflon (PTFE) sürtünme pedlerinin kararlı bir sürtünme davranışı göstermesine rağmen, yeterli sürtünme kuvveti sağlamadığı değerlendirilerek, betonarme çerçevelerde faydalanılması düşünülen Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerde kullanımı uygun görülmemiştir.



Şekil 3.28. 30 mm genlikte sürtünme pedi materyallerinin enerji dağıtım değerleri (Tek çevrim)



Şekil 3.29. 50 mm genlikte sürtünme pedi materyallerinin enerji dağıtım değerleri (Tek çevrim)

3.7.2.2. Sürtünme Pedlerinin Aşınma Durumu

V tipi sönümleyici deneylerinde aşınma durumunu gözlemlemek amacıyla 50 mm genlikli 50 çevrimden oluşan aşınma deneyleri yürütülmüştür. Çevrimler sonrası sürtünme pedi ve çelik plakalarda aşınma muayenesi yapılmıştır.

- Teflon sürtünme pedlerinde aşınma emaresi görülmemekle peraber yüzeylerde cilalanma durumu tespit edilmiştir. Çelik plakalarda çizik gözlemlenmezken teflon ped sınırlarının çelik plaka üzerinde bir miktar iz bıraktığı görülmüştür.
- Karbonfiber sürtünme pedlerinin üretimi sırasında, kesim yapılan kenarlarda plakayı oluşturan fiber katmanlarının bir miktar genişlemesi nedeniyle sürtünmede ilk aşınan bölgeler kenarlar olmuştur. Ayrıca deney sırasında sönümleyicinin sürtünme arayüzünden toz şeklinde karbon parçacıkların döküldüğü görülmüştür. Deney sonrası çelik plakalarda çizik veya hasar görülmezken, karbonfiber malzemenin matris fazını oluşturan karbon bazlı reçinenin aşınarak çelik plaka yüzeylerinde toz şeklinde biriktiği görülmüştür.
- Pirinç sürtünme pedlerinin deney sonrası muayenesinde, sürtünme pedi yüzeylerinde ince çiziklerin oluştuğu görülmüştür. Çizikler tüm yüzeyde yayılmıştır. Çelik plaka yüzeylerinde çizik veya hasar görülmezken bir miktar pirinç malzemenin iz şeklinde çelik plaka yüzeylerine yapıştığı görülmüştür. Aşınma miktarı karbonfiber pedleriden daha az olmuştur.
- Kurşun sürtünme pedlerinin deney sonrası muayenesinde sürtünme pedi üzerinde yer yer derin çiziklerin oluştuğu görülmüştür. Çizikler genel görünüş itibarıyla pirinç sürtünme pedlerindeki çiziklere benzemektedir, fakat daha derindir. Çizikler tüm yüzeyde yayılmıştır. Aşınma miktarı pirinç sürtünme pedlerinden daha fazladır. Çelik plaka yüzeylerinde çizik veya hasar görülmezken bir miktar kurşun malzemenin iz şeklinde çelik plaka yüzeylerine yapıştığı görülmüştür. Aşınma miktarı pirinç pedlerden daha fazla olmuştur.

Şekil 3.30'da aşınma deneyinde V sönümleyicilerde kullanılan sürtünme pedlerinin öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir.

(a)

(b)

(c)

(d)

Şekil 3.30. 50 çevrimlik deneyler sonunda sürtünme pedlerinin aşınma durumu öncesi ve sonrası a) Teflon (PTFE) sürtünme pedleri b) Karbonfiber sürtünme pedleri c) Pirinç sürtünme pedleri d) Kurşun sürtünme pedleri

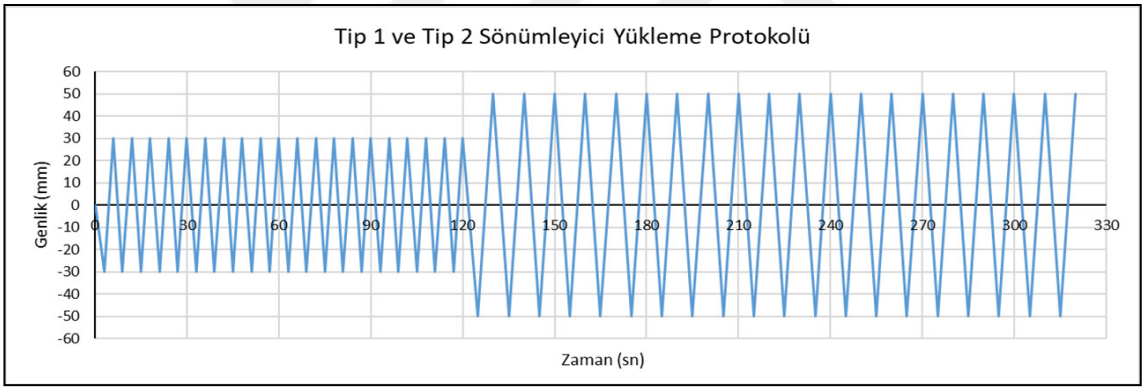
3.8. Tip 1 veTip 2 Rotasyonel Sürtünme Sönümleyici Deneyleri

Sürtünme pedi deneyleri (V tipi sönümleyici) sonucunda kullanımı uygun görülen karbonfiber, pirinç ve kurşun sürtünme pedleri ile Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyiciler üretilmiştir. Üretilen sönümleyicilerde birleştirme mafsalı

cıvataları yine farklı torklarda sıkılarak sürtünme arayüzlerinde belirli eksenel yükler oluşturulmuş, daha sonra V tip sönümleyicideki gibi aynı şekilde çevrimsel testleri yapılarak enerji tüketim grafikleri ve kayma yükleri elde edilmiştir.

Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyicilerde yeterli kayma yükü ve enerji tüketimini sağlayan sıkma torkları belirlendikten sonra, 1/3 geometrik ölçekli 2 katlı tek açıklıklı üretilen betonarme çerçevelere montajı yapılmış, 3 adet diyagonal yerleşimli Tip 1 sönümleyicili, 3 adet chevron (ters V) yerleşimli Tip 2 sönümleyicili ve 1 adet de boş referans çerçeve olmak üzere 7 adet betonarme çerçevenin statik itme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde elde edilen veriler değerlendirilerek histerezis eğrileri oluşturulmuş, rijitlik ve enerji tüketimi değişimi incelenmiştir.

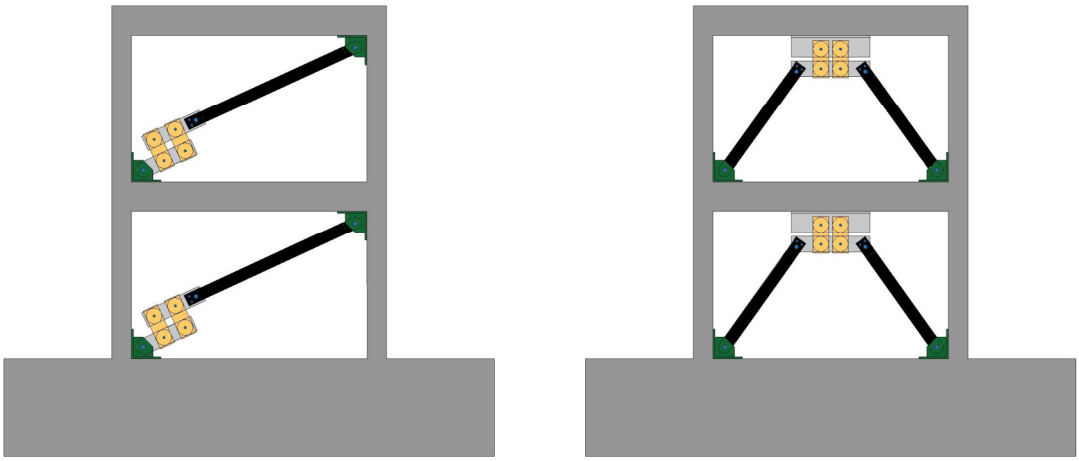
Deneylerde izlenen yükleme protokolü 20 çevrim kısa genlikte (30 mm), 20 çevrim uzun genlikte (50 mm) olmak üzere 40 çevrimden oluşmaktadır. Deney düzeneği sabit hızda çalıştığından 30 mm genlikte 0.1 Hz, 50 mm genlikte 0.06 Hz frekansta deneyler yapılmıştır. Şekil 3.31'de Tip 1 ve Tip 2 sönümleyici için yükleme protokolü verilmiştir.



Şekil 3.31. Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyici yükleme protokolü

3.8.1. Tip 1 ve Tip 2 Sönümleyici Tiplerinin Genel Özellikleri

Yapılan bu deneysel çalışmada iki farklı tipte rotasyonel sürtünme sönümleyici üretilmiş ve üretilen sönümleyicilerin deprem davranışı zayıf, esnek betonarme çerçevelere montelenmesi suretiyle gerçekleştirilen rehabilitasyonun çerçeve davranışına etkisi gözlemlenmiştir. Sönümleyicilerin farklı tiplerde üretilmesinde etkili olan parametrelerden biri betonarme çerçevelere bağlantı şekilleri olmuştur. Uygulamada çokça kullanılan braket tiplerinden olan diyagonal ve chevron (ters V) braketler üzerinde kullanılabilecek, montajı pratik rotasyonel sürtünme sönümleyicilerin üretilmesi tasarlanmıştır (Şekil 3.32).



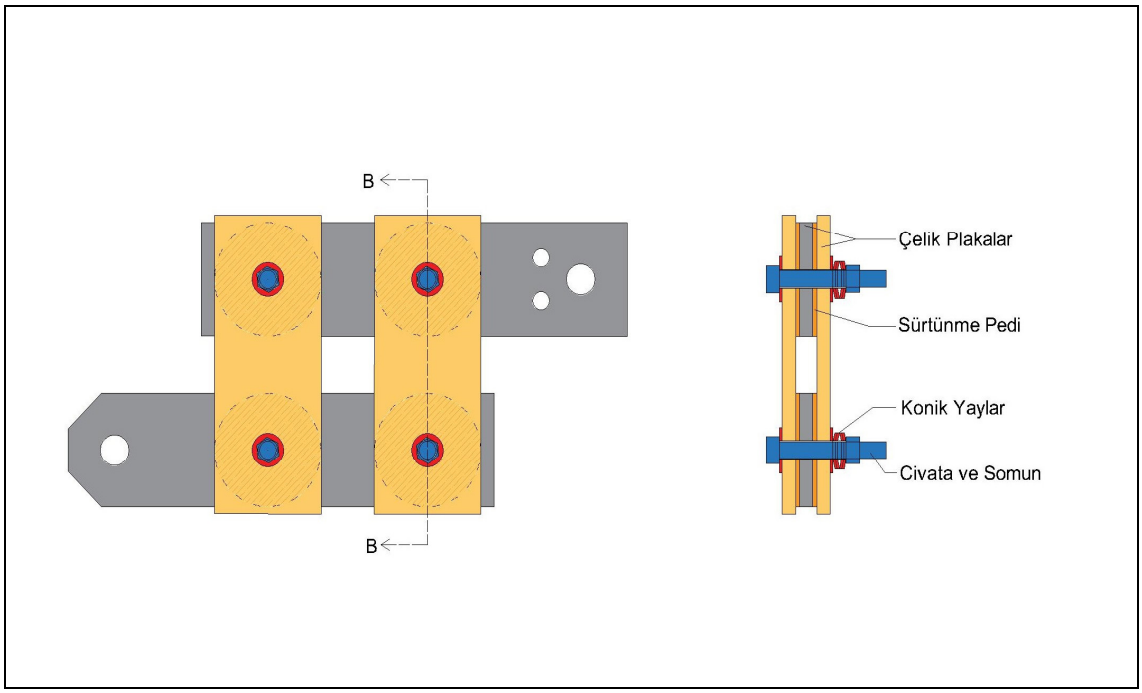
Şekil 3.32. a) Diyagonal braket üzerinde Tip 1 sönümleyici b) Chevron braket üzerinde Tip 2 sönümleyici

Diğer bir parametre ise sürtünme davranışını belirleyen sürtünme pedi malzemesi olmuştur. Bilindiği gibi farklı malzemelerin birbiri üzerinde yatay hareketine engel olması, sürtünme kuvvetleri sayesinde olmaktadır. Sürtünme kuvveti ise sürtünme yüzeyine etkiyen dik kuvvet ve sürtünme katsayısına bağlıdır. Sürtünme yüzeyine etkiyen dik kuvvetin sabit tutulduğu düşünüldüğünde, sürtünme katsayısının büyüklüğü sürtünme davranışında önemli hale gelmektedir. Sürtünen malzemelerin cinsi, yüzey şekli (pürüzlülük), sürtünen yüzeylerin aşınma davranışı, sürtünme yüzeyindeki hareketin durgun veya sürekli olması, sürtünme yüzeyindeki yabancı maddeler (yağ, toz vb.), kayma hızı ve temas basıncı gibi özellikler sürtünme katsayısını değiştiren unsurlardır. Bu çalışmada sürtünme açısından incelenen parametreler sürtünen malzemelerin cinsi, sürtünme yüzeylerinin aşınma davranışı ve sürtünme yüzeyindeki temas basıncıdır.

Sürtünme pedi materyallerden Teflon (PTFE), sürtünme pedi deneylerinde elde edilen sonuçlara göre yeterli enerji tüketimi sağlayamadığından sönümleyicilerde kullanımı uygun görülmemiştir. Bu nedenle sürtünme pedi olarak karbonfiber, pirinç, kurşun malzemelerden üretilmiş sürtünme pedleri ile 2 farklı tip sönümleyiciden 6 adet farklı versiyon için deneyler yapılmıştır. Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerde moment kolunu oluşturan çelik plakaların uzunlukları eşit olduğundan sönümleyici deneylerinde aynı sonuçlar elde edilecektir. Sönümleyicilerin çalışma farkı, çerçevedeki çalışma yönü, çerçevedeki lokasyonu, sönümleyicinin bağlandığı betonarme elemanlar ve braketlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sönümleyici deneyleri sadece Tip 1 sönümleyici ile yürütülmüştür.

Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerin tasarlanma aşamasında AUTOCAD çizim programı ortamında boyutlar ve betonarme çerçeve içindeki yerleşim planı hazırlanmıştır. Her iki tip sönümleyicide çelik plaka uzunluk ve genişlikleri, mafsal ve bağlantı cıvataları için açılan deliklerin yerleri belirlenmiştir. Betonarme çerçeve içerisindeki yerleşim planında ise bağlantı köşebentleri ve bu köşebentlerin ankraj bağlantılarının konumları, braket elemanlarının uzunluk ve bağlantı detayları belirlenmiştir.

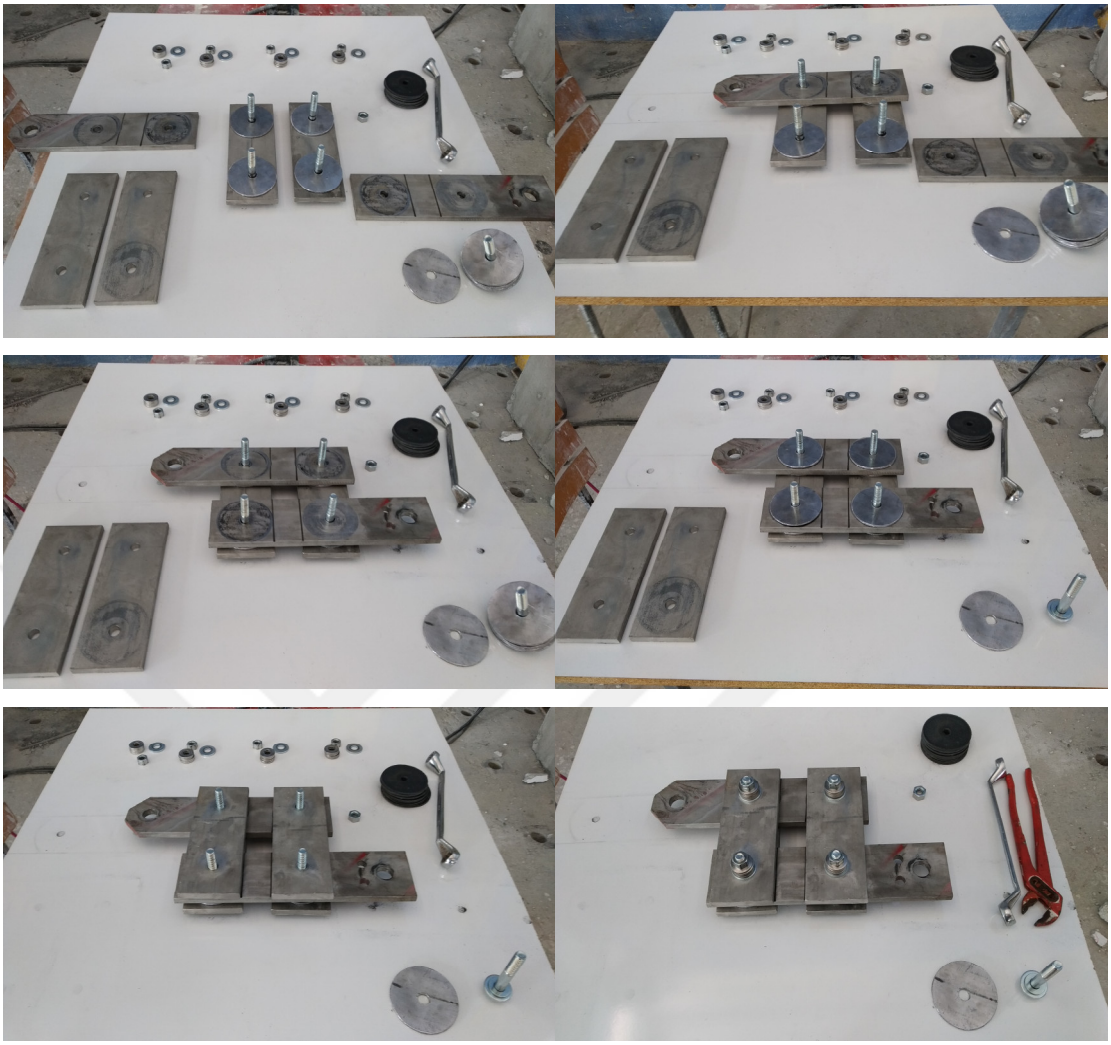
Tip 1 sönümleyicide boyutları belirlenen çelik plaka ve sürtünme pedlerinin bilgileri Şekil 3.6'da verilmiştir. Tip 1 sönümleyicinin ön ve yan görünüşlerinde sönümleyiciyi oluşturan bileşenlerin yerleşimleri aşağıda Şekil 3.33'de gösterilmiştir.



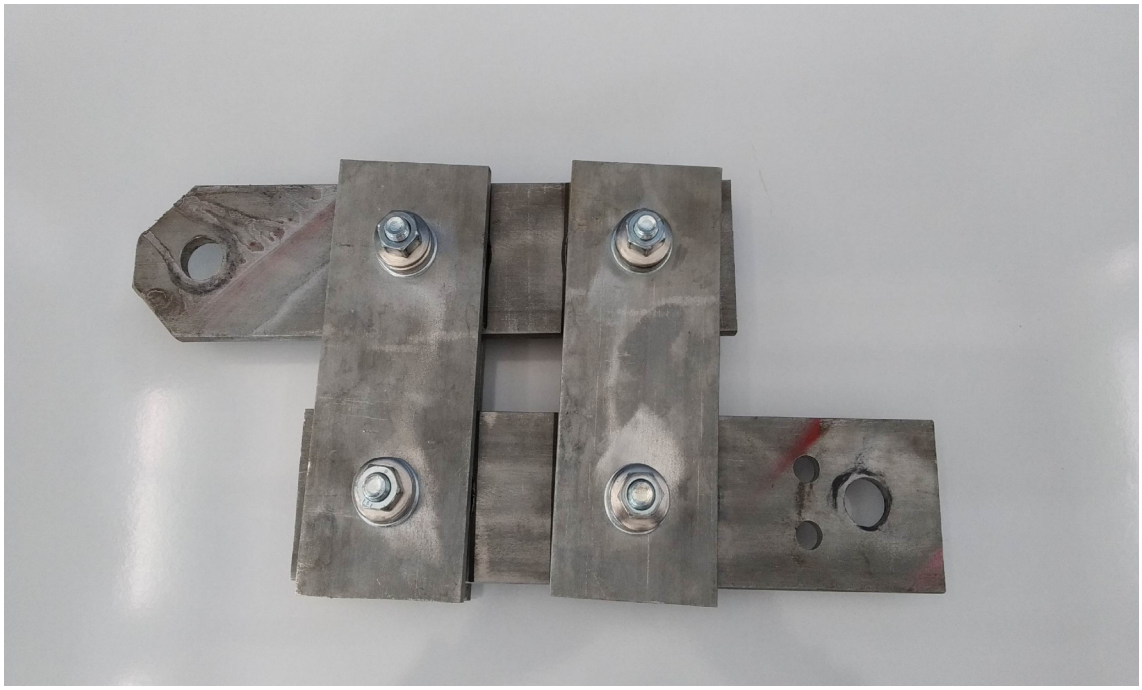
Şekil 3.33. Tip 1 sönümleyici ön ve yan görünüşü

Tip 1 sönümleyicideki çelik plaka ve sürtünme pedlerinin birleştirilme adımları aşağıda Şekil 3.34'de, üretilen sönümleyicinin görünüşü ise Şekil 3.35'de verilmiştir.

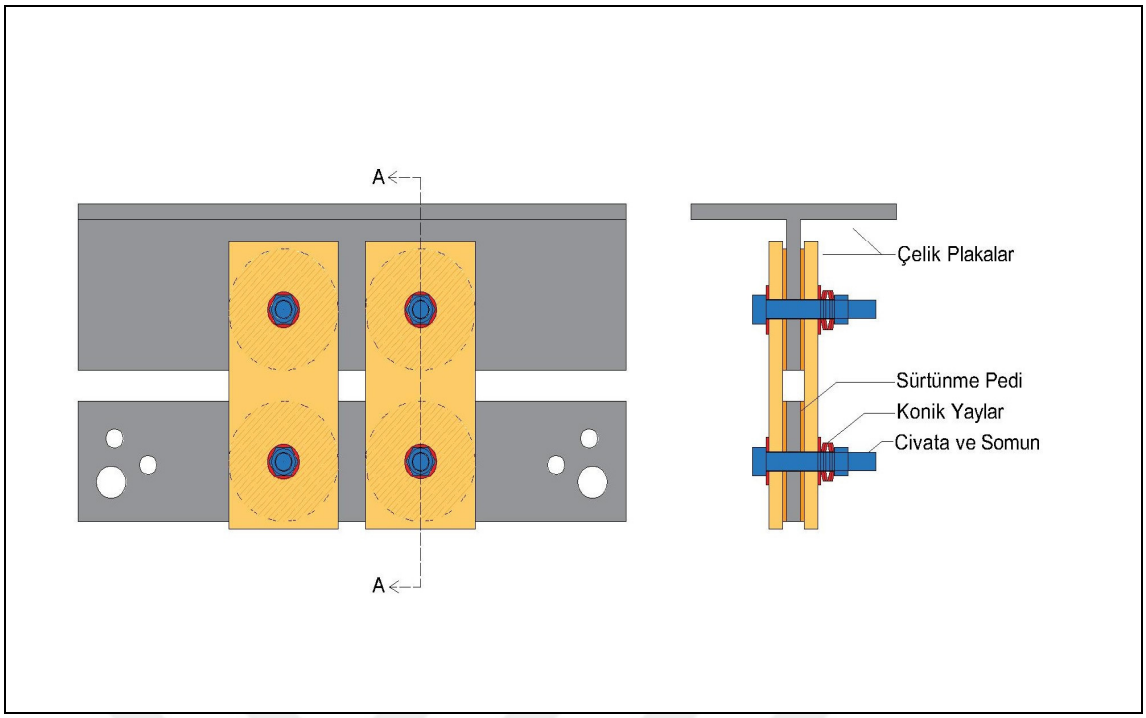
Tip 2 sönümleyicide boyutları belirlenen çelik plaka ve sürtünme pedlerinin bilgileri Şekil 3.7'de verilmiştir. Tip 2 sönümleyicinin ön ve yan görünüşlerinde sönümleyiciyi oluşturan bileşenlerin yerleşimleri aşağıda Şekil 3.36'da gösterilmiştir. Tip 2 sönümleyicideki çelik plaka ve sürtünme pedlerinin betonarme çerçeve üzerinde birleştirilme adımları aşağıda Şekil 3.37'de, üretilen sönümleyicinin görünüşü ise Şekil 3.38'de verilmiştir.



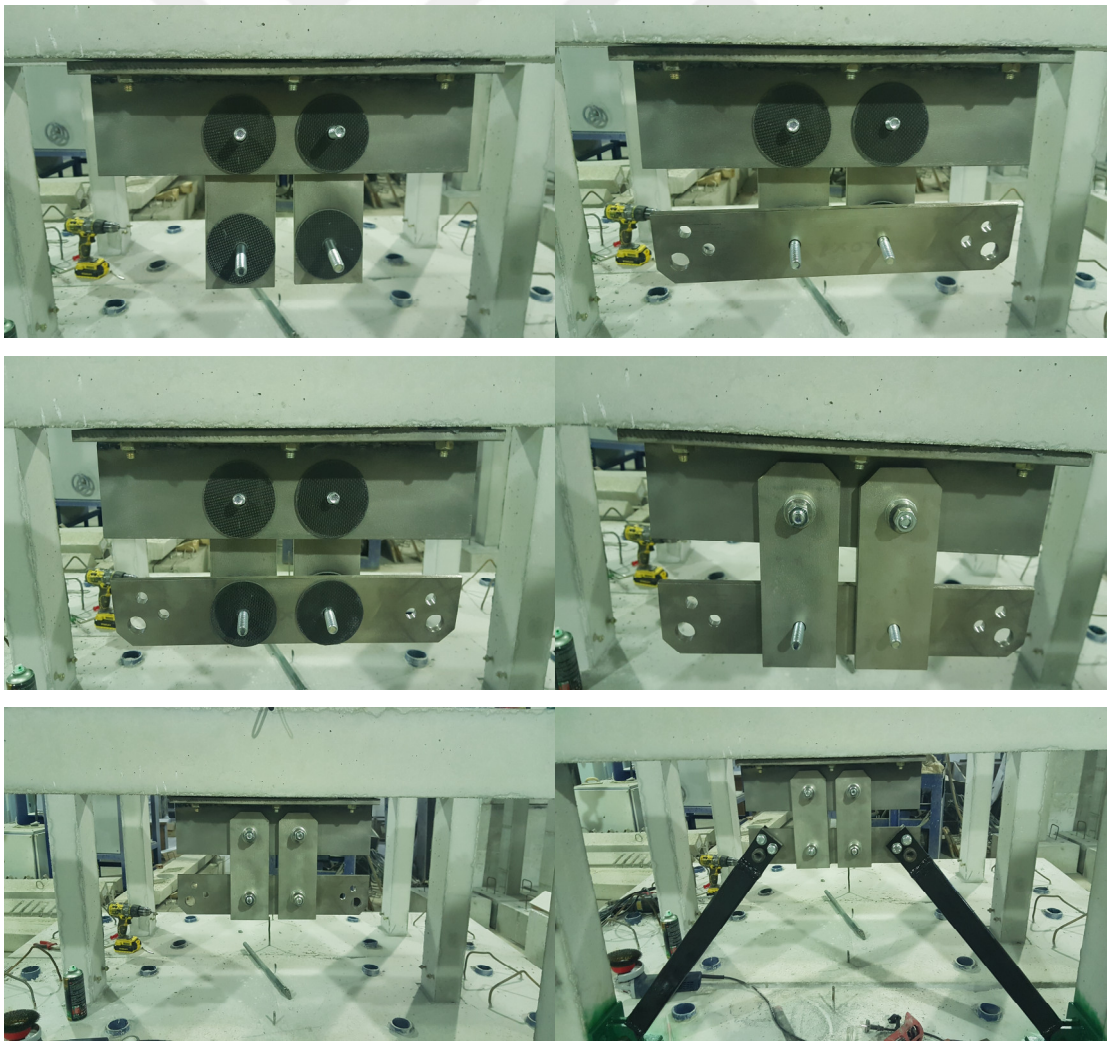
Şekil 3.34. Tip 1 sönümleyicinin birleştirme aşamaları



Şekil 3.35. Üretilen Tip 1 sönümleyici



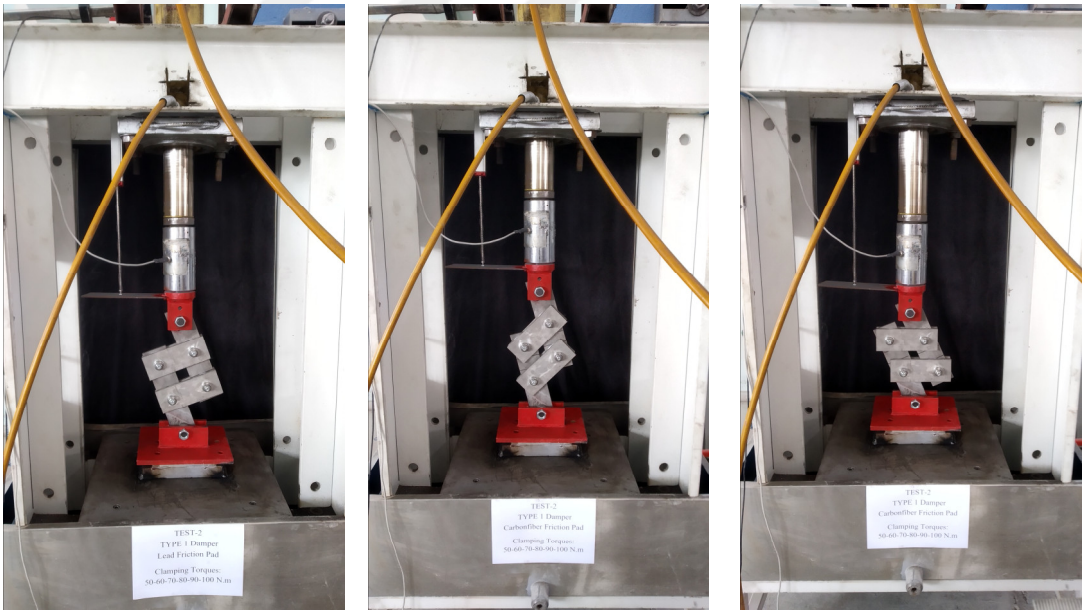
Şekil 3.36. Tip 2 sönümleyici ön ve yan görünüşü



Şekil 3.37. Tip 2 sönümleyicinin birleştirme aşamaları

Şekil 3.38. Üretilen Tip 2 sönümleyici

Tip 1 sönümleyicinin deney düzeneğinde yerleşimi ve 50 mm genlikte çekme-basma görünüşleri Şekil 3.39'da gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 3.39. Tip 1 sönümleyicinin çevrimsel deneyinden görüntüler a) Normal konum b) Çekme durumu c) Basma durumu

3.8.2. Tip 1 ve Tip 2 Sönümleyicilerin Deney Sonuçları

Deneylerden elde edilen verilere göre Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyiciler, testler boyunca kayma yükünde neredeyse hiç değişiklik göstermemiştir. Histeresis eğrilerinin dönüşlerinde ve yatay ekseni kesen kısımlarındaki yük ve deplasman değişimleri görülmektedir, bu değişimler deney sistemindeki cıvatalı bağlantıların dönmesinden ve cıvata deliklerindeki tolerans boşluklarından kaynaklanmıştır. Bunlar göz ardı edildiğinde histerezis eğrileri kusursuz bir dikdörtgene yakın şekildedir.

Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerin, rijit-mükemmel plastik davranışa yakın bir elastik-mükemmel plastik davranışa sahip olduğu görülmüştür. Sönümleyicilerin kilitlenme ve kayma fazı olmak üzere iki çalışma fazı bulunmaktadır.

$$F_S = \mu * N \qquad (3.1)$$

$\mu < \mu_S$ Kilitlenme Fazı

$\mu > \mu_S$ Kayma Fazı

Kilitlenme fazı, sönümleyicinin her iki ucuna uygulanan kuvvetin, sürtünme arayüzündeki statik sürtünme katsayısına (μ_S) göre hesaplanan sürtünme kuvvetinden (F_S) küçük olduğu durumda gerçekleşir. Bu durumda sönümleyicideki mafsallar hareket etmemekte ve sönümleyici boyunda bir değişiklik olmamaktadır. Sönümleyicinin her iki ucuna uygulanan kuvvet, statik sürtünme kuvvetini geçtiği anda sönümleyicideki mafsallar ani bir şekilde hareket etmekte, sönümleyici boyu değişmektedir. Bu faz geçişi çok küçük bir deplasman aralığında gerçekleştiğinden, (K_1) başlangıç rijitliği çok büyük bir değer almaktadır. Sönümleyicide kayma başladığında rijitlik ;

$$K_0 = 0.0001 * K_1 \qquad (3.2)$$

değerine yakın bir değere düşmekte, sönümleyiciye uygulanan kuvvet, dinamik sürtünme kuvvetinden büyük veya eşit olduğu sürece hareket bu şekilde devam etmektedir. Dinamik sürtünme kuvveti (F_D) hareket başladıktan sonra hareketin devam etmesi için gereken minimum sürtünme kuvvetidir. Sürtünen yüzeylerde iki faklı sürtünme katsayısı dikkate alınmaktadır. Bunlar statik sürtünme katsayısı (μ_S) ve dinamik sürtünme katsayısı (μ_D) dır. Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından her zaman daha büyük bir değerde olmaktadır. Sürtünme katsayısını meydana getiren temel neden yüzeyler üzerindeki mikro girinti çıkıntıların uçlarındaki temastır. Temas eden girinti ve çıkıntıların uçlarındaki gerilmenin aşılması ile hareket meydana gelmektedir. Fakat statik

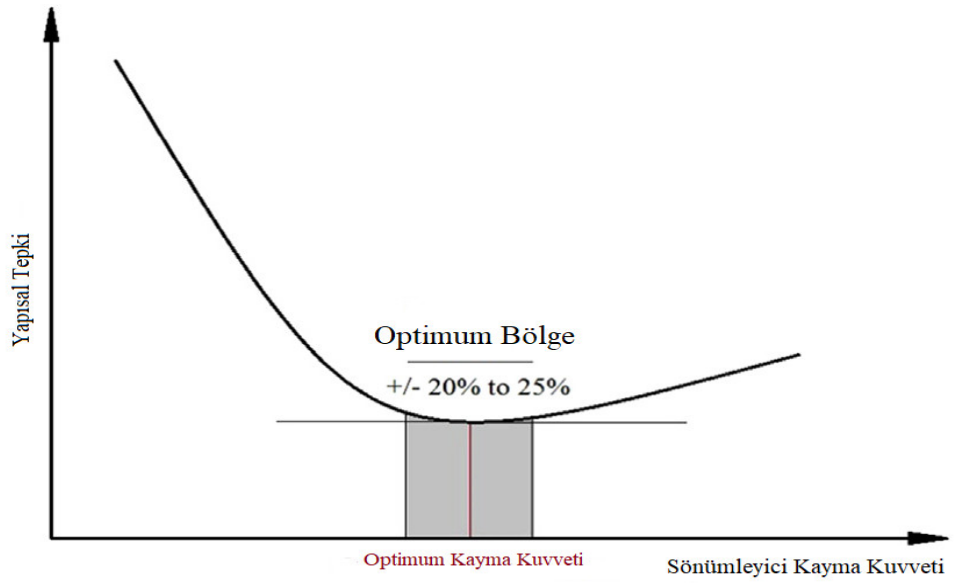
(durgun) haldeyken temas eden yüzeyler arasında birtakım fiziksel bağ kuvvetleri de oluşmaktadır. Bu bağların oluşması temas eden yüzeylerin bir süre temas halinde kalmasını gerektirdiğinden dinamik sürtünme durumunda fiziksel bağ kuvvetleri oluşmamaktadır. Bu nedenle duran bir cismi harekete geçirmek, hareketli cismin hareketini devam ettirmekten daha fazla kuvvet gerektirmektedir.

Genellikle, sürtünen yüzeyler arasındaki statik sürtünme katsayısı (μ_S), kinetik sürtünme katsayısından (μ_D) daha büyüktür. Bu durumda sürtünme kuvvetine zıt yönde uygulanan kuvvet, statik sürtünmeyi yenecek kadar büyük bir değer aldığında sürtünme kinetik sürtünme halini alır ve sürtünen yüzeylerde birbirine zıt yönde hareket başlar. Bu sırada sürtünme katsayısı düştüğünden, uygulanan kuvvetin bir kısmı harekette hızlanmaya yol açar. Hızlanma esnasında kuvvet azalır ve hareket durur, kuvvet tekrar statik sürtünmeyi yendiğinde tekrar hızlanma meydana gelir. Bu hızlanma ve durma döngüsü tekrarlandığında stick-slip denen fenomen ortaya çıkar. Stick-slip esnasında, farklı genliklerde titreşim oluştuğundan ses meydana gelir. Yaylı çalgılardan çıkan sesler, fren sırasında araç lastiklerinden ve fren disklerinden çıkan sesler stick-slip mekanizmasıyla oluşan seslerdir.

Sönümleyici testlerinde statik sürtünme katsayısı ile dinamik sürtünme katsayısı birbirine yakın olduğundan ve yüksek hızların oluştuğu frekanslara çıkılmadığından stick-slip olayı gerçekleşmemiş, sönümleyicilerin sessiz çalıştığı gözlemlenmiştir.

3.8.2.1. Sürtünme Sönümleyicilerin Kayma Yükü

Yapılara gelebilecek kayda değer yatay yük, şiddetli rüzgâr ve depremlerden dolayı meydana gelmektedir. Sönümleyici için seçilen kayma kuvveti, uygulanan yanal yüklerin küçük değerlerinde sönümleyici kaymasını önleyecek kadar yüksek, ana yapı elemanlarının akmalarından önce kaymayı sağlayacak kadar da düşük olmalıdır. Sürtünme sönümleyicileri, rüzgâr sırasında hareket etmeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Büyük bir depremde ise yapısal elemanların akmasından önce sönümleyicide sönümleme başlamış olmalıdır. Bazı çalışmalarda genel olarak alt sınır maksimum rüzgârda oluşacak kesme kuvvetinin yaklaşık %130'u, üst sınır ise çerçeve elemanlarının akmaya başlayacağı kesme kuvvetinin %75'i alınmıştır. Sürtünme sönümleyicili yapıların tepkisi, sönümleyicinin kayma yüklerinden büyük ölçüde etkilenir. Şekil 3.40’da görüldüğü gibi sönümleyici kayma yükü çok düşük veya çok yüksek ise yapısal tepki çok yüksektir.



Şekil 3.40. Optimum sönümleyici kayma kuvveti

Literatürdeki birkaç parametrik çalışma, yapı tepkisini optimum bir değere ayarlamak için sürtünme sönümleyici kayma yükünün uygun seçimiyle mümkün olduğunu göstermiştir. Bu nedenle sönümleyicinin kayma yükü, optimum yapısal tepkiyi ayarlamada ana değişkendir ve optimum kayma yükü minimum yapısal tepki verir. Aksi takdirde yapı elemanları sönümleyici ile birlikte çalışırken ekstra zorlara maruz kalabilmektedir. Kayma yükünün seçimi, aynı zamanda bir depremden sonra binanın elastik bir yapının yay hareketi ile orijinal hizasına yakın geri dönmesini sağlamalıdır. Daha önce yapılan bir dizi çalışmalarda optimum kayma yükünün ±% 20-25'ine kadar olan değişikliklerin yapısal tepkiyi önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Bu nedenle, binanın ömrü boyunca çeşitli olumsuz sebeplerden dolayı sürtünme sönümleyicinin kayma yükünde oluşacak (%8-10) küçük değişiklikler, sürtünme sönümleyicinin yeniden ayarlanmasını veya değiştirilmesini gerektirmemektedir. (Pall, 2004; Taiyari ve ark., 2019)

Bu çalışmada ise Tip 1 ve Tip 2 sürtünme sönümleyicilerin farklı sıkıştırma cıvatası torklarında (50, 60, 70, 80, 90, 100 Nm) çevrimsel testleri yapılarak bu sıkıştırma toklarındaki (sürtünme yüzeyindeki temas basıncı) kayma yükleri belirlenmiştir. Bir sonraki adımda referans betonarme çerçevenin (yalın çerçeve) SAP2000 programında statik itme analizi yapılarak kapasite eğrisi elde edilmiştir. Kapasite eğrisi üzerinde % 1 göreli ötelemeye denk olduğu varsayılan nominal akma yükü belirlenerek, tek katta oluşacak akma yükü hesaplanmıştır. Tip 1 ve Tip 2

sönümleyicilerin kat çerçevesi içinde yerleşim açısına göre yatay düzeltmesi yapılarak, üzerinde bulunması gereken optimum kayma yükü belirlenmiştir.

Referans betonarme çerçeve numunenin SAP2000 programında modellenerek statik itme analizi sonucunda % 1'lik ötelenmeye (18 mm) denk gelen nominal akma yükü 30.85 kN olarak elde edilmiştir. Şekil 3.41, Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'de Tip 1 ve Tip 2 sönümleyici deneylerinde 100 Nm cıvata sıkıştırma torku değerinde stabil olarak elde edilen sönümleyici kayma yükleri;

- Kurşun sürtünme pedi ile ortalama **850 kg**,
- Karbonfiber sürtünme pedi ile ortalama **900 kg,**
- Pirinç sürtünme pedi ile ortalama **1000 kg**

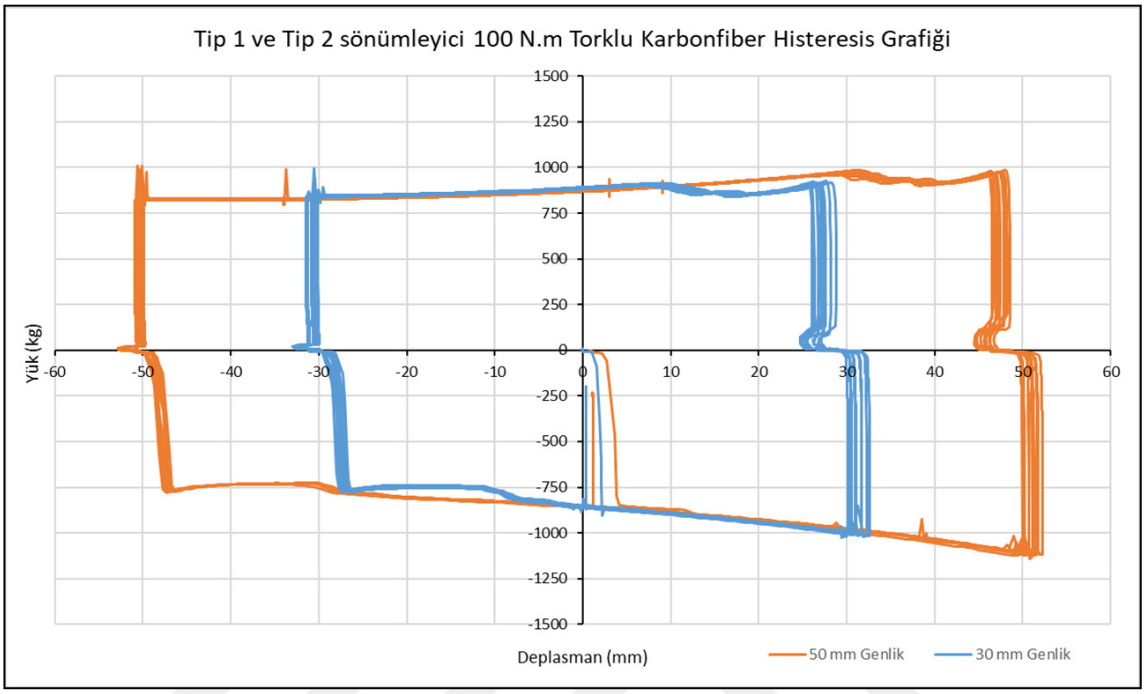
olarak elde edilmiştir. Her iki sönümleyicide de 8 adet eşdeğer sürtünme pedi ve aynı uzunluklarda moment kolları bulunduğundan çevrimlerde gözlenen kayma yükleri ~±% 5 farkla benzer çıkmıştır.

Bu sonuçlara göre Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerde karbonfiber, pirinç ve kurşun sürtünme pedleriyle 100 Nm torklu cıvata sıkıştırmalı yapılan deneylerde elde edilen kayma yükü değerlerinin enerji sönümleme açısından deneyde test edilecek betonarme çerçeveye uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Betonarme çerçeveye monte edilmiş Tip 1 sönümleyici hareket ekseni ile yatay arasında 30º açı farkı bulunmaktadır. Bu durumda Tip 1 (diyagonal) sürtünme sönümleyicilerin yataydaki kayma yükleri, açı düzeltmesi yapıldığında betonarme referans çerçevedeki bir kata gelen akma yükünün %62 (kurşun), %66 (karbonfiber), %73 (pirinç) değerlerine karşılık geldiği görülmektedir. Tip 2 sönümleyicinin hareket ekseniyle yatay arasında açı farkı bulunmadığından, sönümleyici kayma yükleri kullanılarak hesap yapıldığında betonarme referans çerçevedeki bir kata gelen akma yükünün %72 (kurşun), %76 (karbonfiber), %85 (pirinç) değerlerine karşılık geldiği görülmüştür. Şekil 3.40'da gösterilen sönümleyici optimum kayma kuvveti değerinin, kat akma yükünün %75'i olduğu kabul edildiğinde Tip 1 sönümleyici değerlerinin bir miktar optimum bölge sınırları dışarısında kaldığı görülmektedir.

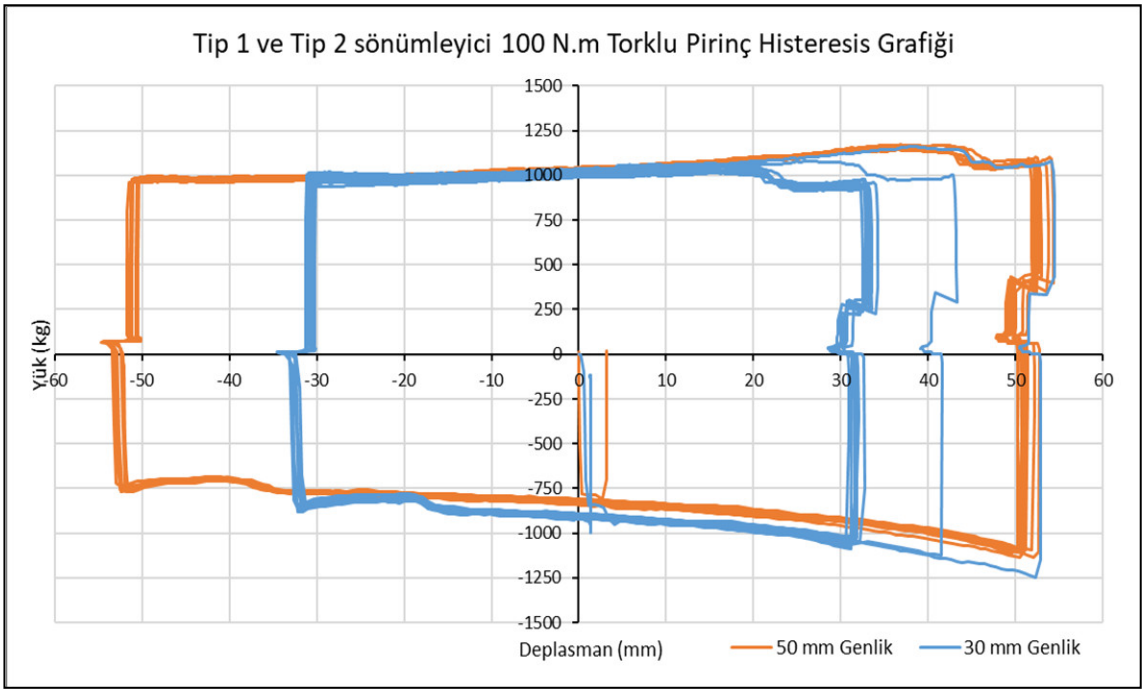
Referans çerçevenin (%1 ötelenmede) akma yükü 30.85 kN = ~3144 kg
(SAP2000 statik itme analizinde)
Tek kata düşen akma yükü = 3144/2= 1572 kg
Sönümleyici optimum kayma kuvveti (% 75) = 0.75 x 1572 = 1179 kg
Optimum bölge minimum sınırı (-% 25) = 1179 x 0.75 = ~ 884 kg

Optimum bölge maksimum sınırı (+%25) = 1179 x 1.25 = ~1474 kg

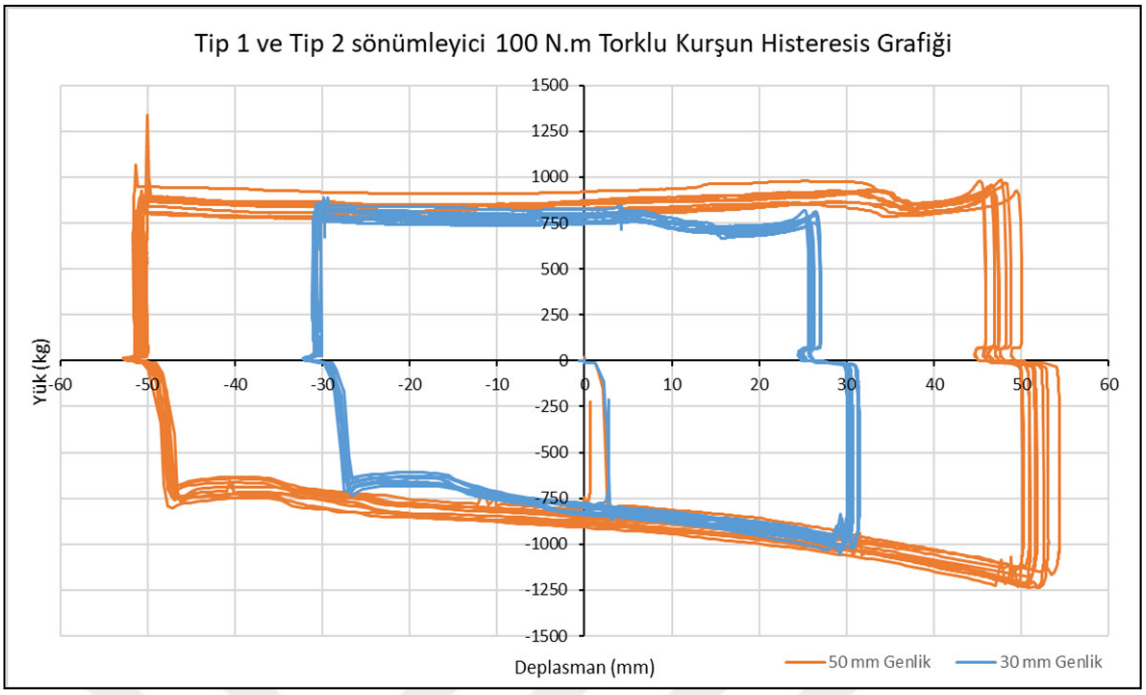
Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyicilerde cıvata sıkma torku olarak kabul edilen 100Nm değerinde, çevrimsel yükleme deneyleri sonucu elde edilen histerezis grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 3.41, Şekil 3.42, Şekil 3.43).



Şekil 3.41. Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sürtünme pedli sönümleyicinin 100 Nm cıvata sıkma torkunda elde edilen histerezis grafiği



Şekil 3.42. Tip 1 ve Tip 2 pirinç sürtünme pedli sönümleyicinin 100 Nm cıvata sıkma torkunda elde edilen histerezis grafiği



Şekil 3.43. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sürtünme pedli sönümleyicinin 100 Nm cıvata sıkma torkunda elde edilen histerezis grafiği

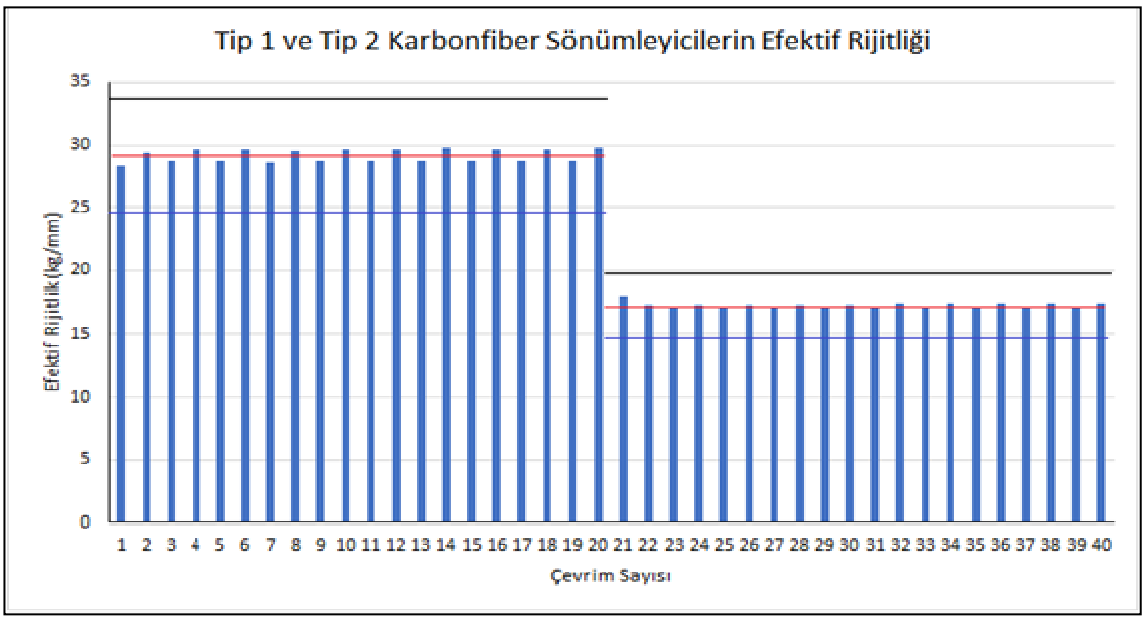
3.8.2.2. FEMA356 Sönümleyici Kabul Kriterlerine Göre Değerlendirme

Sürtünme sönümleyicilerin bireysel testlerinde performanslarını değerlendirmek için FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre incelenmiştir. 20 kısa genlik (30 mm) + 20 uzun genlikteki (50 mm) çevrimlerden oluşan bireysel sönümleyici deneylerinde elde edilen dikdörtgen histeretik çevrim grafikleri çeşitli kıstaslara göre değerlendirilmiştir. Bu grafiklerden hareketle histeretik davranışlarının son derece düzenli ve tekrarlanabilir olduğu görülmüştür. FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerinde belirlenen esaslara göre her çevrim için eğrilerin y eksenini kestiği noktalardan bulunan kayma yükü, Denklem 1.13 ile hesaplanan efektif rijitlik (k_{eff}), Denklem 1.14 ile hesaplanan efektif sönüm (b_{eff}) ve her çevrime ait eğrinin kapalı alanından hesaplanan enerji tüketimi (W_D) değerleri sütun grafikleri olarak gösterilmiştir. İlk 20 çevrim (30 mm-kısa genlik) ve son 20 çevrim (50 mm-uzun genlik) için iki ayrı ortalama değerler bulunarak, bu değere göre hesaplanan ±%15 kabul edilebilirlik sınır değerleri elde edilmiştir. Sütun grafiklerinde bu değerler alt sınır 0.85 ortalama (mavi), ortalama (kırmızı), üst sınır 1.15 ortalama (siyah) yatay doğrusal çizgilerle gösterilmiştir.

Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca kayma yükü değişimi Şekil 3.44'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki kayma yüklerinin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.

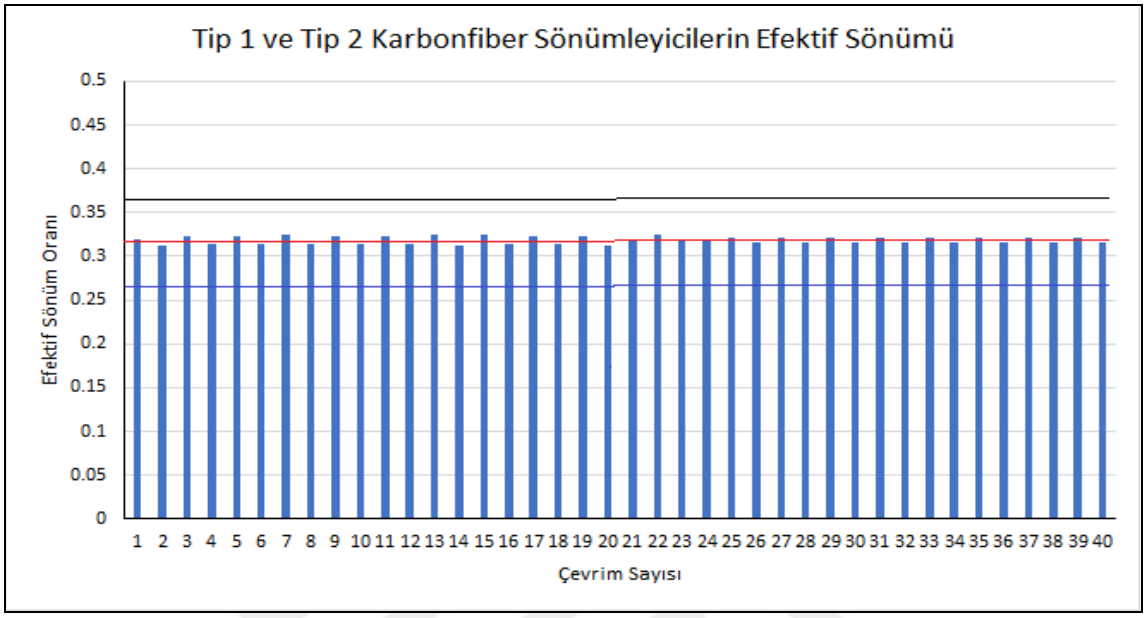
Şekil 3.44. Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre kayma yükü değişimi

Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca efektif rijitlik (k_{eff}) değişimi Şekil 3.45'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki efektif rijitlik değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



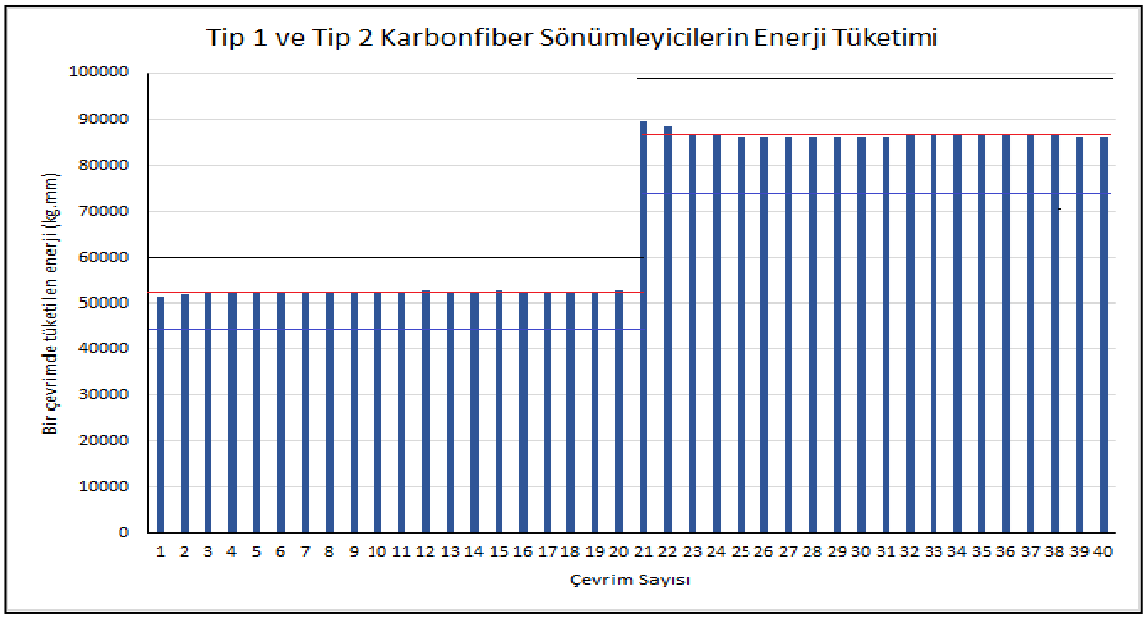
Şekil 3.45. Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre efektif rijitlik (k_{eff}) değişimi

Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca efektif sönüm oranı (b_{eff}) değişimi Şekil 3.46'da gösterilmiştir. Çevrimlerdeki efektif sönüm oranı değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



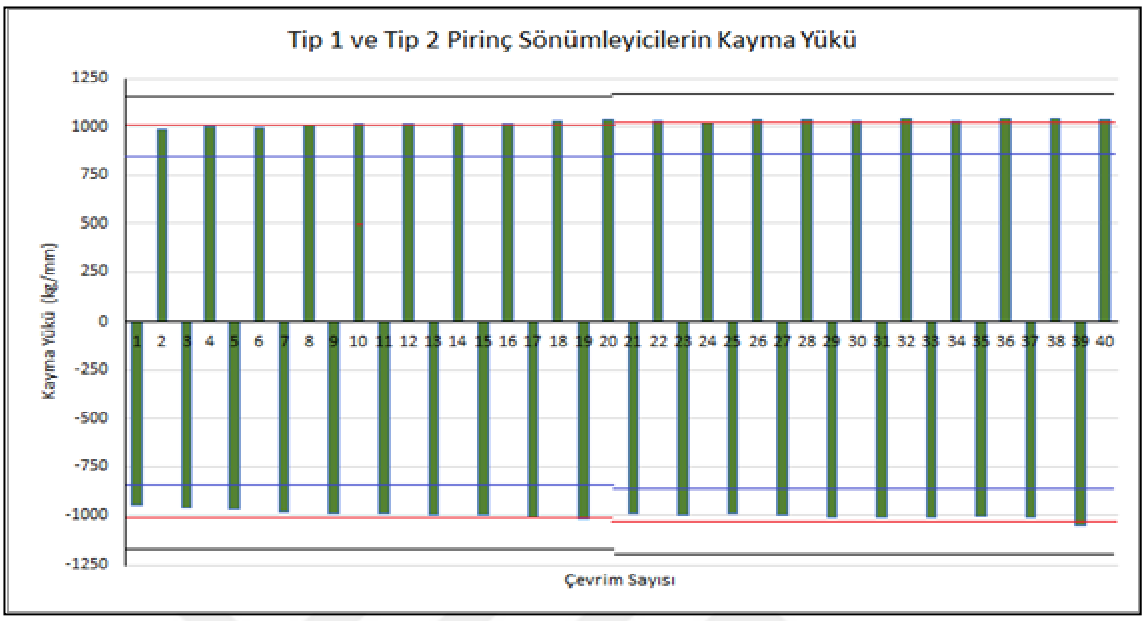
Şekil 3.46. Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre efektif sönüm (b_{eff}) oranı değişimi

Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca her çevrimdeki enerji tüketimi değişimi Şekil 3.47'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki enerji tüketimi değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



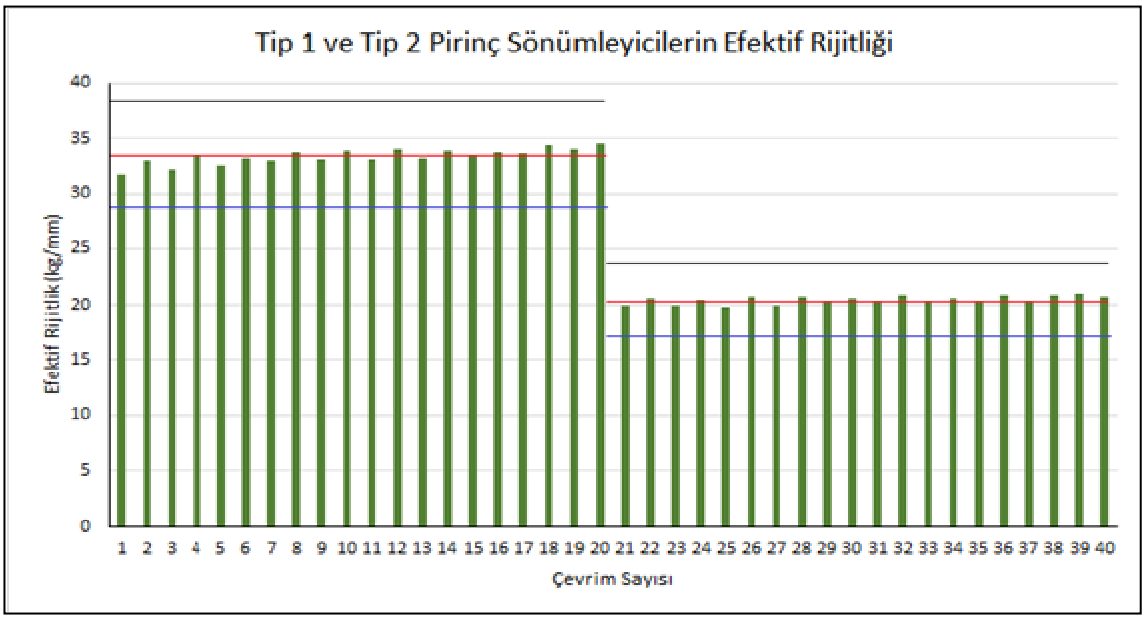
Şekil 3.47. Tip 1 ve Tip 2 karbonfiber sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre enerji tüketim değişimi

Tip 1 ve Tip 2 pirinç sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca kayma yükü değişimi Şekil 3.48'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki kayma yüklerinin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



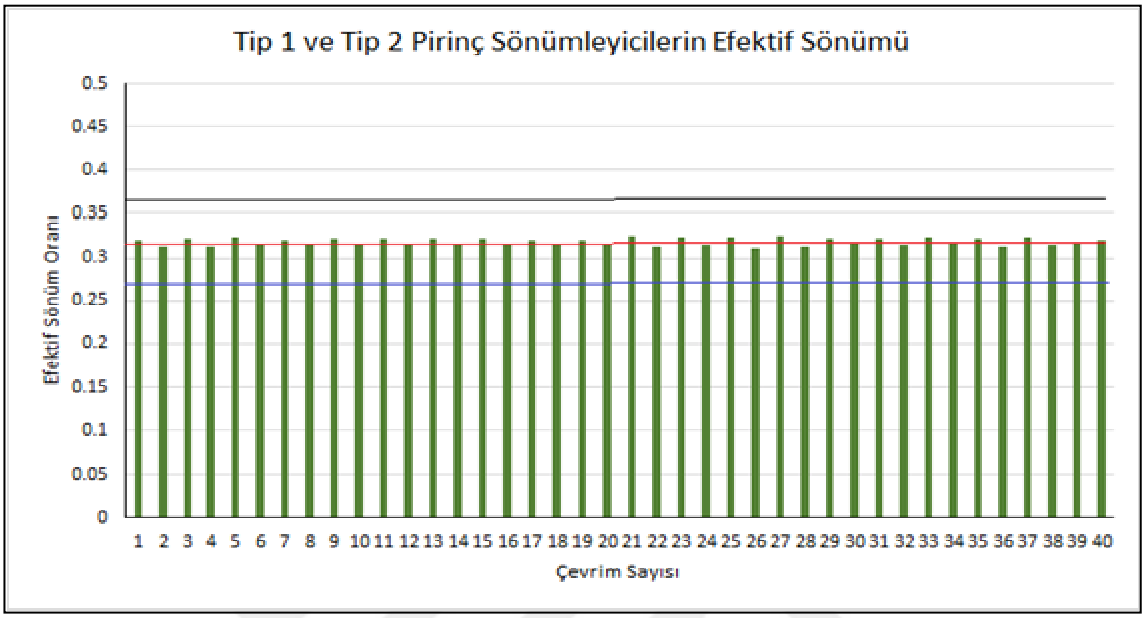
Şekil 3.48. Tip 1 ve Tip 2 pirinç sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre kayma yükü değişimi

Tip 1 ve Tip 2 pirinç sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca efektif rijitlik (k_{eff}) değişimi Şekil 3.49'da gösterilmiştir. Çevrimlerdeki efektif rijitlik değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



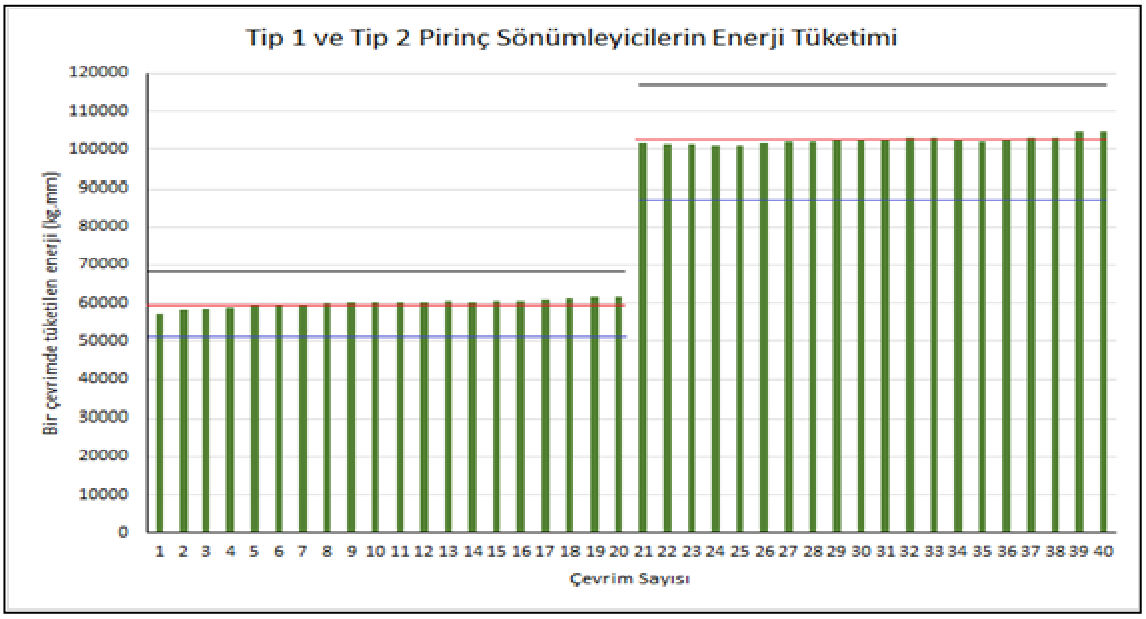
Şekil 3.49. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre efektif rijitlik (k_{eff}) değişimi

Tip 1 ve Tip 2 pirinç sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca efektif sönüm oranı (b_{eff}) değişimi Şekil 3.50'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki efektif sönüm oranı değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



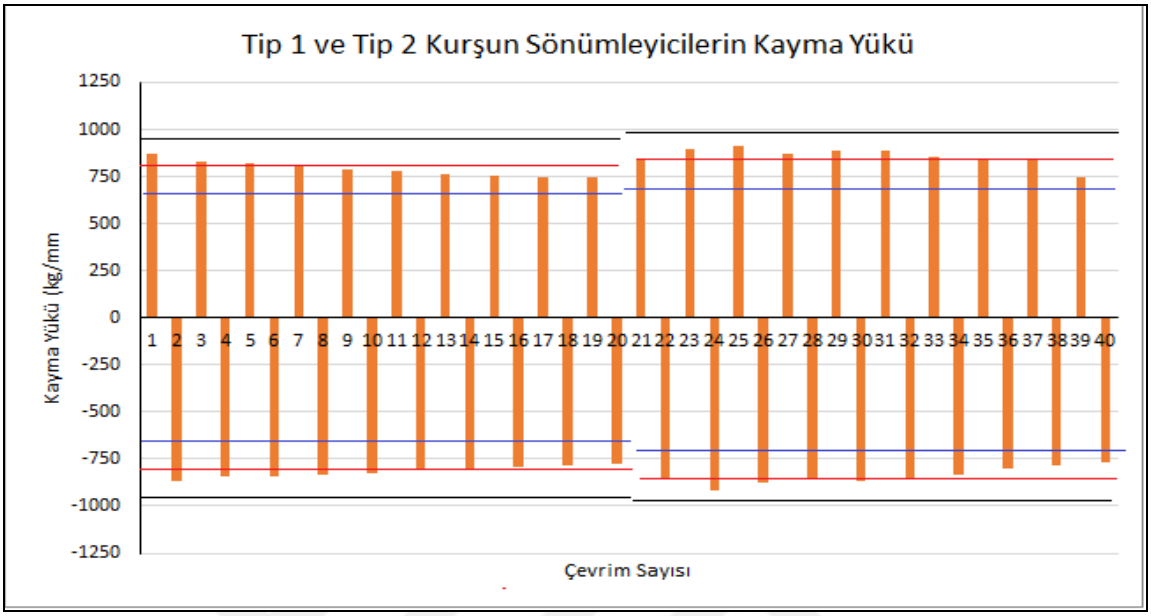
Şekil 3.50. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre efektif sönüm (b_{eff}) oranı değişimi

Tip 1 ve Tip 2 pirinç sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca her çevrimdeki enerji tüketimi değişimi Şekil 3.51'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki enerji tüketimi değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



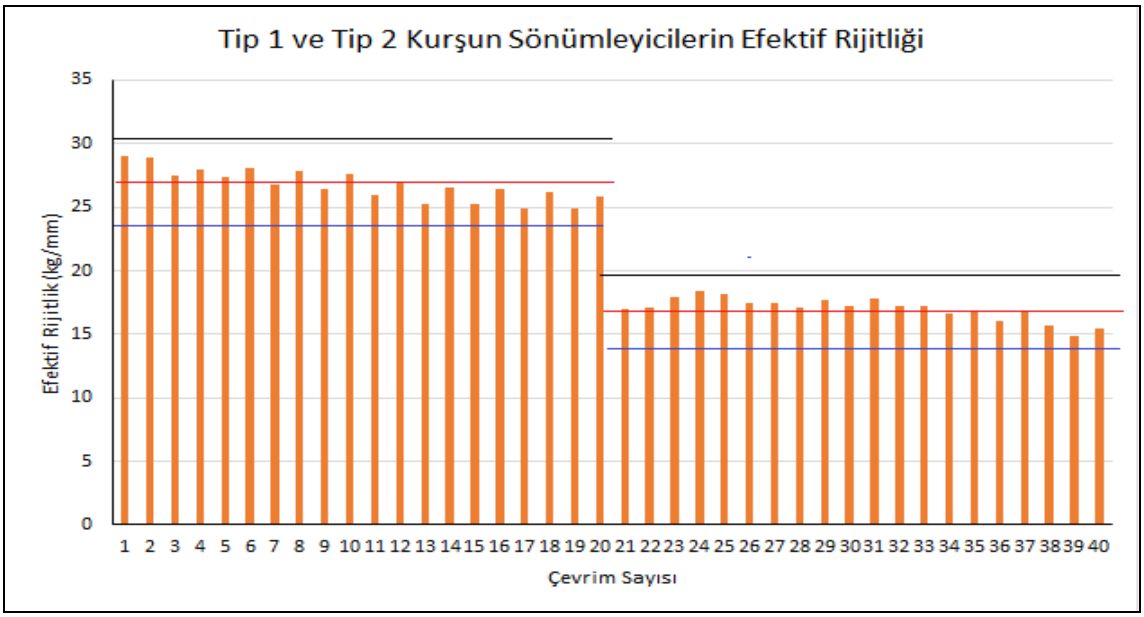
Şekil 3.51. Tip 1 ve Tip 2 pirinç sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre enerji tüketim değişimi

Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca kayma yükü değişimi Şekil 3.52'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki kayma yüklerinin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



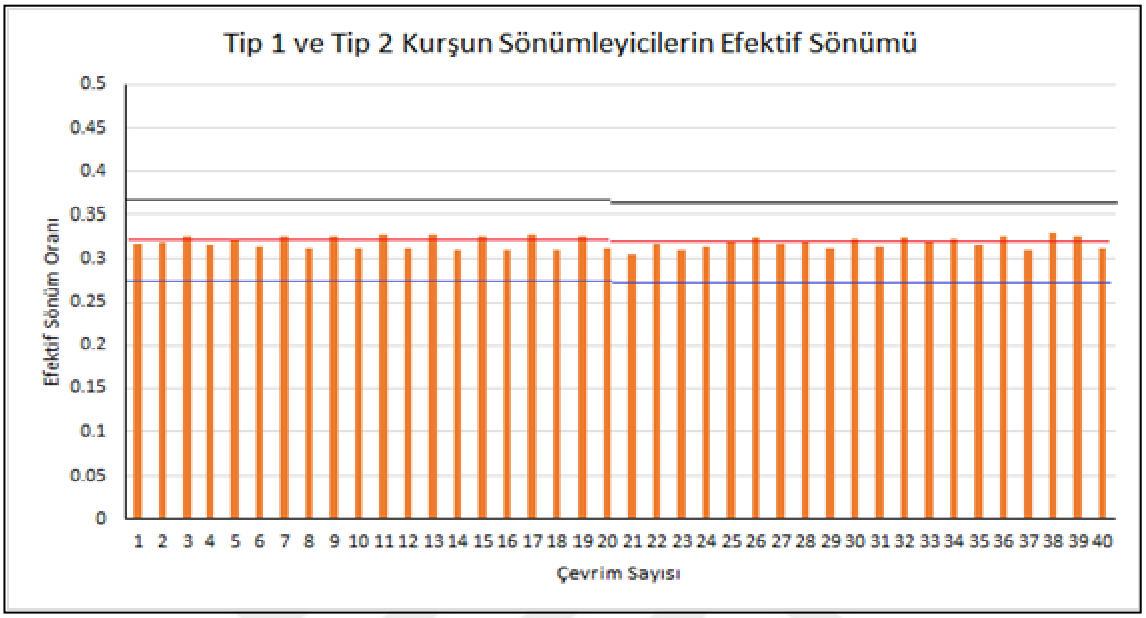
Şekil 3.52. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre kayma yükü değişimi

Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca efektif rijitlik (k_{eff}) değişimi Şekil 3.53'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki efektif rijitlik değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



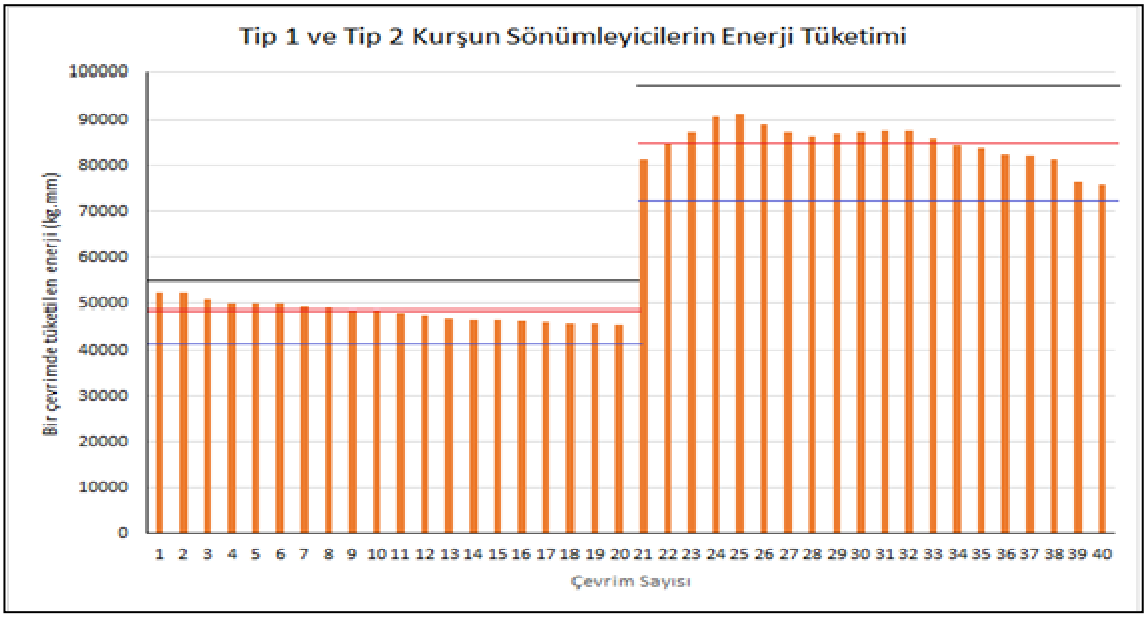
Şekil 3.53. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre efektif rijitlik (k_{eff}) değişimi

Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca efektif sönüm oranı (b_{eff}) değişimi Şekil 3.54'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki efektif sönüm oranı değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 3.54. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre efektif sönüm (b_{eff}) oranı değişimi

Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin deneydeki 40 çevrim boyunca her çevrimdeki enerji tüketimi değişimi Şekil 3.55'de gösterilmiştir. Çevrimlerdeki enerji tüketimi değişiminin FEMA356 kabul kriterlerine uygun şekilde, sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 3.55. Tip 1 ve Tip 2 kurşun sönümleyicilerin FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine göre enerji tüketim değişimi

3.8.2.3. Sıcaklık Değerlendirmesi

20 çevrim 30 mm genlikte 0.1 Hz frekansta ve 20 çevrim 50 mm genlikte 0.06 Hz frekansta gerçekleştirilen toplam 40 çevrimlik Tip 1 ve Tip 2 sönümleyici deneylerinde deney başlangıcı, deney ortası ve deney sonunda sönümleyicilerde sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

Sıcaklık ölçümleri endüstriyel infrared bir termometre ile sönümleyici mafsal cıvatası başı veya somun civarından yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri sönümleyicideki 4 sürtünme mafsalının ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Elde edilen verilerin ortalaması Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Tip 1 ve Tip 2 sürtünme sönümleyici deneyi sırasında okunan ortalama sıcaklık değerleri

Sürtünme Pedi Materyali	**Deney Başlangıç Sıcaklığı (C°)**	**Deney Ortası Sıcaklığı (C°)**	**Deney Sonu Sıcaklığı (C°)**
Karbonfiber	24.7	47.3	63.9
Pirinç	25.2	42.7	65.1
Kurşun	25.4	45.6	68.7

Sönümleyicilerden elde edilen sıcaklık verileri, sürtünme katsayısı ve genleşmeden doğabilecek davranış değişikliklerini doğuracak sıcaklık değerlerinden düşük kalmıştır. Deneyde yükleme frekansının küçük olması ısının sürtünme yüzeyinden yayılmasına imkân sağlamıştır. Sürtünme pedi materyallerinin ısıyı diğer materyallere nispeten iyi ileten metallerden ve ısı iletkenlik özelliği iyi olan karbonfiberden oluşması ısının hızlıca yayılmasında etkili olmuştur. Sönümleyicideki çelik plaka kalınlıklarının büyük tutulmasındaki amaçlardan biri de ısı sığasını yükseltmektir. Isıyı iyi ileten metallerden yapılan büyük kütleli sönümleyicilerde enerji dağıtımından kaynaklanan sıcaklıklar daha düşük kalmaktadır. Ayrıca sürtünme pedlerinin geniş yüzeyli olması da bu yönden bir avantajdır. Cıvata üzerindeki normal kuvvet, sürtünme pedine basınç olarak aktarılırken merkezden dışa doğru azaldığından, en büyük basınç değerleri cıvata etrafında ve sürtünme pedi merkezine yakın bölgelerde meydana gelmekte ve bu bölgelerde daha fazla aşınma ve yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Normal kuvvet, büyük çaplı sürtünme pedinde daha büyük bir alana yayıldığından sıcaklık daha düşük kalmaktadır.

Sıcaklığın düşük kalmasında en etkili nedenler, deneydeki çevrim sayısının az olması ve yükleme frekansının küçük değeridir. Daha fazla çevrimin olduğu gerçek

deprem frekanslarını içeren dinamik deneylerde yapılan ölçümlerin gerçeğe daha uygun olacağı ve daha yüksek sıcaklık değerleri vereceği unutulmamalıdır.

3.8.2.4. Tribolojik Değerlendirme

Bu kısımda Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyicilerdeki sürtünme davranışının yukarıda belirtilen tribolojik kavramlara ve deneysel gözlemlere dayalı olarak deneyleri yapılan niteliksel bir açıklamasıdır. Bu başlık altındaki açıklama, çelik ile kurşun plakalar arasında ve çelik ile pirinç plakalar arasında sürtünmenin meydana geldiği her iki sönümleyici için de geçerlidir.

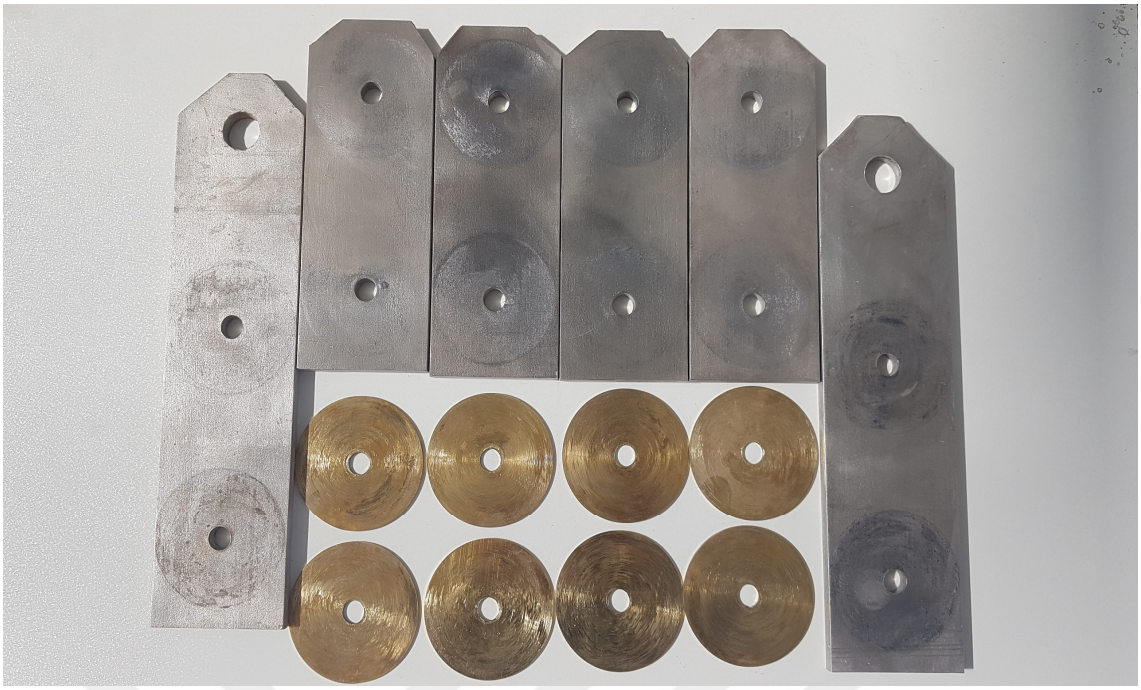
Sönümleyicide hareket başladığında, kayma yüzeyleri arasındaki adhezif aşınma nedeniyle aşınma parçacıklarının (talaş) oluştuğu bilinmektedir. Bu parçacıkların plaka arasında sıkışmasıyla, dış plakaların cıvata eksenleri yönünde dışa doğru yer değiştirmesine neden olmaktadır. Bu durum da cıvata öngerme kuvvetinin artmasına ve dolayısıyla kayma yüzeyleri arasındaki normal kuvvetin artmasına neden olmaktadır. Sürtünme kuvveti normal kuvvetle doğru orantılı olduğundan, normal kuvvetteki bu artış sönümleyicinin kayma kuvvetinde bir artış olarak gözlemlenmektedir. Deneylerde de gözlemlendiği (özellikle karbonfiber sürtünme pedinde) gibi yüksek tekrarlı rotasyonel kayma hareketleri ile birlikte bağımsız aşınma parçacıklarının bir kısmı sürtünme arayüzünden düşerken, geri kalanı ya yeniden koptuğu yüzeye geri yapışmakta ya da abrazif aşınmaya katkıda bulunan aşındırıcı parçacıklar olarak işlev görmektedir. Karbonfiber sürtünme pedi deneylerinde, özellikle karbonfiber kompozitinin matris bileşenini oluşturan karbon bazlı reçine kısmının, toz halinde sürtünme arayüzünden döküldüğü ve çelik sürtünme yüzeylerinde toz halinde iz bıraktığı görülmüştür (Şekil 3.56).

Şekil 3.56. 200 çevrim sonrası karbonfiber sürtünme pedlerinde ve çelik plakalarda oluşan aşınma

Tribolojik terminolojiye göre, özellikle kurşun-çelik arayüzünde ve pirinç-çelik arayüzünde meydana gelen olgu basit bir şekilde açıklanacak olursa, bu yüzeylerde meydana gelen aşınma önce adhezif aşınmadır. Fakat adhezif aşınmanın sonucunda ortaya çıkan aşınma parçacıklarının arayüzde devreye girmesiyle adhezif aşınmaya ilaveten abrazif aşınma da meydana gelmektedir.

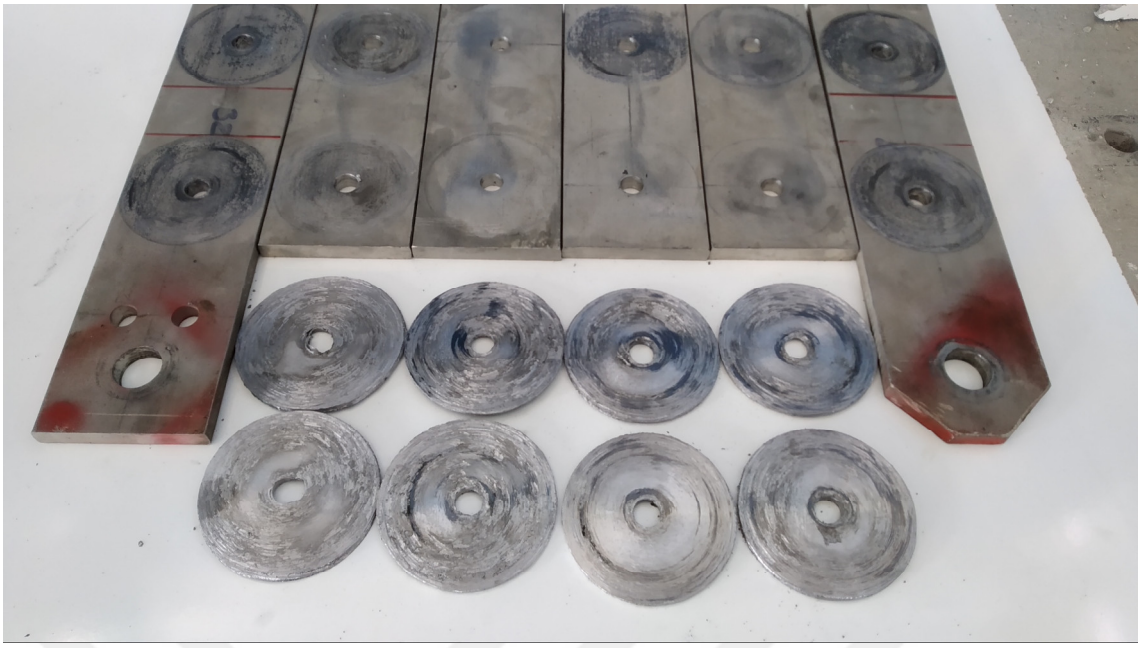
Sönümleyicilerdeki dış plakaların ve sürtünme pedlerinin orijinal yüzeylerindeki pürüzsüzlüğüne rağmen, abrazif aşınmanın meydana gelmesi deneylerin tamamlanmasından ve sürtünme yüzeylerinin muayenesi için sönümleyicilerin sökülmesinden sonra gözlemlenen kayan yüzeylerin görünümü ile tespit edilmiştir.

Çelik ile pirinç arasındaki sürtünme durumunda, sadece pirinç sürtünme pedi yüzeyi çizilmiş gibi görünürken, çelik yüzeyi hasarsız ancak çok az miktarda sarı renkli materyal görüntüsü ile pirinç lekeli olarak görünmektedir. Pirinç sürtünme pedindeki çizilmiş yüzeyler, abrazif aşınmanın tipik bir sonucudur (Şekil 3.57) Sürtünme arayüzündeki bağımsız aşınma parçacıklarının düşmesi veya çizilen yüzeylerdeki boşluklara yeniden emilmesi, dış plakaların içe doğru yer değiştirmesine neden olduğundan cıvata öngerme kuvvetini azaltma etkisine sahiptir. Bu durum, sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvette bir azalma ile sonuçlanır ve sönümleyici kayma kuvvetinde bir düşüş olarak gözlemlenir. Daha önceki çalışmalarda dış plakaların, kayma kuvvetindeki artış ve düşüşle eş zamanlı olarak dışa ve ardından içe doğru yer değiştirmesi, cıvataların eksenleri boyunca dış plakaların yer değiştirmelerinin ölçülmesiyle doğrulanmıştır.(Grigorian ve ark., 1993)



Şekil 3.57. 200 çevrim sonrası pirinç sürtünme pedlerinde ve çelik plakalarda oluşan aşınma

Kurşun, pirinç metaline göre çok daha yumuşak bir malzemedir. Çelik ile kurşun arasındaki sürtünme durumunda, sadece kurşun sürtünme pedi yüzeyi çizilmiş gibi görünürken, çelik yüzeyi hasarsız ve pirinç içeren sönümleyicilerin aksine yüzeyinde daha fazla miktarda yapışmış kurşun materyali ile lekeli görünmektedir. Düşük çevrimsel tekrar sayılarında (40-50 çevrim) kurşun sürtünme pedindeki çizilmiş yüzeyler, pirinçte olduğu gibi abrazif aşınmanın tipik bir sonucudur. Fakat yüksek çevrim sayılarında (150-200 çevrim) sürtünme arayüzünde adhezif aşınma çok fazla oluşmaktadır. Deneyler sırasında sürtünme arayüzünden bağımsız aşınma parçacıklarının düştüğü gözlenmemiştir. Deneylerin tamamlanmasından ve sürtünme yüzeylerinin muayenesi için sönümleyicilerin sökülmesinden sonra incelenen kayma yüzeylerinin görünümü ile bağımsız aşınma parçacıklarının büyük oranda çizilen yüzeylerdeki boşluklara yeniden emildiği ve biriktiği tespit edilmiştir (Şekil 3.58) Kurşun metaline özgü bir özellik, bu sonucu doğurmuştur. Kurşun, yüksek basınç altında ve oda sıcaklıklarında ekstrüzyon ile şekil değiştirebilen bir metaldir. Yüksek çevrim sayılarında sönümleyici kayma yükünde, pirinçte de olduğu gibi bir düşüş gözlenmemiştir. Fakat daha yüksek çevrim sayılarında muhtemel bir düşüş olabileceği unutulmamalıdır.



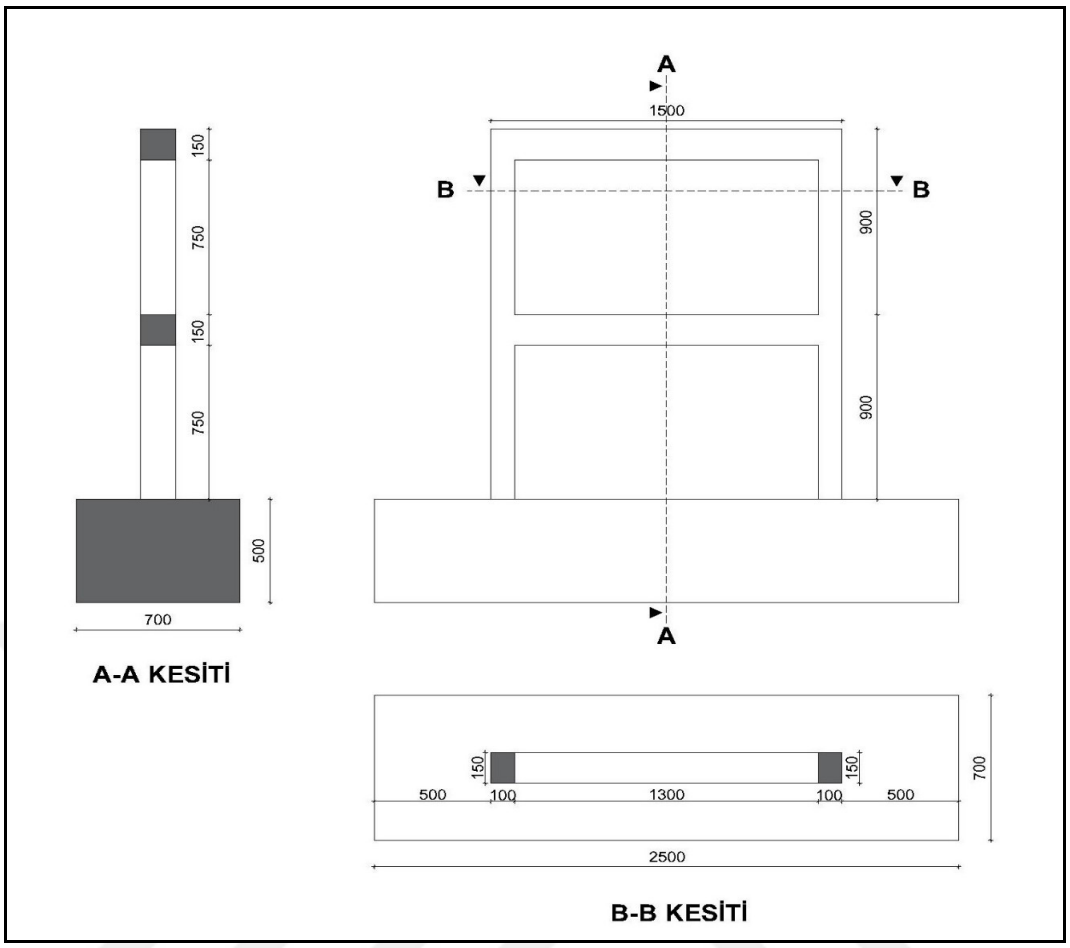
Şekil 3.58. 200 çevrim sonrası kurşun sürtünme pedlerinde ve çelik plakalarda oluşan aşınma

3.9. Betonarme Çerçeve Deney Numuneleri

Bu başlık altında, çalışma kapsamında üretilmiş betonarme çerçevelerin boyut, detay, donatı miktarları ve düzenleri, üretimde kullanılan beton ve donatı çeliği gibi malzeme özellikleri detaylı olarak sunulmuştur.

3.9.1. Betonarme Çerçeve Numunelerin Boyutları

Deneyi yapılan betonarme çerçevelerin boyutları Şekil 3.59'da gösterilmiştir. Betonarme çerçeve numunelerde kat yüksekliği 900 mm, dış yüzden dış yüze kiriş açıklığı ise 1500 mm'dir. Temellerde dönme, ötelenme vb. etkiler istenmediğinden oldukça rijit bir temel yapılması planlanmıştır. Bu nedenle temel boyutu 500x700x2500 mm olarak belirlenmiştir. Temelleri rijit şekilde laboratuvar zeminindeki döşemeye bağlayabilmek için temel gövdesinde uygun aralıklar ile 80 mm çaplı düşey tij delikleri bırakılmıştır. Kiriş kesitleri 150x150 mm, kolon kesitleri ise 100x150 mm boyutlarında seçilmiştir. Güçlü kiriş zayıf kolon kusurunun oluşması için kiriş kesitleri ve donatı miktarı kolonlardan büyük tutulmuştur. Deney çerçevesi boyutları, ülkemizde taşra bölgelerinde sık rastlanan tipik bina boyutları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Laboratuvar ekipmanları ve yükleme düzeneği kapasiteleri dikkate alındığında gerçek boyutlu çerçevelerin deneylerinde problem yaşanabileceği düşünülerek çerçeve boyutları 1/3 ölçeğine küçültülmüştür.



Şekil 3.59. Betonarme çerçeve deney elemanlarının boyutları (Ölçüler mm cinsindendir)

3.9.2. Betonarme Çerçeve Numunelerin Detayları

Tez çalışmasında Türkiye'deki deprem davranışı zayıf, az katlı betonarme binaların rehabilitasyonu için alternatif bir yöntemin araştırılması amaçlandığından, yapıların önceki betonarme yönetmelik ve standartları (TBDY 2007, TS 500-2000 ve daha eski) dikkate alınarak yapıldığı veya özellikle köy, kasaba gibi yerleşim birimlerinde yetersiz mühendislik hizmeti aldığı varsayılmıştır. 1999 yılında meydana gelen Kocaeli ve Düzce Depremleri öncesi inşa edilen yapılarda nervürlü - S420 sınıfı donatı, hazır beton, zemin etüdü, yapı denetimi gibi koşul ve zorunluluklar bulunmadığından, özellikle 2000 yılı öncesi inşa edilmiş yapılarda kusur ve eksikliklerin sık görüldüğü, bu nedenle de bu yapılarda deprem davranışının zayıf olduğu bilinmektedir. Üretilen betonarme çerçevelerin bu tür binaları temsil etmesi önemlidir.

Daha önce de açıklandığı gibi, betonarme çerçeve numunelerin Türkiye'de sıklıkla görülen tasarım ve yapımdan kaynaklanmış kusur ve eksiklikleri içermesi için, üretimde bazı detaylara özellikle dikkat edilmiştir. Beton dayanımının düşük olması, düz

yüzeyli etriye kullanımı, kirişlerin kolonlardan güçlü olması, etriye sıklaştırma bölgelerinin bulunmaması, 90º açıyla bükülmüş etriye kancaları, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde etriye bulunmaması gibi kusurlar malzeme, kesit boyutu ve donatı detayları ile özellikle oluşturulmuştur. Çerçevelerdeki kolon, kiriş ve temelde boyuna donatı olarak nervürlü S420 sınıfı betonarme çeliği kullanılmıştır. Kolon, kiriş etriyeleri düz yüzeyli S235 transmisyon çeliğinden üretilmiştir. Etriyelerde sıklaştırma bölgesi yapılmadan ve kanca bükümleri 90º açılı olacak şekilde imal edilmiştir.

3.9.3. Betonarme Çerçeve Numunelerin Donatıları

Çalışma kapsamında daha önce de bahsedildiği gibi ülkemizdeki betonarme çerçeveli yapılarda donatı açısından sıkça görülen kusur ve eksikleri barındıran numuneler üretilmiştir. 150x150 mm kare kesitli betonarme çerçeve kirişlerinin açıklığında ve mesnet bölgelerinde aynı donatı düzeni pilyesiz teşkil edilerek kullanılmıştır. Kiriş kesitinde alt donatı olarak 3ϕ10 nervürlü eğilme donatısı ve üst donatı olarak da 3ϕ10 nervürlü montaj donatısı kullanılmıştır. Donatı oranı Denklem 3.3 ile ρ = 0.01207 olarak bulunmuştur. Bu donatı oranı, TS500'de istenen sınırlar içerisinde kalmaktadır (TS500, 2000).

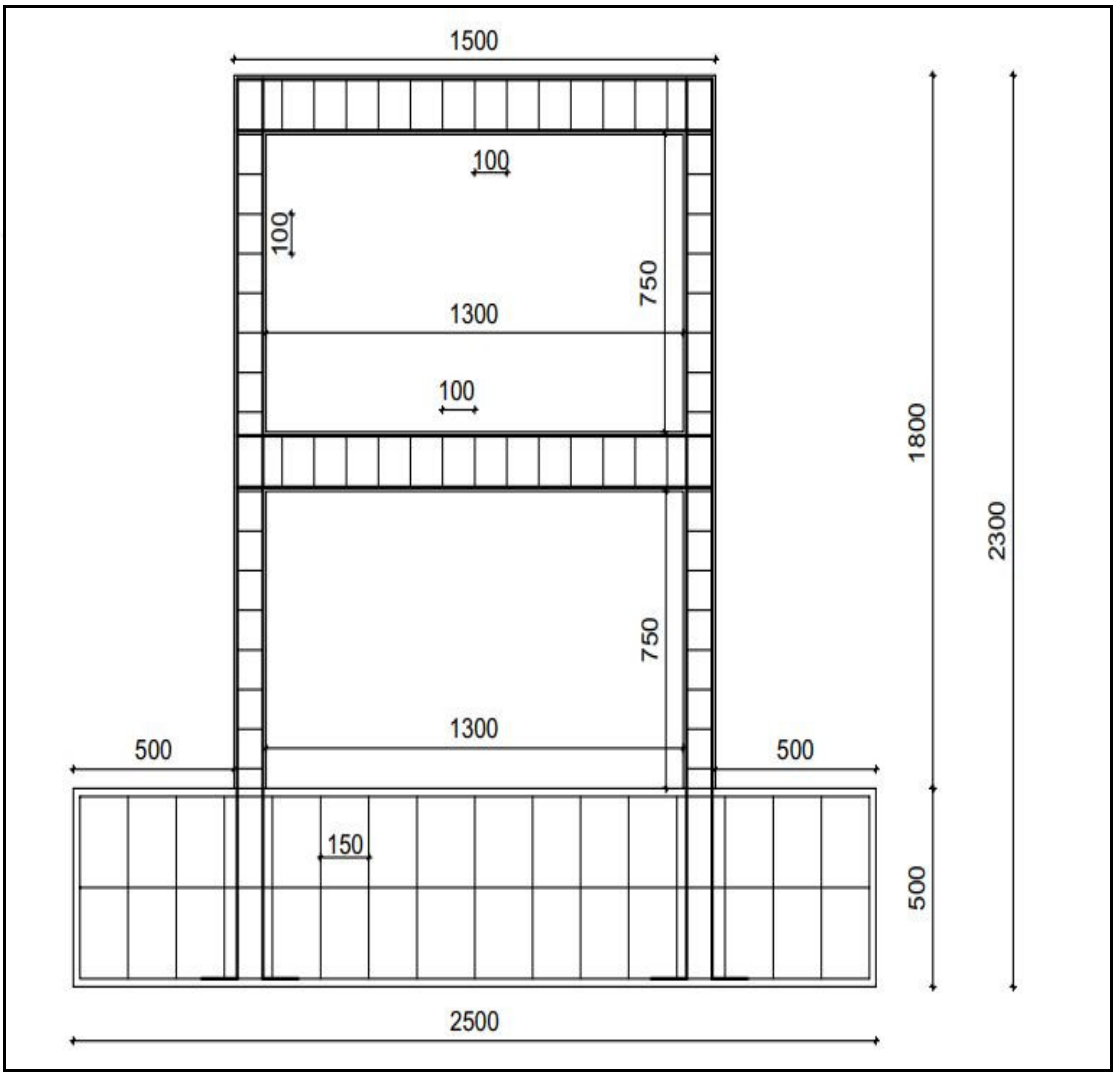
$$0{,}02 > \rho = \frac{A_s}{b_w\, x\, d} = \frac{3 \times 78.5}{150 \times 130} = 0.01207 > \rho_{min} = 0.8 \times \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0.8 \times \frac{0.35 \times \sqrt{17}/1.5}{365} = 0.0026 \quad (3.3)$$

Kolonlarda 4ϕ10 nervürlü boyuna donatı kullanılmıştır. 100x150 mm kesit boyutlarına sahip betonarme kolonlarda donatı oranı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

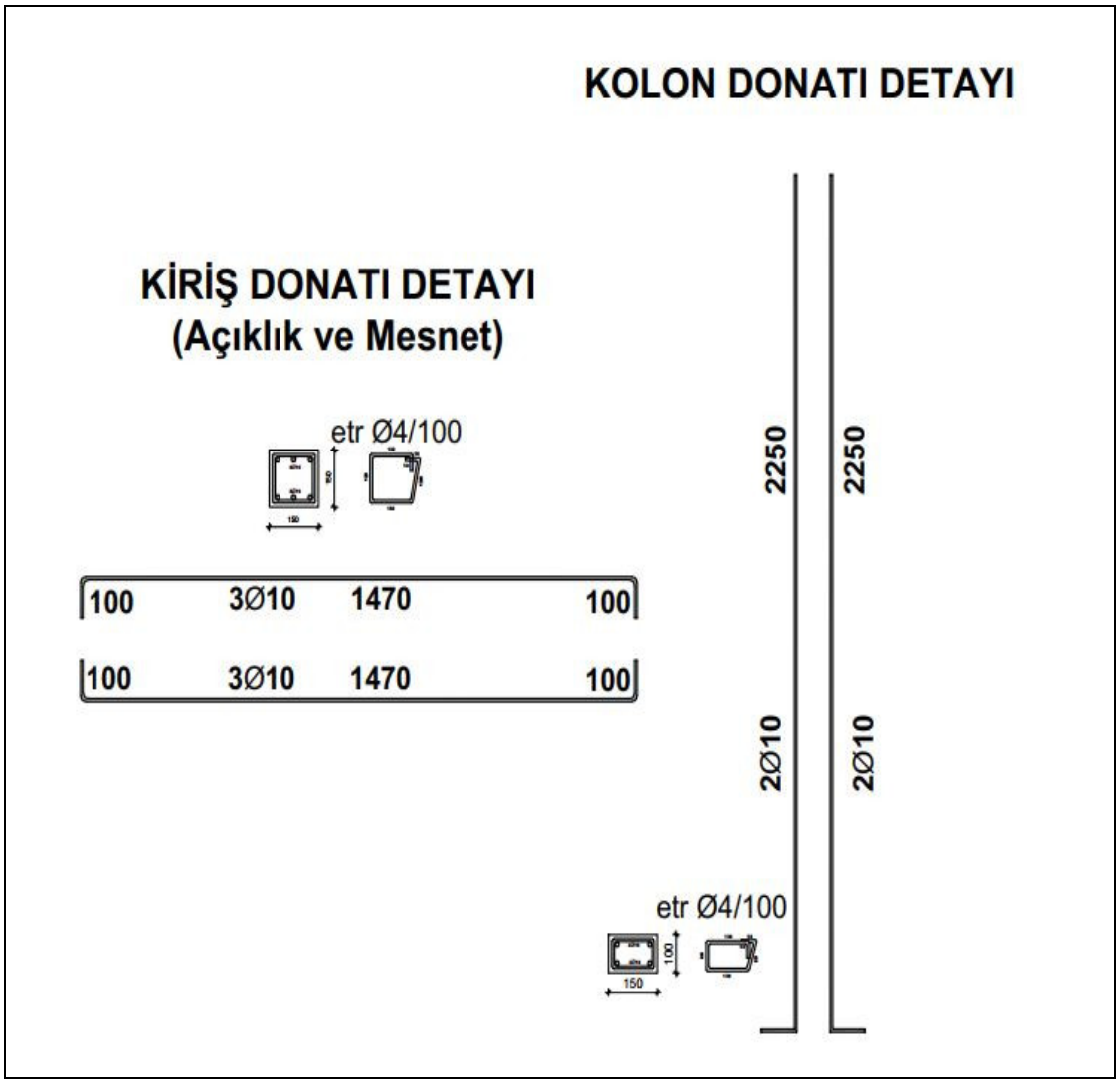
$$\rho = \frac{A_s}{b_w \times h_c} = \frac{4 \times 78.5}{150 \times 100} = 0.02093 \geq \rho min = 0.01 \quad (3.4)$$

Hesapta görüleceği üzere kullanılan kolon donatısı oranı yönetmelikte belirlenen minimum koşuldan fazladır. Kirişlerde alt ve üst donatılar kolon dış yüzüne kadar devam ettirilmiştir. Donatı uçları kolon yüzünden itibaren 15ϕ (150 mm) uzunluğunda aşağı ve yukarı doğru uzatılmıştır. Kolon ve kirişlerde ϕ 4/100 mm aralıklarla etriye bulunmaktadır. TS500'de etriye minimum şartlarında etriye çapı minimum 8 mm, etriye

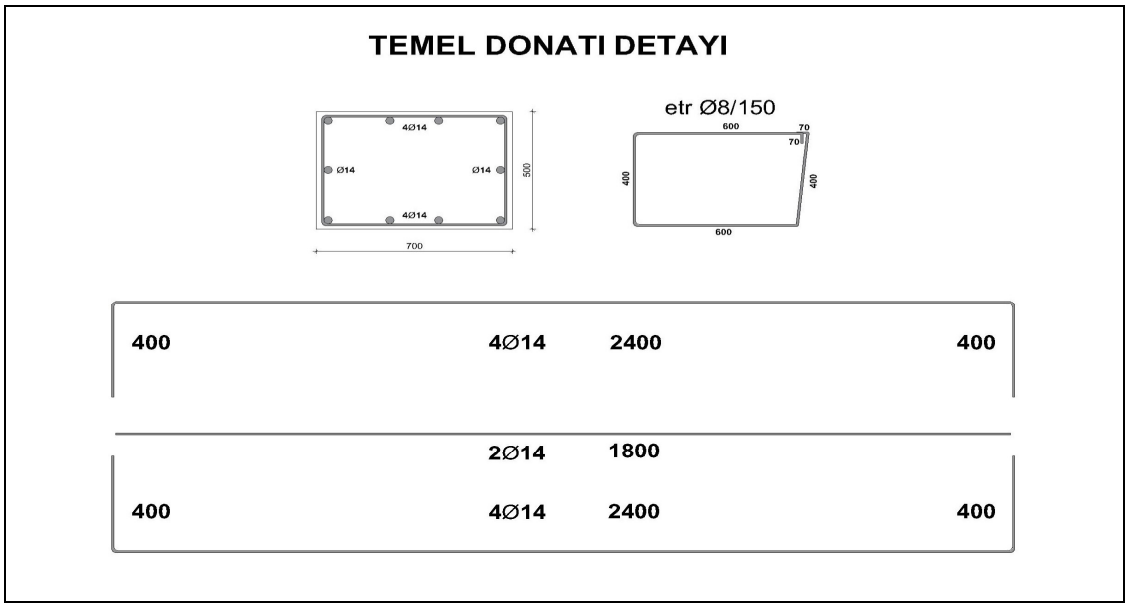
aralığı ise en fazla 12ϕ ya da 200 mm olarak belirlenmiştir. Yönetmelik şartları dikkate alınarak 1/3 ölçekli çerçeve kolon ve kirişlerinde standartlara aykırı donatı koşulları incelendiğinden, kolon ve kirişlerde ϕ 4/100 mm etriye kullanılması uygun görülmüştür. Temeller ise 10 ϕ14 boyuna donatı ve ϕ8/150 mm tek etriye ile donatılandırılmıştır. Şekil 3.60'da betonarme çerçevelerin donatı şeması gösterilmiştir. Şekil 3.61'de kiriş ve kolon donatı detayları, gösterilmiştir. Şekil 3.62'de ise temel donatı detayları gösterilmiştir.



Şekil 3.60. Deney elemanlarının boyutları ve donatı şeması (Ölçüler mm cinsindendir)



Şekil 3.61. Çerçevelere ait kiriş ve kolon donatı detayları (Ölçüler mm cinsindendir)



Şekil 3.62. Çerçevelere ait temel donatı detayları (Ölçüler mm cinsindendir)

Ülkemizdeki yapı stoğunda bulunan yapılardaki mevcut kusurları yansıtması için, betonarme çerçevelerdeki kolon ve kiriş birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırması yapılmamış ve kolon etriyesi devam ettirilmemiştir. Kolon ve kirişlerde düz yüzeyli etriye kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerde etriye kancaları 90° olarak yapılmıştır. Şekil 3.63 ve Şekil 3.64'de betonarme çerçeve numunenin kolon, kiriş ve temel donatı detayları verilmiştir. Şekil 3.65'de ise çerçeve kalıbının yapılması, kalıba donatı yerleşimi ve beton dökümü gibi çerçeve üretiminden resimlere yer verilmiştir.

Şekil 3.63. Kolon ve kiriş donatıları

Şekil 3.64. Temel donatıları

Şekil 3.65. Betonarme çerçeve üretiminden kesitler

3.9.4. Betonarme Çerçeve Numunelerin Malzeme Özellikleri

Bu başlık altında betonarme çerçeve deney numunelerinin üretilmesinde kullanılan beton ve donatı çeliği malzemelerinin mekanik özelliklerinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

3.9.4.1. Beton

Betonarme çerçeve numunelerin üretiminde kullanılan betonlar hazır beton firmalarından temin edilmiştir. Betonarme çerçeve numuneler, tez çalışmasının konusunda da bahsi geçtiği gibi Türkiye'deki yapı stoğunda mevcut diğer bazı kusur ve eksikleri bünyesinde bulundurmasıyla birlikte, dayanımı düşük bir beton ile laboratuvar ortamında üretilmiştir. Üretilen betonarme çerçevelerde beton dayanımının 16-18 MPa olması hedeflenmiştir. Laboratuvarda yeterli alan bulunmadığından 7 adet betonarme

çerçevenin aynı anda üretilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle 4 adet ve 3 adet olmak üzere 2 grup olarak farklı zamanlarda betonarme çerçeve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Betonarme çerçeve numunelerde, normal yapılardaki kolon ve kiriş elemanlarında gerçekleştirilen düşey beton dökümünden farklı olarak yatay kalıplarda beton dökümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.68). Beton basınç dayanımını doğrulamak için beton dökümleri esnasında 4'er adet 150x150x150 mm küp numune TS EN 12350 standart kurallarına göre hazırlanarak 28 gün sonunda basınç testleri yapılmıştır. Elde edilen basınç dayanımlarının hedeflenen aralıkta olduğu doğrulanmıştır. Beton numunelere ait basınç dayanımları ve ortalama dayanım değerleri Çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Beton numunelere ait basınç dayanımları ve ortalama dayanım değerleri

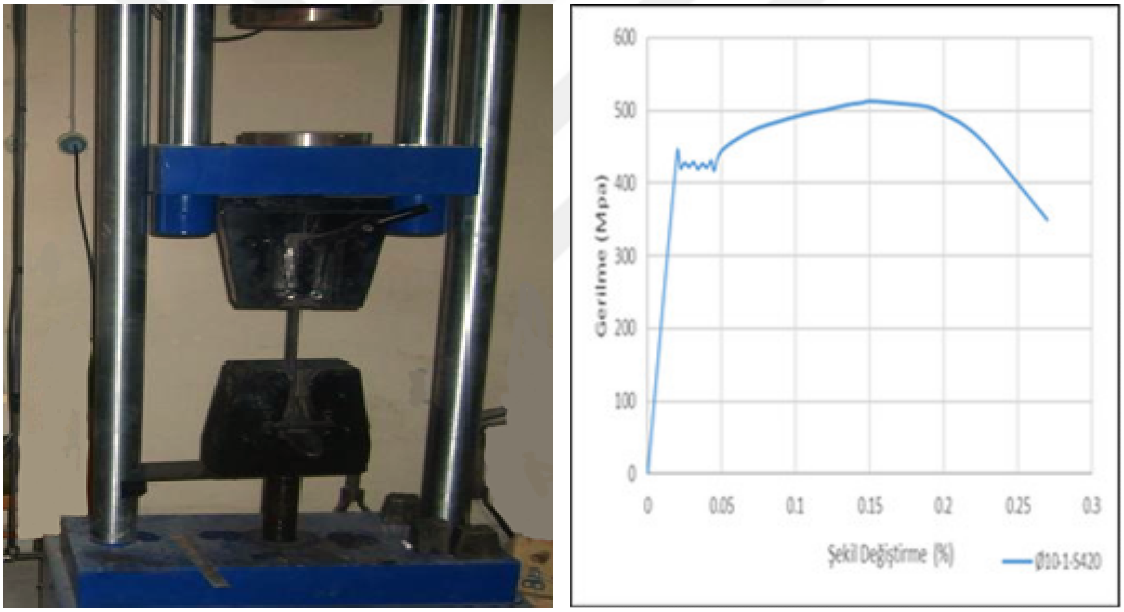
Numune Grubu	**f_{ck} (28 Gün) (MPa)**				**f_{ck} Ortalama (28Gün)(MPa)**
1. Grup (Referans, Tip 1 Kurşun, Tip 1 Karbonfiber, Tip 1 Pirinç)	**1. küp**	**2. küp**	**3. küp**	**4. küp**	17.81
	16.67	18.22	17.08	19.27	
2. Grup (Tip 2 Kurşun, Tip 2 Karbonfiber, Tip 2 Pirinç)	18.94	16.48	17.95	19.76	18.28

3.9.4.2. Donatı Çeliği

Türkiye'de özellikle 2000 yılı öncesinde inşa edilen yapılarda düz yüzeyli (nervürsüz), düşük karbon içerikli dolayısıyla dayanımı düşük donatı çeliği ve standartlara uygun olmayan beton yaygın olarak kullanılmıştır (Doğangün, 2004), (Arslan ve Korkmaz, 2007). Eski binalarda özellikle S220 türü donatı çeliği kullanımı sık görülmektedir. TS500 (2000) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları yönetmeliğinde kullanılabilecek donatı TS708 (2016) Çelik - Betonarme için - Donatı Çeliği standardına bağlanmıştır. TS708 (1996) versiyonunda S220 türü ana donatı çeliği olarak kullanılabiliyorken, 2010 ve 2016 yıllarında yapılan güncellemeler ile ana donatı olarak kullanılabilecek en düşük tür S420, sınıf ise nervürlü (S420, B 420B, B 420C) olarak değiştirilmiştir.

Yapı stoğumuzda mevcut eski yapıları temsil etmesi amacıyla S220 türü düz yüzeyli donatı çeliğinin ana donatı olarak kullanılması düşünülmüşse de, ülkemizdeki

yapı çeliği piyasasında artık bu tür donatı çeliği bulunmadığından temin edilememiştir. Betonarme çerçeve numunelerde nervürlü S420 donatı çeliği ana donatı olarak kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerde kullanılan etriyeler ise Ø4 mm çaplı S220 türü donatı temin edilemediğinden, en yakın özelliklerdeki S235 türü, düz yüzeyli, transmisyon çeliğinden üretilmiştir. Temelde kullanılan ana donatı ve etriyeler yine S420 türü nervürlü donatıdan üretilmiştir. Donatıların gerilme-şekil değiştirme davranışından akma ve çekme dayanımlarının elde edilmesi için donatı çubuklarından 3'er adet 40 cm uzunluğunda parçalar kesilmiştir. Hazırlanan donatı numunelerinin Konya Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan 800 kN kapasiteli çelik çekme cihazında çekme testleri yapılmıştır (Şekil 3.66). Betonarme çerçeve numunelerde kullanılan tüm donatı türlerinin çelik çekme testi sonucunda elde edilen karakteristik akma dayanımları ve çekme dayanımlarının uygun nitelikte olduğu görülmüştür. Test edilen donatılara ait mekanik özellikler Çizelge 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.66. a) Kullanılan donatı çekme cihazı b) Elde edilen çelik gerilme - şekil değiştirme grafiği örneği

Çizelge 3.5. Test edilen donatılara ait mekanik özellikleri

Donatı Çapı (mm)	Akma Dayanımı f_{yk} (MPa)		Çekme Dayanımı f_{su} (MPa)		Türü, Sınıfı, Kullanıldığı Yer
	Deney	Ortalama	Deney	Ortalama	
Ø4	251	263	348	354	S235, Transmisyon, Düz Yüzeyli, kolon ve kiriş etriyesi
	262		354		
	275		360		
Ø8	405	417	503	504	S420, Nervürlü, Temel etriyesi
	419		494		
	426		516		
Ø10	444	432	513	517	S420, Nervürlü, kolon ve kiriş ana donatısı
	417		506		
	435		532		
Ø14	433	424	516	513	S420, Nervürlü, temel ana donatısı
	427		524		
	413		498		

Bütün deneyler boyunca çevrimlerin sonlandırıldığı yük ve deplasman değerlerinde çerçevede inceleme yapılmış, oluşan çatlak ve hasarlar tespit edilerek deney raporu tutulmuştur. Tespit edilen çatlak ve hasar raporları tablo haline getirilmiştir. Tablolarda her çevrim için detaylı açıklamalar yapılmış, çevrim sırasında oluşan çatlak ve hasarlar genişlik, uzunluk ve dallanma değişikliklerine göre belirlenmiştir. Devamında ise oluşma sırası dikkate alınarak çerçeve elemanlarında görülen çatlak ve hasarların fotoğrafları eklenmiştir. Betonarme çerçeve deney numuneleri 1. kata 1 birim, 2. kata ise 2 birim yük gelecek şekilde yüklenmiştir. Yük ölçümü 1 adet CAS marka yassı tip loadcell (yük hücresi) vasıtasıyla yapılmıştır. Taban kesme kuvvetine eşit olan toplam yük ölçülmüştür. Çalışmada yürütülen 7 betonarme çerçeve deneyinde de aynı yük prosedürü ve ekipman kullanılmıştır.

Deney süresince,

1. İlk çevrimlerde betonarme çerçevelerin elastik sınır içinde kaldığı ve Hooke Kanununa göre davrandığı kabul edilmiştir. (Göreli öteleme < %1)
2. Tüm deneylerde ilk çevrimlerin yükleme protokolü kuvvet kontrollü yükleme olarak belirlenmiştir. Akmanın gerçekleştiği birkaç çevrimden

sonra yükleme protokolüne deplasman kontrollü yükleme olarak devam edilmiştir. (Göreli Öteleme > % 1)

3. Deplasman kontrollü yüklemede deplasman adımları, histerezis eğrisinde yeterli davranış gözlemi sağlanacak şekilde, genellikle de 5 mm deplasman artışları ile ilerlemiştir.
4. Sönümleyici cihazların etkili çalışma aralığı, yapıların elastik sınırlar içerisinde kaldığı deplasmanlara karşılık gelmesine rağmen, elastik sınır ötesinde yapı göçmeye doğru giderken enerji tüketimini, ankraj bağlantılarının durumunu, plastik mafsal oluşumları ve diğer hasarlar gibi kolon ve kiriş davranışlarındaki değişimleri incelemek üzere göçme sınırı kabul edilen % 4 lük göreli ötelemeye kadar yüklemeye devam edilmiştir.

Yürütülen çerçeve deneylerinden elde edilen verileri değerlendirebilmek için aşağıdaki grafikler çizilmiştir:

1. Kuvvet Kontrollü Yük geçmişi
2. Deplasman Kontrollü Yük geçmişi
3. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı grafiği (Histerezis Eğrisi)
4. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı omurga grafiği (Zarf Eğrisi)
5. Sistem rijitlik değişimi grafiği
6. Sistem süneklik değerlendirme grafiği
7. Kümülatif toplam tüketilen enerji - 2. kat ötelenme oranı grafiği

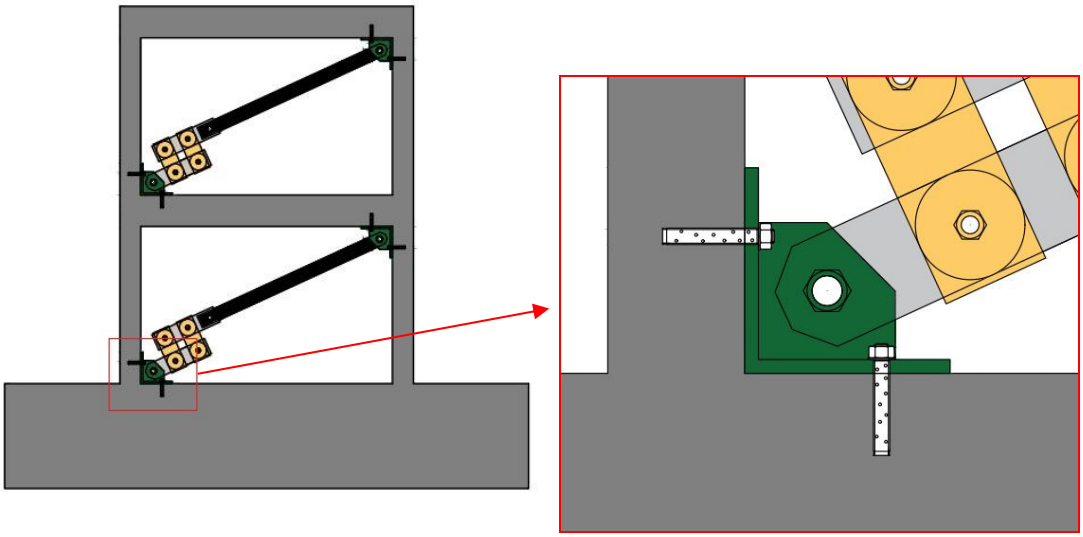
3.9.5. Çelik Braketler ve L Ankraj Köşebentleri

Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerin betonarme çerçeve numunelerde kullanılabilmesi için bazı yardımcı elemanlara ihtiyaç vardır. Bu yardımcı elemanlar diyagonal ve chevron çelik braketler ile bunların betonarme çerçeve numunelere bağlantısını sağlayan L ankraj köşebentleridir. Braketlerin üretileceği çelik profillerin basma ve çekme kuvvetleri altında yeterli dayanımı sağlayabilen bir kesite sahip olması gerekmektedir. Ayrıca çelik braketlerde basma kuvvetleri altında burkulma gibi stabilite problemleri oluşmaması için sınır koşullar göz önünde bulundurularak kesit seçimi yapılmalıdır. Çalışmadaki sönümleyicilerin her iki tipinde de 40x60x4 mm kutu profil St37 yapı çeliğinden braketler imal edilmiştir. L ankraj köşebent ve sönümleyicilere bağlanan kısımlarda bağlantıyı sağlamak için 60x10 mm boyutlu lama yapı çeliğinden bağlantı detayları üretilerek profil uçlarına kaynaklanmıştır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerde kullanılan braket, her katta tek parça halinde uç detayları ile beraber 980 mm uzunluğunda diyagonal yerleşimli çelik bir elemandır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerde

braket profili ile sönümleyici dönmeyen, cıvatalı bir bağlantı ile birleştirilerek, kattaki ankraj köşebentleri arasında çalışan yekpare bir sönümleyici eleman gibi davranması sağlanmıştır. Ankraj köşebentlerine bağlantı, mafsal (dönebilen) şeklinde hareketi sağlayabilen tek bir M20 bulon ile yapılmıştır. Sönümleyici + braket elemanının basma etkileri altında düzlem dışı deformasyonuna engel olmak için ankraj köşebentlerindeki bağlantılar yuvalı şekilde imal edilmiştir. Çelik braketler elemanların ve L ankraj köşebentinin görüntüleri Şekil 3.67'de sunulmuştur.

Şekil 3.67. a) Çelik braket elemanlar b) L ankraj köşebenti

Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde kullanılan braketler her katta 2 parça olmak üzere uç detayları ile beraber 700 mm uzunluğunda, chevron (ters V) yerleşimli çelik elemanlardır. Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde de braketler sönümleyicilere dönmesi engellenmiş cıvatalı bir bağlantı vasıtasıyla bağlanmıştır.



Şekil 3.68. Tip 1 sönümleyicili çerçevede L köşebentinin çelik gömlekli dübel cıvatayla ankrajı

L köşebentlerin ve ve Tip 2 sönümleyicinin temel, kolon ve kiriş gibi betonarme kesitli elemanlara ankrajı için her L köşebentte 4 adet, her Tip 2 sönümleyici için 6 adet

olmak üzere 80 mm uzunlukta M10 çelik gömlekli dübeller kullanılmıştır (Şekil 3.68). Dübellerin bir kısmı (özellikle kolon kesitlerindeki) beton kesitlerin küçük olmasından dolayı beton dökümünden önce kalıp üzerine yerleştirilmiştir. Böylece betonarme elemanlarda deney öncesi muhtemel çatlak oluşumu önlenmiştir. Beton dökümünden sonra ankrajlanan dübeller için ise, 28 günlük kür süresi beklendikten sonra Ø12 mm beton delici uçla 90 mm derinliğinde delikler açılarak içleri basınçlı hava ile tozdan arındırılmıştır. L köşebentler yerleştirildikten sonra, beton kesitlerdeki deliklere ve dübelli cıvataya yeterli miktarda yüksek dayanımlı ankraj epoksi uygulanmış ve dübelli cıvatalar yerine yerleştirilmiştir. Epoksi kürü tamamlandığında somun ve pullar takılarak L köşebentler sıkıca yerine sabitlenmiştir.

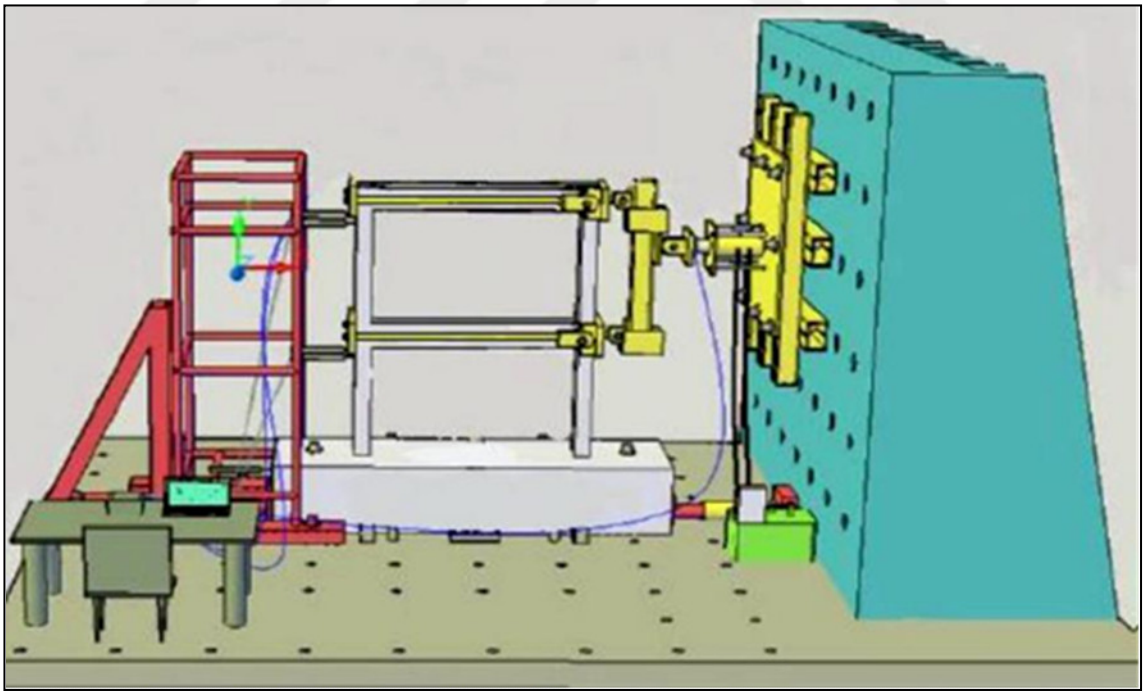
3.10. Betonarme Çerçeve Deney Düzeneği

KTÜN Deprem Laboratuvarındaki yükleme duvarı ve delikli döşeme, betonarme çerçeve, perde duvar, kolon vb. deney numunelerinin statik itme testlerinin yapılabilmesi için özel tasarlanmış yapısal elemanlardır. Yeterli rijitlik elde edilebilmesi için büyük enkesitlere (>50 cm) sahip betonarme yükleme duvarı ve döşeme üzerinde 50 cm aralıklarla 8 cm çaplı, çelik boru çeperli bağlantı delikleri bulunmaktadır (Şekil 3.69).

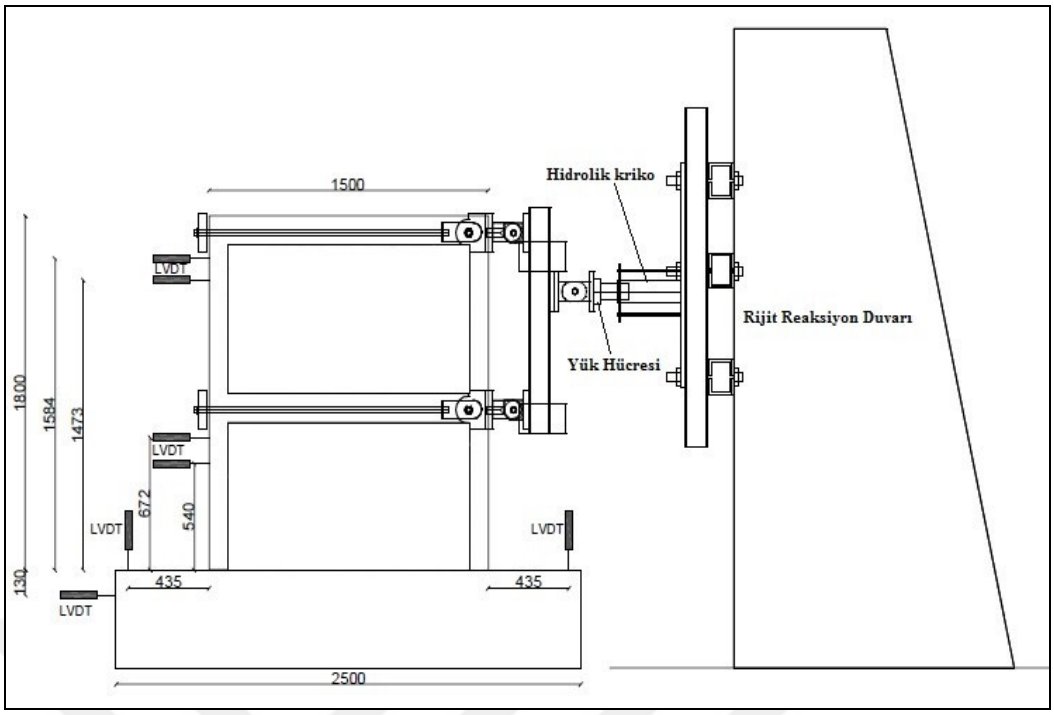
Şekil 3.69. Laboratuvardaki delikli döşeme ve betonarme yükleme duvarı (Akın, 2011)

Şekil 3.70. Laboratuvar yükleme düzeneği bileşenleri (Aksoylu, 2018)

Yük pistonu, yük hücresi ve çelik yük dağıtma profilinden oluşan yatay yükleme düzeneği bağlantı tijleri vasıtasıyla yükleme duvarına monte edilmiştir (Şekil 3.70). Betonarme çerçeve numuneler imal edilirken temellerde döşemedeki bağlantı deliklerine uyacak şekilde tij delikleri bırakılmıştır. Deney sırasında çerçevelerin yatay yük etkisiyle temel alt yüzeyi üzerinde hareket etmemesi için bağlantı delikli laboratuvar döşemesine, çerçevelerin temelinde açılan Ø80 mm çap ve 540 mm uzunlukta 8 adet borunun içinden geçen Ø60 mm çaplı tijler ile sabitlenmiştir. Bu deliklerden geçirilen tijler, döşeme altından ve çerçeve numune temeli üzerinden somun ve pullar ile sıkıştırılmıştır. Ayrıca tersinir-tekrarlanır yük çevrimleri sırasında somun ve pulların gevşemesi söz konusu olabileceğinden ekstra bir önlem olarak çerçeve temelleri 2 adet yatay yerleştirilmiş hidrolik piston ile yükleme doğrultusunda iki taraftan sıkıştırılmıştır. 1/3 geometrik ölçekli referans ve sönümleyicilerle rehabilite edilmiş betonarme çerçeve numuneler, teşkil edilen yükleme sisteminde tersinir-tekrarlanır statik itme testine tabi tutulmuştur. Laboratuvarda bulunan yükleme duvarı ve delikli döşeme sistemi Şekil3.69'da gösterilmiştir.



Şekil 3.71 a. Betonarme çerçeve yükleme düzeneğinin görünümü (Balık, 2012)



Şekil 3.71 b. Betonarme çerçeve yükleme şeması (Ölçüler mm cinsindendir) (Akın, 2011)

Betonarme çerçeve numune 2 katlı olduğundan üçgen yatay yük dağılımı şeklinde deprem yükünü benzeştiren yükleme, üst kata 2 birim ve alt kata 1 birim olacak şekilde paylaştırılmıştır. Yatay yük her iki kat kirişine temaslı düşey bir çelik profil yardımıyla uygulanmaktadır. Yükün çerçeveye bu oranlarla dağıtılabilmesi için çelik profilin yükleme tertibatı tarafında, üst kat kirişine 1/3 kat yüksekliği, alt kirişe ise 2/3 kat yüksekliği mesafesinde konumlandırılan mafsallı bir bağlantı bulunmaktadır. Bu mafsal, rijit reaksiyon duvarına konsol şekilde bağlı yükleme tertibatını oluşturan hidrolik piston ve yük hücresine bağlıdır. Çelik profilin çerçeve numune tarafında ise kat kirişleri seviyesinde bağlantı mafsallı tijler bulunmaktadır. Kat kirişleri bu tijler ve sıkıştırma levhaları ile yükleme tertibatına bağlanmaktadır (Şekil 3.70) (Şekil 3.71 a-b). Bu şekilde hidrolik pistonun çerçeveye uyguladığı 3 birim yük, üst kata 2 birim ve alt kata 1 birim olarak dağıtılmaktadır.

3.10.1. Ölçüm tekniği

Deneylerde yatay yük ölçümleri hidrolik yük pistonu ile çelik yükleme profili arasına yerleştirilen yassı tip loadcell (yük hücresi) ile, yer değiştirmeler ise farklı boyutlarda potansiyometrik cetveller vasıtasıyla ölçülmüştür. Bu cihazlardan elde edilen veriler anlık olarak bilgisayara bağlı 2 adet 8 kanallı TDG marka TESTBOX1001 statik veri toplama kutusu ile kaydedilmiştir.

Deney çerçevelerine hidrolik yük pistonu ile itme ve çekme olarak uygulanan yatay yük, 1,3 kg hassasiyetli, 50 ton kapasiteli yassı tip CAS marka yük hücresi yardımıyla okunmuştur. Yük hücreleri genellikle-/+5 volt ya da -/+10 volt besleme gerilimleriyle çalışırlar. Yük hücreleri farklı şekillerde (genellikle S şekilli veya kum saati şeklinde) metal parçalardan oluşan, ağırlık veya yük ölçümü için kullanılan özel cihazlardır. Metal parçalar üzerinde Wheatstone köprüsü şeklinde düzenlenerek yapıştırılmış gerinim pulları (strain gauge) bulunmaktadır. Yük hücresine basınç ya da çekme yükü uygulandığında içerisindeki metal parçanın elastik şekil değişimine bağlı olarak üzerinde bulunan gerinim pullarında milivolt (mV) ölçeğinde elektriksel gerilim farkı oluşur. Bu gerilim farkı, elektrik hatları, güç kaynakları veya diğer manyetik alanlardan dolayı meydana gelen gürültülerin ölçüm sonuçlarına etki etmemesi için özel korunumlu iletim kabloları ile veri toplama kutusuna iletilir. Veri toplama kutusu milivolt ölçeğindeki elektriksel gerilim farkını belli bir katsayı ile büyüterek daha belirgin hale getirdikten sonra saniyede 8 veri şeklinde kaydetmektedir. Veri toplama kutusu anlık veri takibi, kontrol ve veri kaydı için özel bir yazılımın kurulu olduğu bir bilgisayara bağlıdır. TESTLAB Basic yazılımı, veri toplama kutusuna bağlanan her ölçüm cihazı için özelliklerine göre ayrı ayrı oluşturulmuş kalibrasyon verileri yardımıyla elektriksel gerilim farklarını anlamlı yük ve mesafe verilerine dönüştürmektedir. Deney yapılırken veri toplama kutusunda depolanan veriler TESTLAB Basic yazılımı yardımıyla belli aralıklarla bilgisayara aktarılmaktadır. TESTLAB Basic yazılımı vasıtasıyla yük hücresinden elde edilen yük değerleri grafik şeklinde bilgisayar ekranından da anında takip edilebilmektedir. (TDG, 2009)

Deney çerçevelerindeki ötelenmeler, OPKON marka potansiyometrik cetvel olarak adlandırılan elektronik cihazlar ile ölçülmüştür. Potansiyometrik cetvel, kutu bir profil içerisine yerleştirilmiş ve üzerinde gezinen rod ucunun konumuna göre değişken direnç değerleri veren bir rayda hareket edebilen bir metal roddan oluşmaktadır. Metal rod itilip çekildiğinde, potansiyometrik cetvel içerisindeki metal rod ucunun ray üzerinde hareketi sonucu belirli bir gerilim üretilmektedir. Genellikle -/+10 volt besleme gerilimiyle çalışan potansiyometrik cetvellerde de hareketle birlikte milivolt (mV) ölçeğinde elektriksel gerilim değişimleri meydana gelmektedir. Yük hücrelerinde de olduğu gibi potansiyometrik cetvellerden elde edilen elektriksel gerilim verileri özel korunumlu kablolarla veri toplama kutusuna ve bilgisayara aktarılmaktadır(TDG, 2009). Potansiyometrik cetvellerden elde edilen elektriksel verilerin anlamlı uzunluk verilerine dönüşümü için her cihaza ait kalibrasyon verisinden yararlanılmaktadır. Kullanılan

potansiyometrik cetveller uygun katsayılarla büyütüldüğünde 1/1000 mm hassasiyetli uzunluk ölçümü mümkün olabilmektedir. Deneylerde 200, 300, 400, 500 mm uzunluklarda potansiyometrik cetveller muhtelif yerlerde deplasman ölçümü için kullanılmıştır.

3.10.2. Betonarme Çerçeve Numune Deneylerinde İzlenen Yükleme Protokolü

Literatürde betonarme yapı bileşenlerinin statik itme deneyleri için birçok yükleme protokolü önerilmiştir. Betonarme çerçeve deneylerinde izlenen yükleme protokolü, yüklemeyi sağlayan hidrolik yükleme pistonunun kapasitesine ve deneyi yapılacak çerçeve numunenin özelliklerine göre belirlenmektedir. Deneylerde izlenecek yükleme protokolü, deney çerçevesinde plastik mafsalların oluşumunu, plastik mafsal seviye değişimlerini, oluşacak rijitlik kaybını ve zarf eğrisindeki eğimin değişimini yeterli hassasiyette gösterebilmelidir.

Yükleme protokolü belirlenirken FEMA461 (2007)'deki "Protokol I – Yapısal ve Yapısal Olmayan Bileşenlerin ve Sistemlerin Yarı Statik Döngüsel Testi" ilkeleri dikkate alınmıştır. Bu protokole göre test edilebilecek yapısal bileşenlerin örnekleri arasında perde duvarlar, kiriş-kolon düzenekleri ve çerçeve düzenekleri yer almaktadır. Bu protokolün, birçok yapısal ve yapısal olmayan bileşenin yapısal analiz ve değerlendirmelerinde kuvvet-deformasyon özelliklerini ve histeretik verilerini elde etmek için kullanılabileceği belirtilmiştir.

FEMA461 (2007)'ye göre, deformasyon kontrol parametresi, bir yer değiştirme veya başka bir uygun deformasyon miktarına (örneğin belirli bir dönme miktarına karşılık gelen) göre belirlenebilir. Bununla birlikte, bu parametre bir bina yapısının geleneksel yapısal analizi ile tahmin edilebilen, örneğin göreli kat ötelenmesi gibi bir bina deformasyon parametresi ile ilişkilendirilebilmesi önemlidir. Deformasyon kontrollü testlerde deformasyon artışı, aşağıdaki hususları sağlayacak kadar küçük olmalıdır:

• dinamik etkiler ihmal edilebilir düzeyde olmalı,

• çeşitli hasar durumlarının başladığı deformasyon parametresinin değeri açıkça tanımlanabilir olmalı,

• pekleşmeye bağlı termal etkilerin önemli olmadığı,

• yükleme için gereken güç gereksinimleri karşılanabilmelidir.

FEMA461 (2007)'e göre, deformasyon kontrollü testlerde deformasyon artışı, aşağıdaki hususları sağlayacak kadar büyük olmalıdır:

• testin süresi aşırı uzun olmamalı,

• malzeme sünmesi önemli bir etki olmamalı,

• önemli hasarın başlangıcında numunenin yaşadığı döngü sayısı, güçlü deprem hareketine maruz kalan gerçek yapının deneyimlediği büyüklük sırasına göre aynı olmalıdır. Binalardaki gerçek bileşenler tarafından yaşanması muhtemel olmayan düşük döngülü yorulma davranışının ortaya çıkmasını önlemek için özel dikkat gösterilmelidir.

FEMA461 (2007)'e göre, yük kontrollü testteki yük miktarı, numunenin yapısal analizi ile tahmin edilebilecek bir talep miktarı ile iyi bir şekilde ilişkili olan, ölçülebilir ve kontrol edilebilir bir miktar olmalıdır. FEMA461 (2007)'e göre, yük kontrollü testte dikkat edilecek hususlar şunları içerir:

• kuvvet kontrolünün geri bildirimi sağlanabilmeli,

• yükü uygulayacak aktüatördeki basınç dalgalanmaları veya yükün tersine çevrilmesi sırasında aktüatörün mekanik ataletinden dolayı ortaya çıkan kuvvet dalgalanmaları,

• uygun valf, hidrolik sıvı kontrol valfleri ve servovalfler kullanılarak yükleme yönünün ve hızının doğru kontrolü,

• kontrolcü (bilgisayar) tipi, donanım veya yazılım, geri bildirim güncelleme hızı ve kayıt örnekleme hızı gibi hususlar dikkate alınmalıdır.

Yük kontrollü testteki yük artışı, aşağıdaki hususları sağlayacak kadar küçük olmalıdır:

• dinamik etkiler önemsiz olmalı,

• numunedeki çeşitli hasar durumlarını başlatan kuvvet açıkça tanımlanabilir olmalı,

• pekleşmeye bağlı termal etkilerin önemli olmadığı,

• yükleme için gereken güç gereksinimleri karşılanabilmelidir.

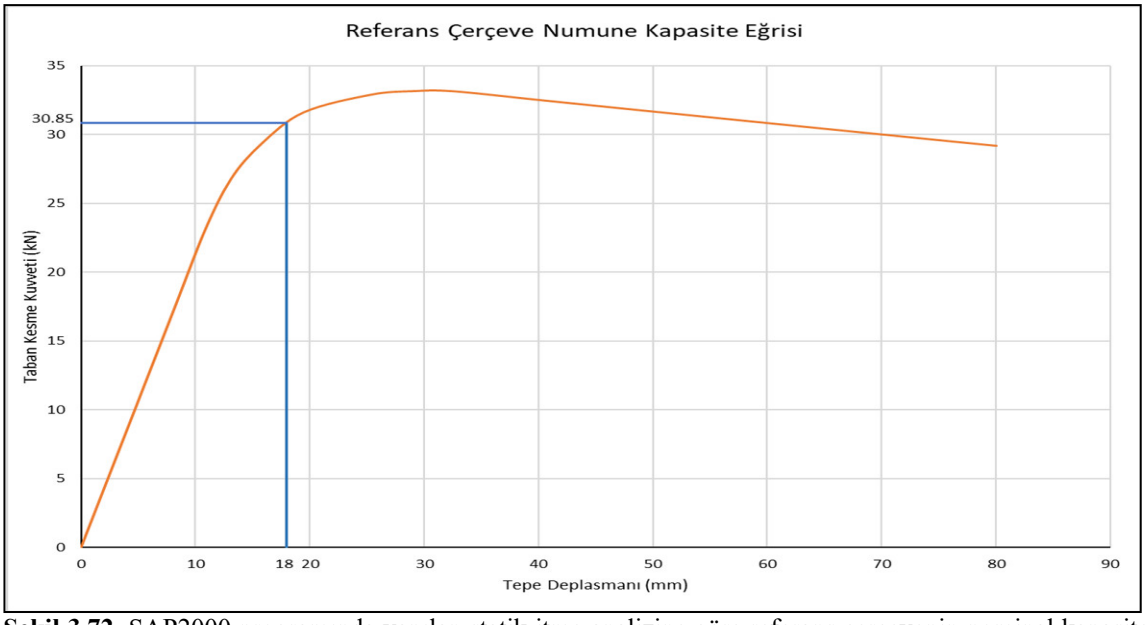
Yük kontrollü testteki yük artışı, aşağıdaki hususları sağlayacak kadar büyük olmalıdır:

• testin süresi aşırı uzun olmamalı,

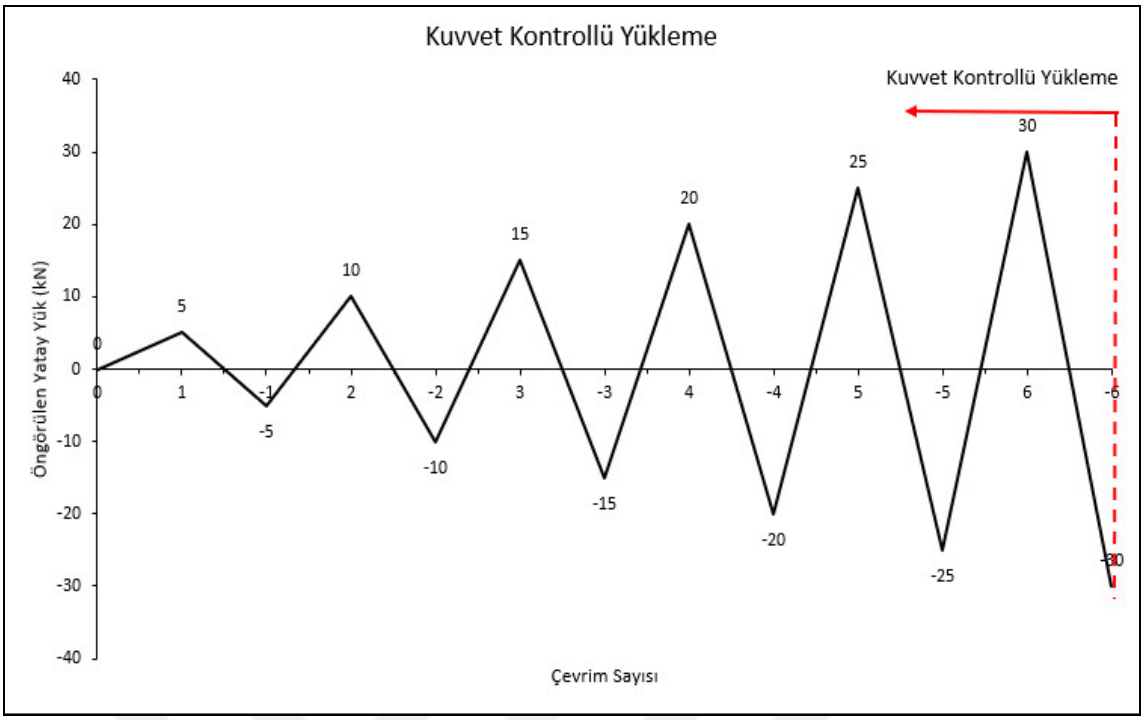
• malzeme sünmesi önemli bir etki olmamalıdır.

SAP2000 programında yapılan statik itme analizlerine göre referans çerçevenin kapasite (yük-tepe deplasmanı) eğrisi belirlenmiştir. Betonarme çerçeve deneylerinde uygulanacak yükleme protokolüne göre, sistemin nominal akma yüküne kadar yük kontrollü olarak, akmadan sonra ise deplasman kontrollü olarak yükleme yapılması planlanmıştır. Yükleme programı her bir deneyde benzer olmasına rağmen akmanın oluştuğu çevrim sayısı, deplasman ve yük nicelikleri farklı olduğundan ayrı ayrı düzenlenmiştir. Her bir numunenin akma yükü ve maksimum yatay yük taşıma kapasitesine bağlı olarak elde edilen yükleme programı, çerçevelerin yük-deplasman eğrilerinin tahmini ile oluşturulmuştur. Çerçevelerin yük-deplasman eğrileri, SAP2000 programında modellenen çerçevelere statik itme analizi yardımıyla elde edilmiştir (Şekil 3.72). Dolayısıyla her deney için akma noktasından önce ve sonra olmak üzere iki adet grafik hazırlanmıştır (Şekil 3.73 ve Şekil 3.74).

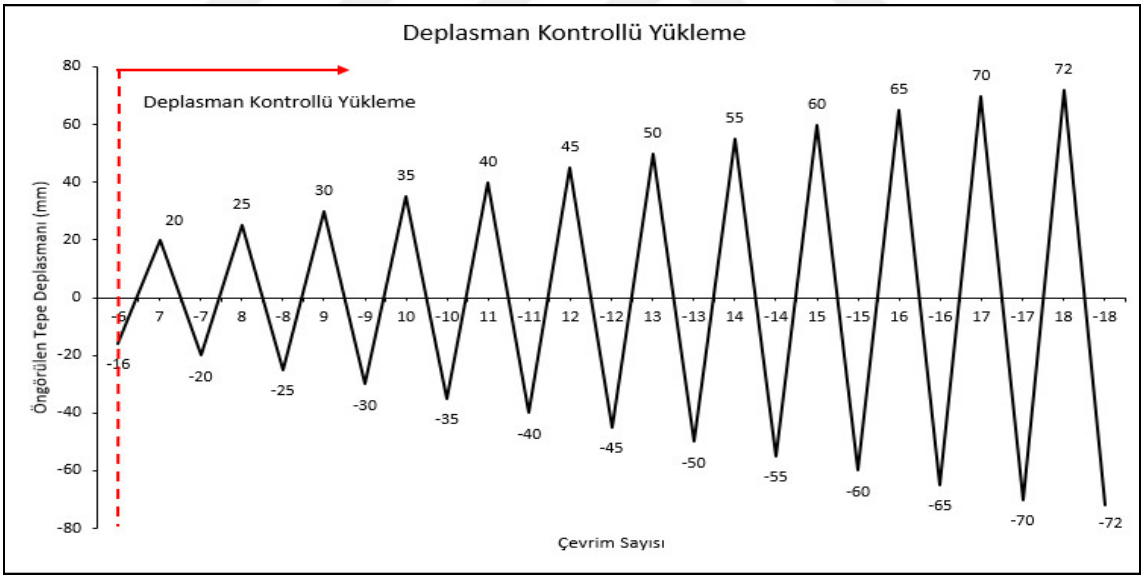
Sönümleyicili betonarme çerçevelerde akma noktası test sırasından belirlenebildiğinden, akma noktasına kadar yük kontrollü olarak 500 kg (5 kN) artışlarla deneyler sürdürülmüştür. Akma gerçekleştikten sonra en yakın 5 mm'nin katı olan deplasmanda adım sonlandırılarak bir sonraki çevrim adımında ±5 mm deplasman artışlarıyla %4 tepe ötelenme oranına karşılık gelen 72 mm tepe deplasmana kadar aynı prosedür devam ettirilmektedir. Deneylerde takip edilen yatay yükleme ve tepe deplasman geçmişi grafikler halinde deney sonuçlarında verilmiştir.



Şekil 3.72. SAP2000 programında yapılan statik itme analizine göre referans çerçevenin nominal kapasite eğrisi



Şekil 3.73. Referans numune (RN) kuvvet kontrollü yükleme programı



Şekil 3.74. Referans numune (RN) deplasman kontrollü yükleme programı

3.10.3. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Yürütülen çerçeve deneyleri sırasında potansiyometrik cetvellerden (PC) ve yük hücresinden alınan uzunluk ve yük verilerine göre çerçevelerde meydana gelen davranış değişiklikleri niceliksel olarak ortaya konmuştur. Deneyleri yapılan çerçeve numunelerin 1. kat ve tüm çerçeve için yatay yük – deplasman eğrisi, zarf eğrisi, yük ve deplasman

geçmişleri, rijitlik değişim grafiği, tüketilen kümülatif enerji grafiği çizilmiştir. Deney çerçevelerindeki sönümleyicilerin hareket miktarlarını ölçebilmek için sönümleyiciler üzerine takılan potansiyometrik cetvellerden elde edilen deplasman verileri ile sönümleyici deplasman grafikleri çizilmiştir. Böylece deney boyunca sönümleyicilerin etkinlikleri hakkında fikir edinilmiştir.

3.10.4. Yük geçmişi ve deplasman geçmişi grafiklerinin çizilmesi

Deneylerde izlenen yük protokolünde ilk olarak nominal akma yüküne kadar yük kontrollü yükleme, çerçevede akma gerçekleştikten sonra ise 5'er mm artışlarla deplasman kontrollü yükleme yapılmıştır. Deney boyunca her çevrimdeki pozitif ve negatif (itme ve çekme) yükleme adımlarında elde edilen yatay yük ve deplasman verileri eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Bu veriler taranarak çevrim başlangıçları, çevrim içinde mevcut pozitif ve negatif yükleme adımı başlangıçları ile bu çevrim adımlarına karşılık gelen yatay yük ve deplasman değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, apsis ekseninde çevrim sayısı, ordinat ekseninde ise ayrı ayrı yatay yük ve deplasman değerleri olacak şekilde yük geçmişi ve deplasman geçmişi grafikleri her bir deney çerçevesi için çizilmiştir.

3.10.5. Yatay yük-kat deplasmanı (Histerezis) grafiklerinin çizilmesi

Histerezis (yatay yük-deplasman) grafiklerini çizebilmek için, deneylerde yük hücresinden elde edilen yük verileriyle kat seviyelerinde potansiyometrik cetvellerden elde edilen deplasman verileri kullanılmıştır. Deney düzeneği ve deney çerçevesinin tasarımında rijit bir temel bağlantısının sağlanacağı ve çerçeve temeli ile rijit delikli döşeme arayüzünde hareket ve dönme olmayacağı düşünülmüştür. Ayrıca temelin yükleme doğrultusunda hareketini önlemek için yatay hidrolik pistonlarla sıkıştırılarak ek önlem alınmıştır. Buna rağmen, deney sırasında olası bir temel hareketini ölçüp hesaplara dahil edebilmek için temele de yatay ve düşey potansiyometrik cetveller yerleştirilmiştir. Katlardaki net deplasmanlar, ilgili katın ekseni üzerinde okunan deplasman verisinden temeldeki olası deplasmanı ölçen potansiyometrik cetveldeki değer çıkarılarak elde edilmiştir. Şekil …da görülen şematik gösterimde betonarme çerçevedeki,

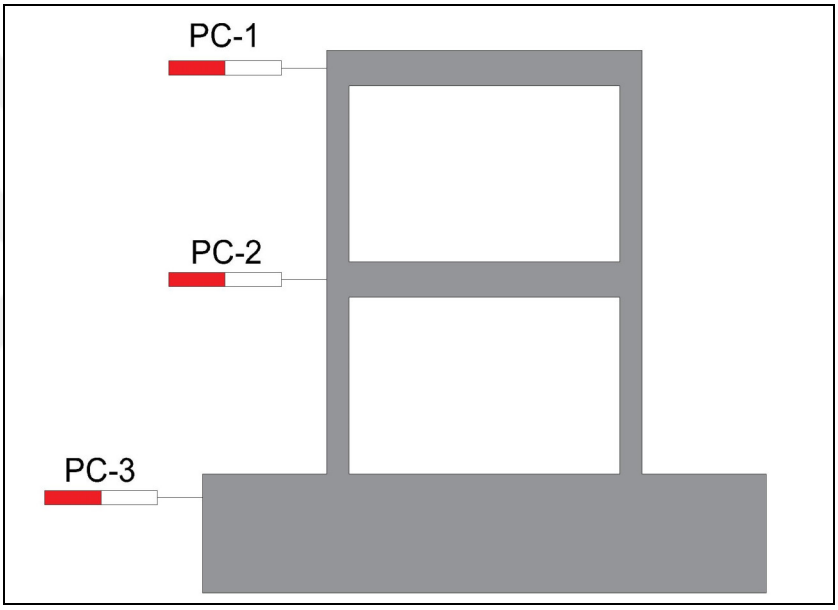
Tepe net deplasmanı;

$$\Delta_{Tnet} = PC1 - PC3 \quad (3.5)$$

1. kat net deplasmanı;

$$\Delta_{1net} = PC2 - PC3 \quad (3.6)$$

şeklinde bulunmuştur (Şekil 3.75). Yatay yükün kat seviyelerine dağılımının üçgen şeklinde olduğu kabul edildiğinden üst kata 2 birim, 1. kata 1 birim yük etkimektedir. Grafik çizimlerinde kullanılan 1. kata ait yatay yük değeri, yük hücresinden elde edilen yük değerinin 1/3 ile çarpılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.75. Net deplasman hesabında dikkate alınan potansiyometrik cetvellerin yerleşimi

3.10.6. Zarf eğrisi grafiklerinin çizilmesi

Zarf eğrisi grafiklerini çizebilmek için, betonarme çerçevenin akma değerine kadar her çevrimde maksimum yük ve bu yükün deplasman değerleri, akma değerinden sonra ise maksimum deplasman ve bu deplasmanın yük değerleri bulunmuştur. Bu noktalar çevrimlerde histerezis eğrilerinin uç noktalarına denk gelmektedir. Pozitif ve negatif çevrim adımlarından elde edilen bu yük ve deplasman değerlerinin tepe noktaları birleştirilerek zarf eğrileri oluşturulmuştur.

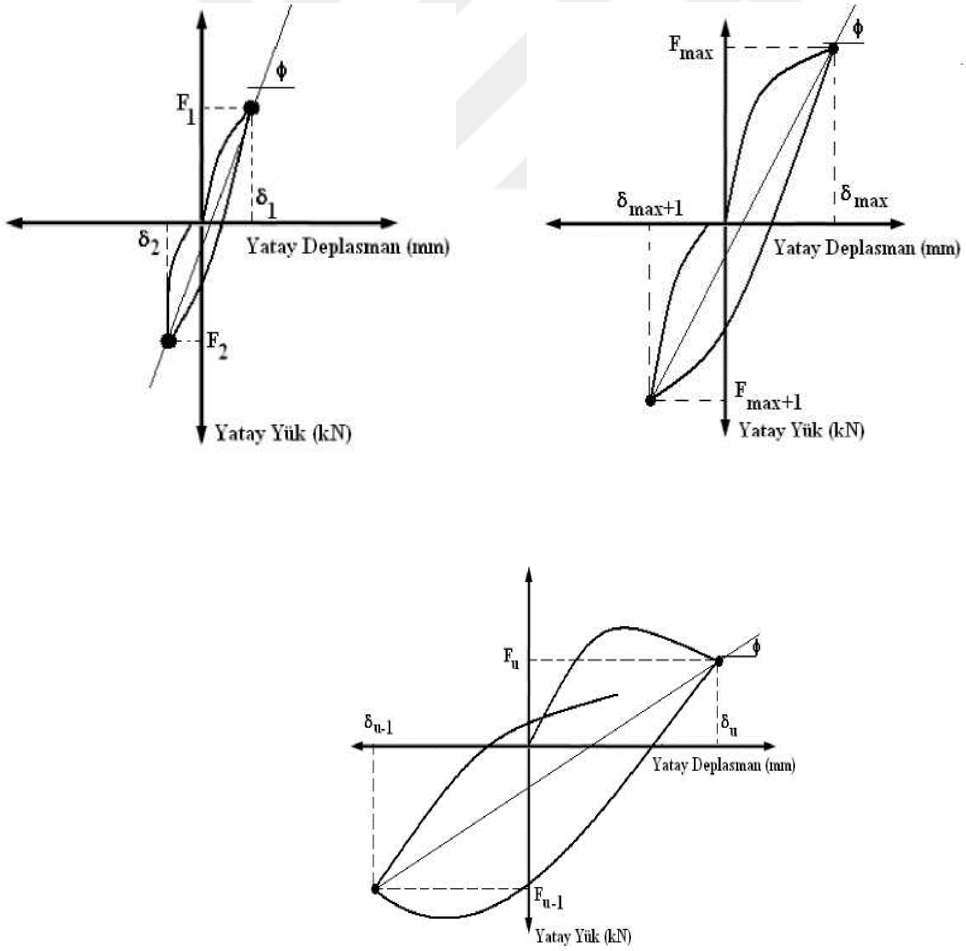
3.10.7. Rijitlik azalımı grafiklerinin çizilmesi

Statik itme deneyleri sırasında, ilerleyen her çevrimle birlikte betonarme deney çerçevelerinde plastik mafsallar meydana gelmektedir. Plastik mafsalların oluşumunda, ilk çevrimlerde önce küçük çatlaklar meydana gelmekte ve sonraki çevrimlerde yeni

çatlaklar oluşurken mevcut çatlaklar da gelişmektedir. Her çevrimde çatlakların ilerlemesi ve artmasıyla çerçeve rijitlikleri azalmaktadır. Betonarme çerçeve numunelerde rijitlik değeri her çevrimdeki yük-deplasman grafiğinin eğimi hesaplanarak bulunmuştur. Her çevrimin histerezis eğrisindeki maksimum ve minimum yük değerleri F_1 ve F_2, bunlara karşılık gelen deplasman değerleri de δ_1 ve δ_2 olarak gösterilirse, ilgili çevrim için rijitlik (ϕ) aşağıdaki Denklem 3.7' deki gibi bulunabilir.

$$Rijitlik\ (\phi)=\frac{(|F_1|+|F_2|)}{(|\delta_1|+|\delta_2|)} \tag{3.7}$$

Deney numunelerinin rijitlik değişimini gözlemleyebilmek için, ilk çevrimde yük-deplasman eğrisinin eğimi "ilk çevrim rijitliği" (Şekil 3.76 a) hesaplanmıştır. Aynı mantık ile, en büyük yükün meydana geldiği çevrimde yük - deplasman eğrisinin eğimi hesaplanarak "maksimum yük çevrim rijitliği" (Şekil 3.76 b) elde edilmiştir. Deney sonundaki çevrimde de yine yük - deplasman eğrisinin eğimi hesaplanarak da "deney sonu çevrim rijitliği" (Şekil 3.76 c) bulunmuştur.



Şekil 3.76. a) İlk çevrim rijitliğinin bulunması b) Maksimum yük çevrim rijitliğinin bulunması c) Deney sonu çevrim rijitliğinin bulunması (Arslan, 2007)

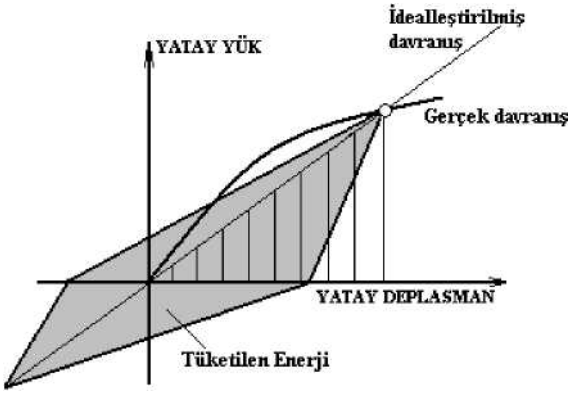
Bulunan rijitlik değerlerinin, kat deplasmanı / kat yükseklik oranı (δ/H) ile değişiminin grafiksel olarak çizdirilmesiyle rijitlik azalımı grafikleri elde edilmiştir.

Rijitlik azalım grafikleri, deney numunelerinin daha iyi karşılaştırılabilmesi amacıyla, sadece deplasmana bağlı olarak değil, (δ/H) oranına bağlı olarak da çizilmiştir.

Literatürde yer alan bazı çalışmalar, sadece ileri çevrimler için rijitlik azalımı grafiklerinin çizilmesini yeterli bulmaktadır. Bazen hasar şekline ve çerçeveye ilave edilen elemanların çalışma prensibine göre pozitif ve negatif yönlerde farklı rijitlik değerleri oluşabilmektedir. Bu nedenle, çalışmada aynı grafikte hem pozitif hem de negatif yöndeki rijitlik azalımları gösterilmiştir.

3.10.8. Tüketilen enerji grafiklerinin çizilmesi

Fizikte enerjinin tanımı "iş yapabilme kapasitesi" olarak ifade edilmektedir. Dolayısıyla yapılan işi hesap edebilmek için enerjideki değişime bakılabilir. Deney çerçevelerinde tüketilen enerjinin yapılan işe eşit olduğu kabulüyle, çerçevedeki deplasman ile ölçülen kuvvetin çarpımıyla enerji tüketimi hesaplanabilmektedir. Çevrimsel yüklemeler altındaki deney çerçeveleri, girdi enerjisinin bir kısmını deformasyon yaparak tüketmektedir. Bu nedenle, her çevrimde deney çerçevelerinden elde edilen yük-deplasman eğrisinin içindeki alan o çevrimdeki tüketilen enerjiye eşittir (Şekil 3.77) (Arslan, 2007).



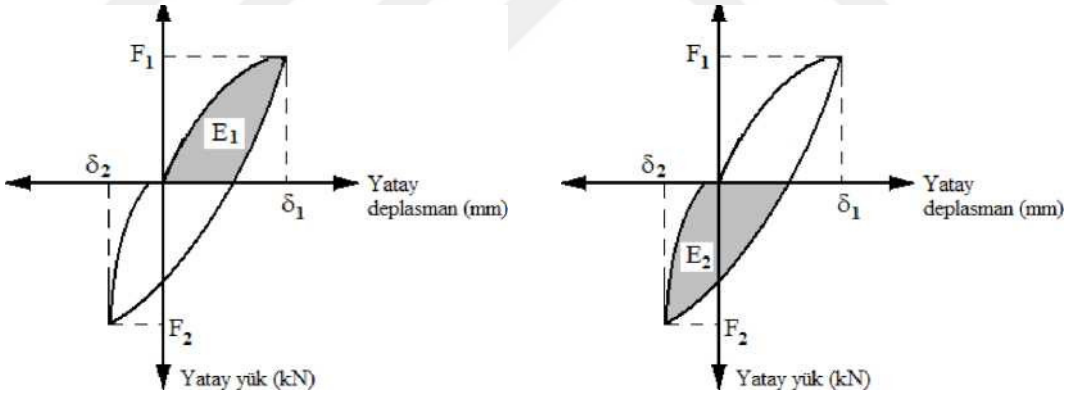
Şekil 3.77. Çevrim enerjisinin bulunması (Arslan, 2007)

Betonarme çerçevelerin kümülatif enerji tüketimi aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

Negatif ve pozitif adımlardan oluşan her bir çevrimde tüketilen enerji, bu adımlar ile çizilen kapalı alanın hesaplanmasıyla bulunmaktadır. Deney boyunca kaç çevrim

yapılmış ise ayrı ayrı tüm çevrimlerin enerjisi hesaplanmalıdır. Bu çevrimlerden hesaplanan tüketilen enerji değerleri toplanarak, deney çerçevesinin kümülatif enerji tüketim miktarı bulunmaktadır. Deneyin başından sonuna kadar sırasıyla tüm çevrimlerin enerji tüketimi toplanarak kümülatif enerji tüketim grafiği çizilmiştir.

Her çevrimde pozitif yükleme adımında E1 olarak ifade edilen yük-deplasman eğrisi altındaki alan hesaplanmıştır. (Şekil 3.78 a) Negatif yükleme adımında da aynı işlem yapılarak yük-deplasman eğrisinin altındaki E2 alanı hesaplanmıştır (Şekil 3.78 b). Bu çevrimde tüketilen enerjinin toplamı, E1 ve E2 değerlerinin toplanmasıyla elde edilmektedir. Her çevrim için yapılan bu hesaptan sonra, çevrimlerde bulunan enerji değerleri (E1+E2) toplanarak, kümülatif tüketilen enerji değeri hesaplanmıştır. Toplam tüketilen enerji değerinin, "tepe deplasmanı / toplam yükseklik" (δ/H) oranı ile değişiminin çizgisel grafik olarak çizilmesiyle her deneye ait kümülatif enerji grafikleri elde edilmiştir. Enerji grafiğinde düşey eksen kN.m, yatay eksen (δ/H) ise boyutsuz olarak verilmiştir (Arslan, 2007).



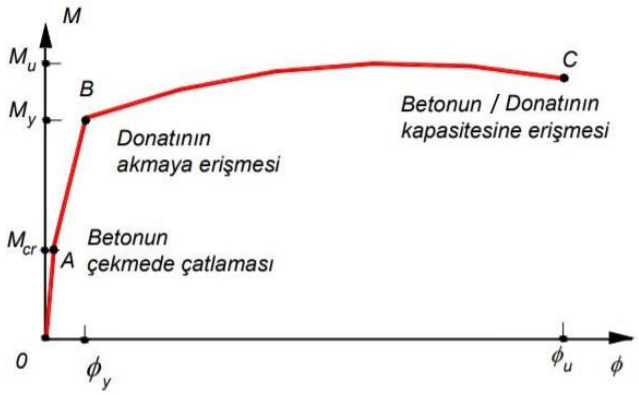
Şekil 3.78. Kümülatif tüketilen enerji değerlerinin hesaplanması (Arslan, 2007)

3.10.9. Numune süneklik grafiğinin çizilmesi

Süneklik, bir yapının, yapısal elemanın ya da malzemenin deprem yükleri gibi tersinir-tekrarlanır yükler altında uzun süre taşıma kapasitesinde önemli bir düşüş olmadan elastik ötesi deformasyon yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Sünek olduğu ifade edilen yapılar, yapısal elemanlar ya da malzemeler kırılmadan önce önemli miktarda enerji tüketirler.

Geleneksel yapı tasarımında yapıda yeterli sünekliğin bulunması, dolayısıyla kolon kiriş gibi yapı elemanlarının sünek olması istenir. Yapı deprem titreşimlerinden doğacak enerjiyi yok edebilmek için sünekliği kullanacaktır. Yapıyı oluşturan elemanlar deprem esnasında hasara uğrayarak plastik deformasyon yapacak ve böylece enerjiyi tüketecektir. Hedeflenen performans seviyeleri tasarım sınıflarına göre değişmekle birlikte, yapının çok hasar alsa bile içindekilerin can ve mal kaybına uğramaması için ayakta kalabilmesi beklenir. Deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerde sünek yapı tasarımı yüksek maliyetli olabilmektedir. Buna alternatif bir yol olarak deprem enerjisinin tamamen bina tarafından tüketilmesi yerine enerji dağıtıcı sistemler kullanılabilir. Çoğunlukla kullanılan bu sistemlerde iki farklı metod bulunmaktadır. Bu metodlar temel izolasyonu ve sönümleyici sistemlerdir. Temel izolasyonu taban kesme kuvvetini ve ivmeleri azaltırken, sönümleyiciler de yapıya etkiyen titreşim enerjisini ısı enerjisine çevirerek dağıtmaktadır. Sönümleyiciler yapılarda kat rijitliklerini artırarak kat ötelenmelerini azaltmaktadır. Sönümleyici sistemler genellikle temel izolasyon sistemleri ile birlikte kullanılsa da, braket sistemleriyle beraber güçlendirme amaçlı da kullanılabilirler.

Betonarme yapıların sünekliği bulunurken iki çeşit süneklik değerlendirmesi yapılmaktadır. Bunlardan ilki moment taşıma kapasitesinin değerlendirilmesinde kulllanılan eğrilik sünekliğidir. Eğrilik, moment altındaki elemanın kesitinde oluşan eğilmenin radyan cinsinden değeriyle bulunur (Şekil 3.79). Eğrilik sünekliği (μ_ϕ), moment taşıyan kesitteki nihai moment taşıma kapasitesindeki eğriliğin (ϕ_u), akmanın oluştuğu moment değerindeki eğriliğe (ϕ_y) oranı Denklem 3.8 ile bulunmaktadır.



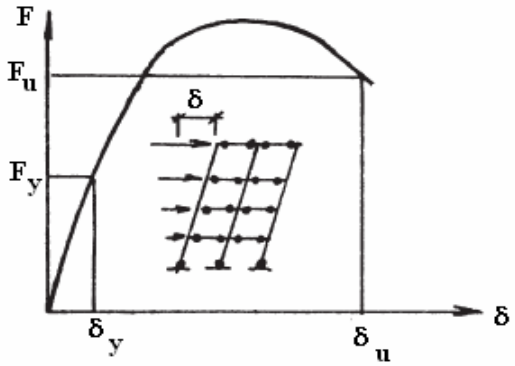
Şekil 3.79. Betonarme kesitte moment-eğrilik ilişkisi (Celep, 2013)

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_a} \tag{3.8}$$

İkinci süneklik değerlendirmesi ise genellikle yatay kuvvetlere maruz yapı ve yapı bileşenleri için sünekliği belirlemekte kullanılan ötelenme (deplasman) sünekliğidir. Deplasman sünekliği yapının ya da betonarme elemanın yük altında yaptığı nihai deplasmanın (δ_u), akma deplasmanına (δ_y) oranı olarak ifade edilen süneklik oranı ile bulunmaktadır (Denklem 3.9).

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_a} \tag{3.9}$$

Bir yapının ötelenme açısından sünek olduğunu söyleyebilmek için ötelenme süneklik oranı en az μ_δ = 4~5 olmalıdır (Şekil3.80) (Arslan, 2007).



Şekil 3.80. Ötelenme sünekliği (Arslan, 2007)

Sönümleyicilerin binalarda ek enerji sönümü sağlaması daha küçük deplasman ve hız değerlerinin oluşmasına yol açmaktadır (Soong ve Dargush, 1997). Birçok çalışmada sürtünmeli sönümleyicilerin eklendiği binalarda süneklik ihtiyacını giderdiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadaki deneylerde elde edilen zarf eğrisi ve enerji verilerinden hareketle betonarme çerçevelerin süneklik açısından değerlendirmesi yapılacaktır. Süneklik değerlendirmesinde betonarme çerçevelerin ötelenme sünekliğine bakılacaktır.

Deprem yükleri gibi yatay tersinir-tekrarlanır yükler etkisindeki betonarme yapıların sünekliğe sahip olması önemli bir niteliktir. Süneklik, yatay yükler altında yapının taşıma kapasitesini çok fazla kaybetmeden yapabildiği maksimum deplasmanın (δu) akma deplasmanına (δy) oranı olarak ifade edilen "süneklik oranı" ile kıyaslanabilmektedir. Çalışma kapsamında yürütülen betonarme çerçeve deneylerinde, deprem yüklerini temsilen statik itme ile yatay yükler uygulanarak hasar mekanizması, enerji tüketimi, rijitlik değişimi, süneklik gibi özellikler incelenmektedir. Her ne kadar pasif sönümleyici mekanizmaların, geleneksel güçlendirme yöntemlerinin aksine, süneklik kapasitesini artırmak yerine süneklik talebini azaltarak enerji tüketimini artırdığı daha önce ifade edilmiş olsa da, sönümleyicilerin monte edilmesiyle oluşan betonarme çerçeve + sönümleyici sistem sünekliğinin nasıl etkilendiğini gözlemlemek amacıyla deneyi yapılan 7 adet betonarme çerçevede süneklik değerlendirmesi yapılmıştır. Süneklik grafiği aşağıdaki sıra takip edilerek hesap edilmiştir:

1. Excel ortamında oluşturulan her bir deney numunesine ait zarf eğrisi Autocad ortamına aktarılmıştır.

2. Daha sonra Autocad ortamında var olan zarf eğrisi üzerinde ileri ve geri çevrim için maksimum yatay yük (V_{max}) değeri işaretlenmiştir.

3. Maksimum yükün ileri ve geri çevrimde %20 ($0.8V_{max}$) ve %25 ($0.75V_{max}$) seviyelerinde azaldığı noktalar işaretlenmiştir.

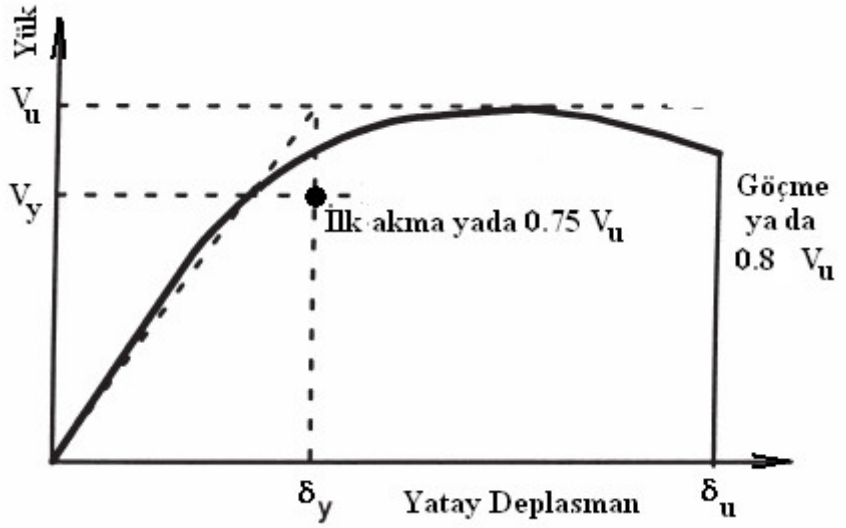
4. Taşıma kapasitesinin ileri ve geri çevrimde %75 seviyesine düştüğü noktalardan geçirilen sekant eğrisi maksimum yatay yük ile kesiştiği yer işaretlenmiştir.

5. Bu noktanın yatay eksene olan mesafesi ölçülerek elde edilen deplasman değeri

akma deplasmanı (δ_y) olarak kabul edilmiştir.

6. $0.8V_{max}$ değerinin yatay eksene olan deplasman değeri de maksimum kopma deplasmanı (δ_u) olarak kabul edilmiştir.

7. δ_y/ δ_u oranı hesap edilerek sistemin süneklik değeri Şekil 3.81'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.81. Sistem sünekliğinin elde edilmesi

3.10.10. Deney Modellerinin Genel Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda karşılaşılan birtakım zorlukları aşmak için kabul, basitleştirme ve benzeştirme gibi eylemlere sık sık başvurulmaktadır. Bu deneysel çalışmanın tasarım ve sonuç değerlendirmesi aşamalarında da bazı kabuller ve basitleştirmeler yapılmıştır. Bu kabuller ve basitleştirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

a) Deneysel çalışmanın tasarım aşamasında betonarme çerçeve kolonlarında TS500-2000 de kolonlar için belirlenen minimum yük değeri $N \geq 0.1 \times A_c \times f_{ck}$ kadar eksenel yük olması planlanmışsa da, laboratuvar ekipmanlarının yetersizliği nedeniyle kolonlara eksenel yük verilememiştir. Mevcut yapı stoğundaki az katlı yapılarda da kolonlardaki eksenel yüklerin azlığı nedeniyle davranışta çok fark oluşmayacağı varsayılmıştır.

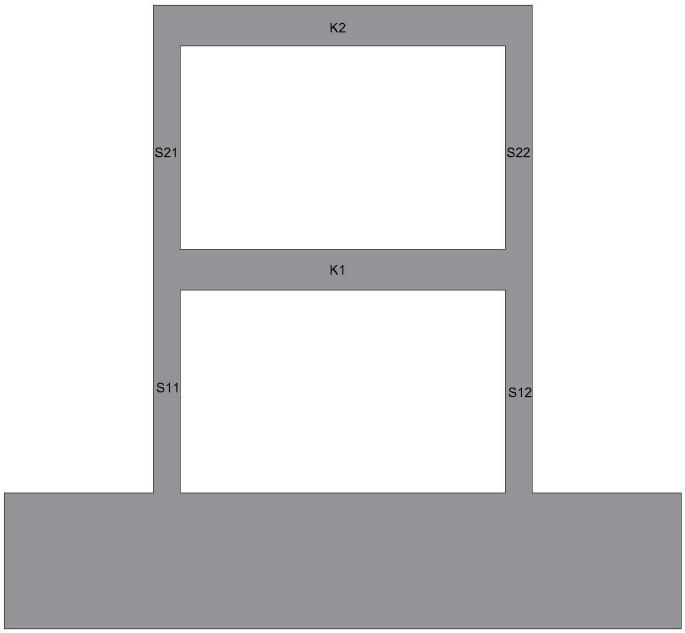
b) Kolonlarda eksenel yük olmadığından ikinci mertebe etkisi oluşmadığı kabul edilmiştir.

c) İncelenen yapı stoğunda monolitik beton dökümü nedeniyle kolon, kiriş ve döşemeler bütünleşik çalışmasına rağmen, döşemelerin kirişlere etkisi ihmal edilmiştir. Normalde kirişlerin T kesitli düşünülmesi daha doğru iken, deneysel çalışmada kolon ve kiriş kesitleri dikdörtgen olarak alınmıştır.

d) Deneylerde çerçeveye etkiyen yatay yükün üçgen dağılım ile kat seviyelerine dağıldığı kabul edilerek üst kata 2 birim, birinci kata 1 birim olmak üzere yük dağılımı sağlanmıştır. Kat ağırlık merkezinin kat kirişleri ağırlık merkezlerinden geçtiği varsayılarak, yükler kiriş eksenlerinden uygulanmıştır.

e) Betonarme çerçevelerin beton dökümü, uygulamanın aksine yatay olarak ve tüm elemanlarda aynı anda dökülmüştür. Gerçek binalarda ise, her katın betonu ayrı zamanlarda ve dikey konumda dökülmektedir. Betonun tüm elemanlarda C16~C18 kalitesinde olduğu kabul edilmiştir. Çerçevelerin beton dökümü iki parti şeklinde (4+3) yapılabilmiş, çerçeveler üzerinde deney ve işlem yapılması için en az 28 günlük priz süresi beklenmiştir. Çerçevedeki elemanların kesitlerinin küçük ve narin olmaları nedeniyle dikey konuma getirme, taşıma ve deney düzeneğine bağlama sırasında gereken özen gösterilmiş, bu nedenle elemanlarda herhangi bir hasar oluşmadığı varsayılmıştır.

f) Deney yapılan betonarme çerçevelerdeki kolon ve kiriş elemanlarının numaralandırılması Şekil 3.82'de gösterilmiştir.



Şekil 3.82. Betonarme çerçeve numune elemanlarının numaralandırılması

3.10.11. Betonarme Çerçeve Deney Programı

Betonarme çerçeve deney programında 7 adet numune test edilmiştir. Deney numuneleri isimlendirilirken kullanılan sönümleyici tipi ve sönümleyicide kullanılan sürtünme pedi malzemesi dikkate alınmıştır. Sırasıyla yapılan betonarme çerçeve deneyleri isimleri şunlardır;

1) Deney-1 Referans Numune (RN)

2) Deney-2 Tip 1 Karbonfiber (T1-KBF)

3) Deney-3 Tip 1Kurşun (T1-KRN)

4) Deney-4 Tip 1 Pirinç (T1-PRÇ)

5) Deney-5 Tip 2 Karbonfiber (T2-KBF)

6) Deney-6 Tip 2 Pirinç (T2-PRÇ)

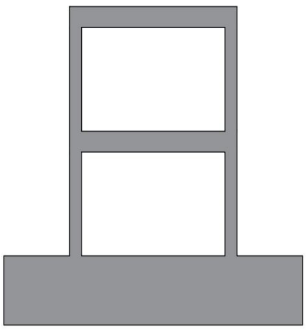
7) Deney-7 Tip 2 Kurşun (T2-KRN)

3.11. Betonarme Çerçeve Deney Sonuçları

3.11.1. Deney-1 (RN)

Deney-1'de test edilen betonarme çerçeve numune, ülkemizdeki mevcut yapılarda sıkça rastlanan bazı kusur ve eksikler bulundurduğu düşünülerek üretilen, deprem davranışı yetersiz, zayıf kolon-güçlü kiriş durumu bulunan, güçlendirme ve rehabilitasyon uygulaması içermeyen, 1/3 geometrik ölçekli, oldukça esnek bir betonarme çerçevedir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Referans numunenin temel özellikleri

Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-1 Referans Numune (RN)		17~18	Sönümleyici ve braket yok	-

Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90^{o} bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Referans numunenin (RN) deney öncesi görünüşü Şekil 3.83'de verilmiştir.

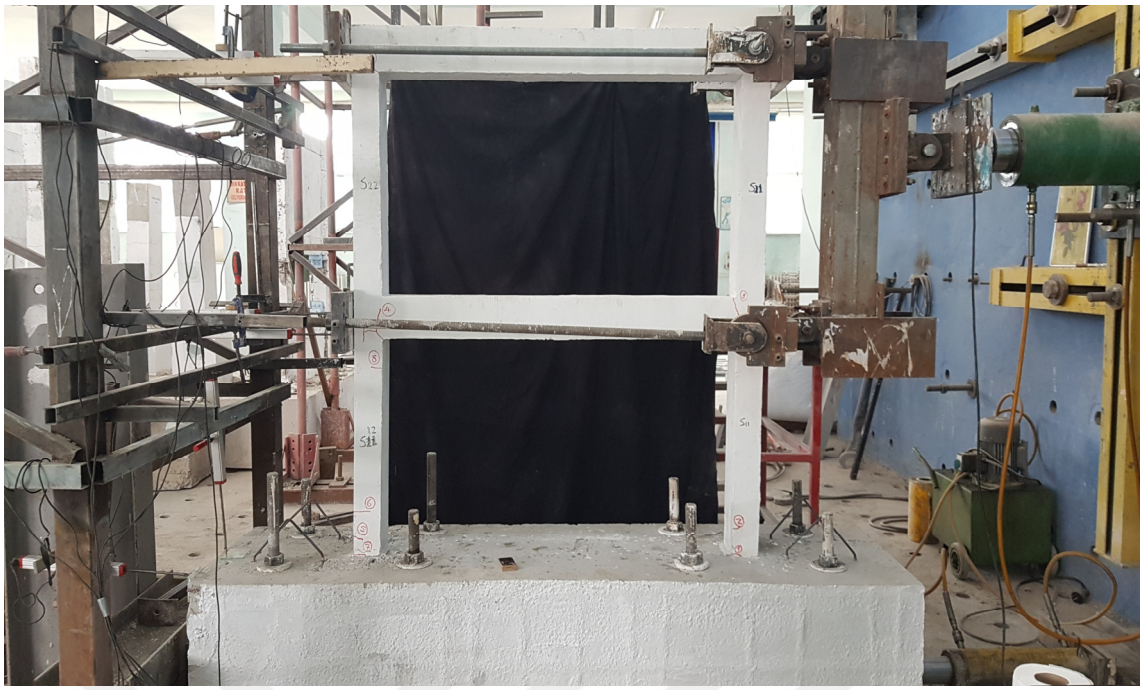
Şekil 3.83. Referans numunenin deney öncesi görünüşü

Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.73 ve Şekil 3.74'de gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Yükleme protokolüne göre, 6. çevrimde sistemin akmasını sağlayan 3000 kg (30 kN) değerine kadar 500 kg (5kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken 23 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, 23 mm' den sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla, deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) deney sistemindeki yükleme pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 70.07 mm, negatif yönde 71.32 mm deplasman değerinde son verilmiştir. Deney çerçevesi son çevrimde taşıma kapasitesini korumaktadır, dolayısıyla sünekliği yüksektir.

Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 3. çevrimin pozitif adımında 14.82 kN yükte ve 7.66 mm tepe deplasmanında S11 kolonu temel birleşim bölgesinde görülmüştür (Şekil 3.84), (Şekil 3.85). Deneydeki maksimum deplasman 14'üncü negatif çevrimde -71,32 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise 31.53 kN olarak ölçülmüştür.

Şekil 3.84. RN betonarme çerçevede oluşan ilk çatlaklar ve yerleri

RN deney numunesinin aktığı 6. çekme çevriminde yük değeri -25.80 kN olarak ölçülmüş ve bu yükteki tepe deplasmanı değeri ise -23.90 mm olarak ölçülmüştür. Bu yük değerinde 1. kat kolon-kiriş birleşimlerinde daha yoğun olmak üzere tüm kolon-kiriş ve kolon-temel birleşimlerinde çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 3.86), (Şekil 3.87). İtme çevrimlerinde ise maksimum görülen yük 32 kN ve tepe deplasmanı 35.90 mm olarak 7. çevrimde ölçülmüştür. Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.7'de verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.



Şekil 3.85. RN deney çerçevesinin ilk çatlaklardan sonra görünüşü (3.çevrim)

Şekil 3.86. RN deney çerçevesinde akmada oluşan çatlaklar ve yerleri (6.çevrim sonu)

Şekil 3.87. RN deney çerçevesinin akmadan sonra görünüşü (6. çevrim sonu)

Çizelge 3.7. Referans Numune (RN) deneyinde her çevriminde gözlemlenen çerçeve çatlak ve hasarları

Deney: Deney-1 (RN)			
Çevrim No	**Yük (kg)**	**Deplasman (mm)**	**Açıklama**
+1	+501	+1,75	Deneye 500 kg yük artışıyla ilerleyen, kuvvet kontrollü yükleme protokolü uygulanarak başlanmıştır. İlk iki çevrimde herhangi bir hasar gözlenmemiştir.
-1	-625	-2,22	
+2	+1025	+4,30	
-2	-1006	-3,97	
+3	+1485	+7,66	S11 kolonunun alt ucunda 1 nolu itme çatlağı oluştu.
-3	-1485	-7,50	S11 kolonunun alt ucunda 1 ve 2 nolu çekme çatlağı oluştu. K1 kirişi ile S11 kolonunun birleşim bölgesinde 3 nolu çekme çatlağı oluştu. S12 ile K1 kirişi birleşim bölgesinde 4 nolu çekme çatlağı oluştu. S12 kolonunun alt ucunda 5,6,7 nolu çekme çatlakları oluştu. S11 kolonunun üst ucunda 8 nolu çekme çatlağı oluştu. S22 ile K2 kirişi birleşim bölgesinde 9 nolu çekme çatlağı oluştu.
+4	+2009	+11,01	S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşim bölgesinde 2 nolu itme çatlağı oluştu. S12 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde 3 ve 5 nolu itme çatlakları oluştu. S12 kolonunun temel ile birleşim bölgesinde 4 nolu itme çatlağı oluştu. S11 kolonunun K1 ile birleşim bölgesinde 6 nolu itme çatlağı oluştu. S21 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 7 nolu, S22 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 8 nolu çatlaklar oluştu.

-4	-1997	-14,80	S11 kolonunun alt ucundaki 1 ve 2 nolu çekme çatlakları gelişti. S11 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 10 nolu çekme çatlağı oluştu, 6 nolu itme çatlağı ile birleşti. S12 ile K1 kirişi birleşim bölgesinde 4 nolu çekme çatlağı ile 3 nolu itme çatlağı birleşti. S12 kolonu alt ucundaki 5 nolu çekme çatlağı gelişti. S22 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde daha önce oluşan 9 nolu çekme çatlağı gelişti. S12 kolonu alt ucunda 11 nolu çekme çatlağı oluştu. S21 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 12 nolu çekme çatlağı oluştu ve 7 nolu itme çatlağı ile birleşti.
+5	+2703	+18,20	S11 kolonunun alt ucunda 9 nolu itme çatlağı oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşimindeki 2 nolu çatlak gelişti. S22 kolonu ile K1 kirişi birleşimindeki 3 nolu itme çatlağı uzadı. S12 kolonunun alt ucunda 9 nolu itme çatlağı oluştu. S11 kolonunun üst ucunda 10 nolu itme çatlağı oluştu. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 11 nolu itme çatlağı oluştu.
-5	-2360	-20,10	S21 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 3 ve 10 nolu çekme çatlağı genişledi ve uzadı. S11 kolonu alt ucundaki 1 ve 2 nolu çekme çatlağı birleşti. S21 kolonunun üst ucundaki 12 nolu çekme çatlağı genişledi ve uzadı. S22 kolonunun üst ucunda 13 ve 14 nolu çekme çatlakları oluştu. S22 kolonu ile K1 kirişi birleşimindeki 4 nolu çekme çatlağı uzadı. S12 kolonu alt ucundaki 7 nolu çatlak uzadı.
+6	+3000	+23,05	S22 kolonunun üst ucundaki 8 nolu itme çatlağı ile alt ucundaki 3 nolu itme çatlağı uzadı. S11 kolonunun alt ucunda 12 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 13 nolu itme çatlağı oluştu. S21 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde 7 nolu itme çatlağı uzadı.
-6	-2580	-23,90	S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde dış yüzde 15 nolu çekme çatlağı oluştu.
AKMA GERÇEKLEŞTİ. DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
+7	+3200	+35,90	S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 14 nolu itme çatlağı oluştu.
-7	-3150	-35,75	Mevcut çatlakların genişlemesi devam etti. Yeni çatlak veya hasar oluşumu gözlenmedi.
+8	+3190	+40,30	S11 kolonunun üst ucunda iç yüzde 15 nolu itme çatlağı oluştu.
-8	-3095	-40,25	S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 10 nolu itme çatlağı karşısında 16 nolu çekme çatlağı oluştu.
+9	+3160	+45,50	Mevcut çatlakların genişlemesi devam etti. Yeni çatlak veya hasar oluşumu gözlenmedi.
-9	-3110	-45,50	15 nolu çekme çatlağı genişledi. 10 nolu çekme çatlağı genişledi. 8 ve 4 nolu çekme çatlakları genişledi. 5 ve 7, 9 ve 12 nolu çekme çatlakları genişledi ve dallandı.
+10	+3140	+51,30	7 nolu itme çatlağı genişledi. 6 nolu itme çatlağı genişledi, S11 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde iç kısımda beton ezilmesi görüldü. S11 kolonu ile temel birleşimindeki 12 nolu itme çatlağı genişledi. S22 kolonunun üstündeki 8 nolu itme çatlağı genişledi. Mevcut çatlakların genişlemesi devam etti.

-10	-3170	-51,20	S12 kolonunun alt ucundaki 5 ve 7 nolu çekme çatlakları genişledi. S12 kolonunun temel birleşimindeki çatlaklarda genişleme gözlendi. S12 kolonu ile K1 kirişi birleşimindeki 4 ve 8 nolu çekme çatlakları genişledi. S11 kolonu ile K1 kirişi birleşimindeki 3 nolu çekme çatlağı genişledi. S11 kolonunun alt ucunda 1 nolu çekme çatlağıyla 15 nolu çekme çatlağı birleşti, genişledi.
+11	3090	+55,60	Mevcut çatlakların genişlemesi devam etti. Yeni çatlak veya hasar oluşumu gözlenmedi.
-11	-3080	-55,70	
+12	+2870	+60,20	6,7,12 nolu itme çatlakları genişledi. S12 kolonunun alt ucundaki 4 nolu itme çatlağı dallandı ve 7 nolu çekme çatlağıyla birleşti. S22 kolonunun alt ucundaki 3 nolu itme çatlağı genişledi ve dallandı. S22 kolonunun üst ucundaki 8 nolu itme çatlağı 9 nolu çekme çatlağı ile birleşti. S21 kolonunun K1 ile birleşimindeki 3 nolu çekme çatlağında ezilme oluştu.
-12	-3135	-60,75	S22 kolonunun alt ucundaki 4 nolu çekme çatlağı (~4 mm) genişledi ve dallandı. S12 kolonunun temel ile birleşiminde bulunan 5 nolu çekme çatlağı (kesme çatlağı) genişledi. (Plastik mafsal oluştu) S22 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde bulunan 9 nolu çekme çatlağı genişledi. S11 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde bulunan 15 nolu çekme çatlağı ile 6 nolu itme çatlağı birleşti ve genişledi. (Plastik mafsal oluştu) S11 kolonu alt ucundaki 1 nolu ve 16 nolu çekme çatlakları genişledi.
+13	+2950	+65,25	S22 kolonu ile K1 kirişinin birleşimindeki 3 nolu itme çatlağı genişledi ve dallandı. (Plastik mafsal oluştu) S22 kolonu ile K2 kirişi birleşimindeki 8 nolu itme çatlağı genişledi. (Plastik mafsal oluştu) S21 kolonunun K2 kirişi ile birleşimindeki 7 nolu itme çatlağı genişledi.
-13	-3165	-65,35	Mevcut çatlakların genişlemesi devam etti. Yeni çatlak veya hasar oluşumu gözlenmedi.
+14	+2995	+70,10	%4 lük tepe ötelenmesine ulaşıldığından deneye son verildi.
-14	-3160	-71,35	

Oluşan çatlaklar yığılı plastik davranışa (plastik mafsal kabulü) uygun bir yayılım sergilemiştir. Betonarme çerçevelerdeki kolonlar kirişlerden daha zayıf olduğundan, plastik mafsallar kolon-kiriş birleşim bölgesinde oluşmuştur. Kirişlerde herhangi bir hasar veya çatlak oluşmamıştır. Kolonlarda ise çatlaklar çok fazla yayılmamış, birleşim bölgelerinde yoğunlaşan çatlaklar görülmüştür. Referans numune maksimum deplasmanda henüz taşıma gücünü kaybetmemiştir. Referans numunenin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 32 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (14. çevrim) 29.93 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 31.67 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (14. çevrim) 31.53 kN değerine düşmüştür. Deney sonunda her iki yönde de kayda değer bir yük kaybı olmamış, plastik mafsallar yeterince gelişememiştir.

Analitik çalışma kısmında yapılan statik itme analizinde referans çerçevenin 3255 mm tepe deplasmanında 1.kat kolonlarındaki 4 plastik mafsal dönmesinin 0,15 radyan değerini geçmesiyle kat mekanizması oluşmuş ve göçme sınırına ulaştığı görülmüştür. Analitik çalışmanın sunulduğu bölümde ayrıca bu kısma değinilecektir. Şekil 3.88'de maksimum deplasman değerinde birleşim bölgelerindeki çatlak ve hasar durumları verilmiştir. Fotoğraflardan görülebileceği gibi genel itibariyle ötelenme ve çatlak gelişiminin büyük bir kısmı 1. kat elemanlarında yoğunlaşmıştır. Şekil 3.89'da referans çerçeve numunenin deney sonu genel görünüşü verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

Şekil 3.88. RN deney çerçevesinde maksimum deplasmanda birleşim bölgelerindeki çatlak ve hasar durumları (14. çevrim sonu)

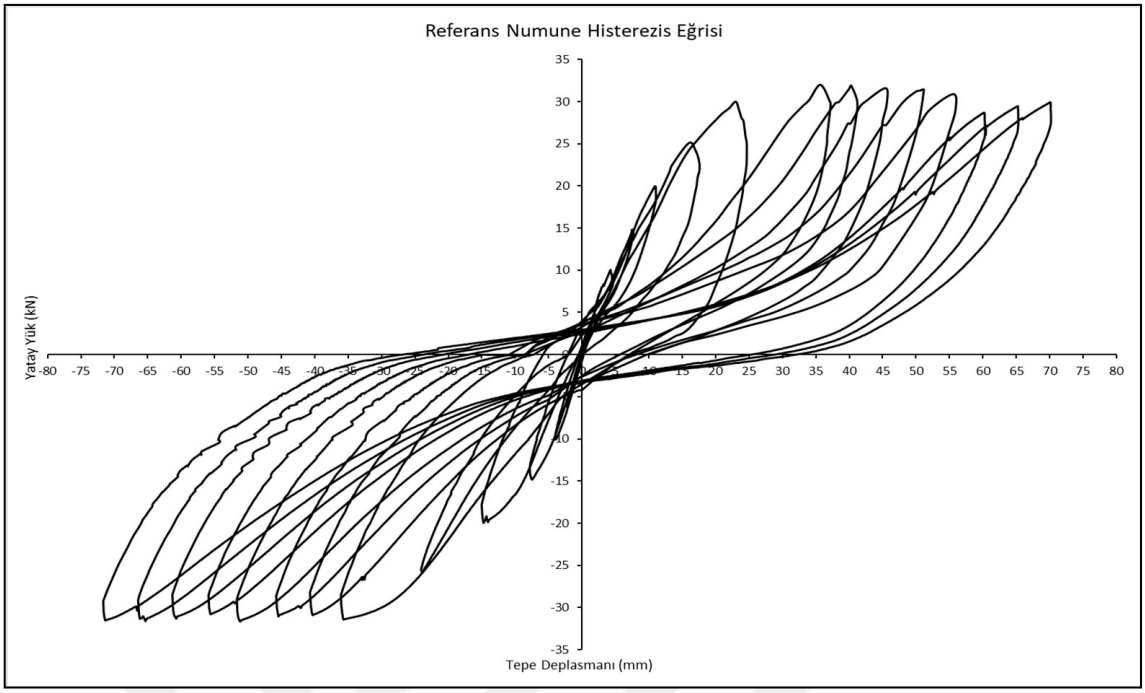
Çerçeveli yapılarda güçlü kiriş-zayıf kolon kusuru hasar mekanizmasını olumsuz şekilde etkileyen ciddi bir kusurdur. Yığılı plastik davranış modeline göre hasarlar kolon ve kirişlerde momentlerin en büyük olduğu uç bölgelerde yoğunlaşarak plastik mafsalların oluşmasına neden olmaktadır. Çerçeve sistemlerde plastik mafsalların yapısal elemanlarda oluşma sırası, tüm çerçevenin enerji tüketim kapasitesini etkileyen

önemli bir husustur. Normalde kolonların kirişlerden güçlü olması istenir, bu durumda plastik mafsallar ilk olarak 1. kat kirişlerinde oluşmaya başlamakta ve üst kat kirişlerinde oluşmaya devam etmektedir. Çerçeve sistemlerde ideal bir plastik mafsal sırası olarak tüm kat kirişlerinde plastik mafsallar oluştuktan sonra kolonlarda plastik mafsal oluşması beklenmektedir. Kolon boyutlarının kirişlere göre küçük olması ve momente direnç gösteren kolon boyutunun dar olması çerçevenin yatay ötelenme rijitliğini önemli ölçüde azaltan unsurlardır. Bu nedenlerle deneylerde kullanılan betonarme çerçeve, esnek bir çerçeve (düşük yatay yükte çok fazla ötelenme yapan) olarak değerlendirilebilir.

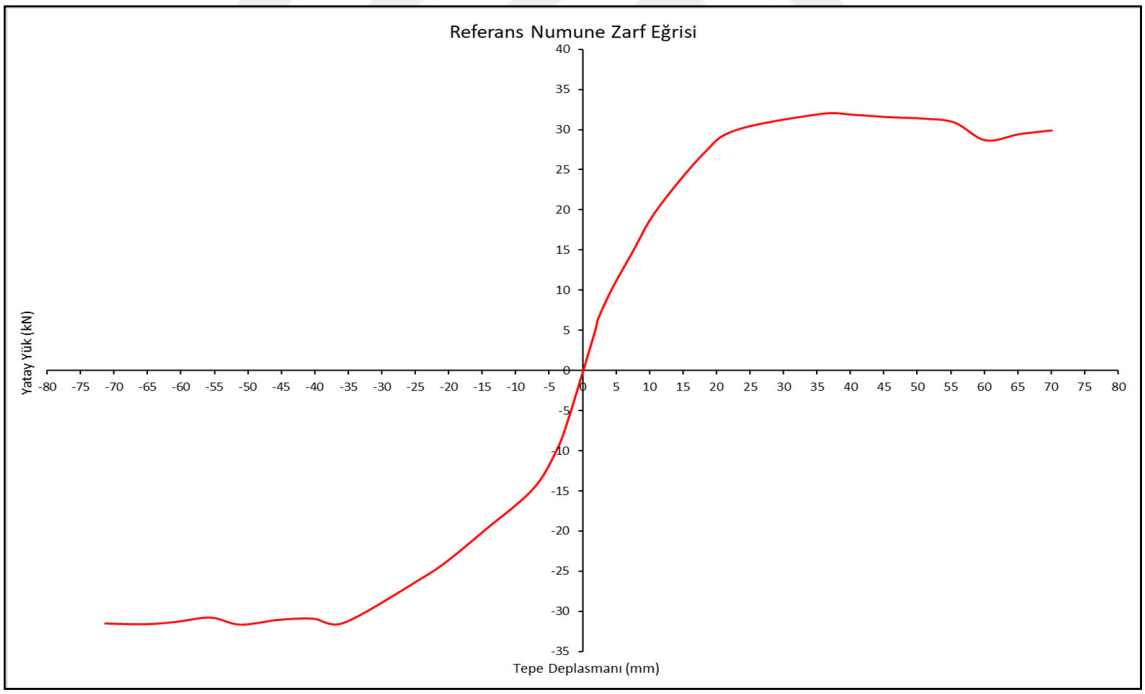
Şekil 3.89. RN deney çerçevesinin deney sonu genel görünüşü

Referans numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

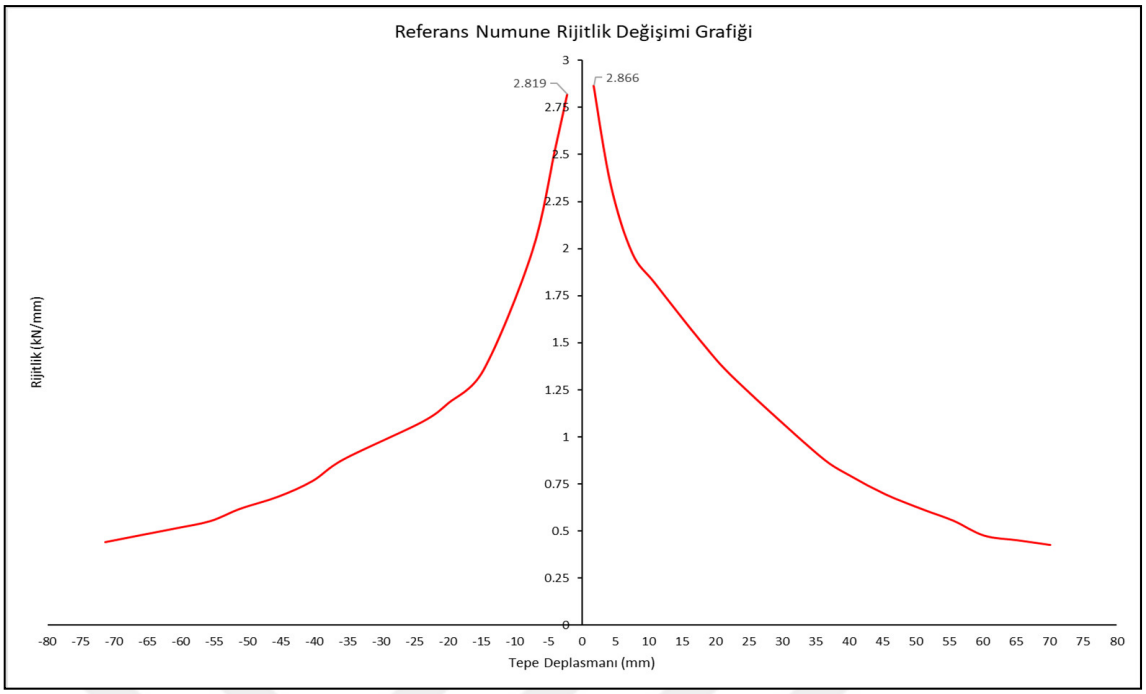
1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.90'da
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.91'de
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.92'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.93'de,
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil 3.94'de,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.95'de,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.96'da gösterilmiştir.



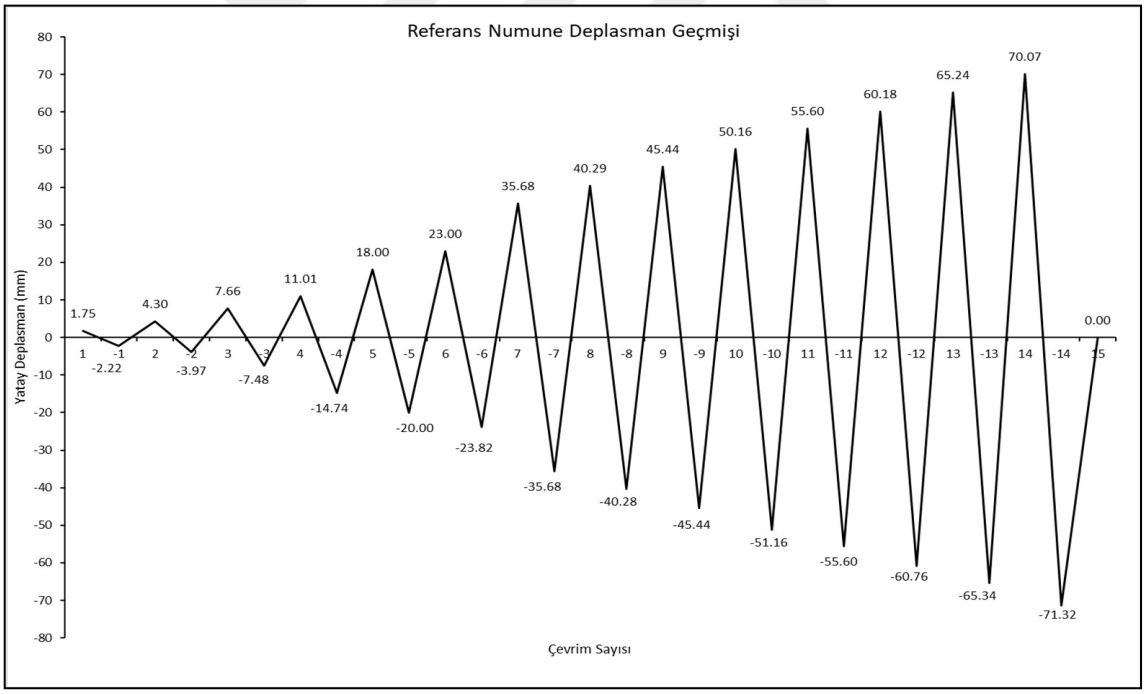
Şekil 3.90. Referans deney numunesi tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



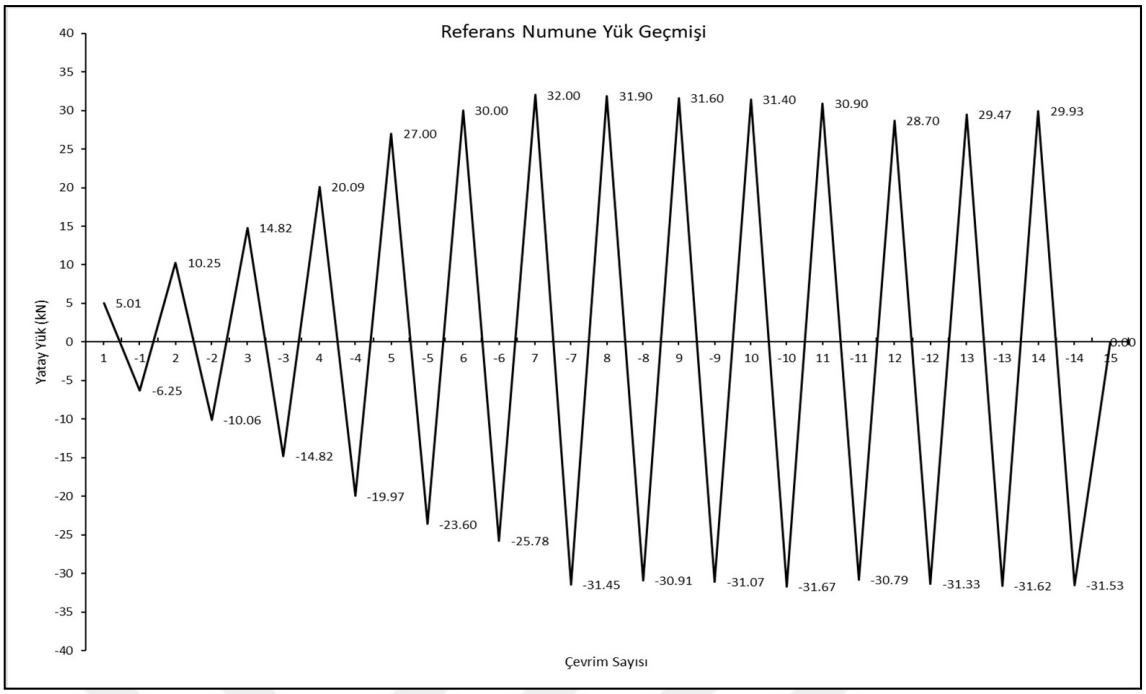
Şekil 3.91. Referans deney numunesi tepe deplasmanına bağlı zarf eğrisi



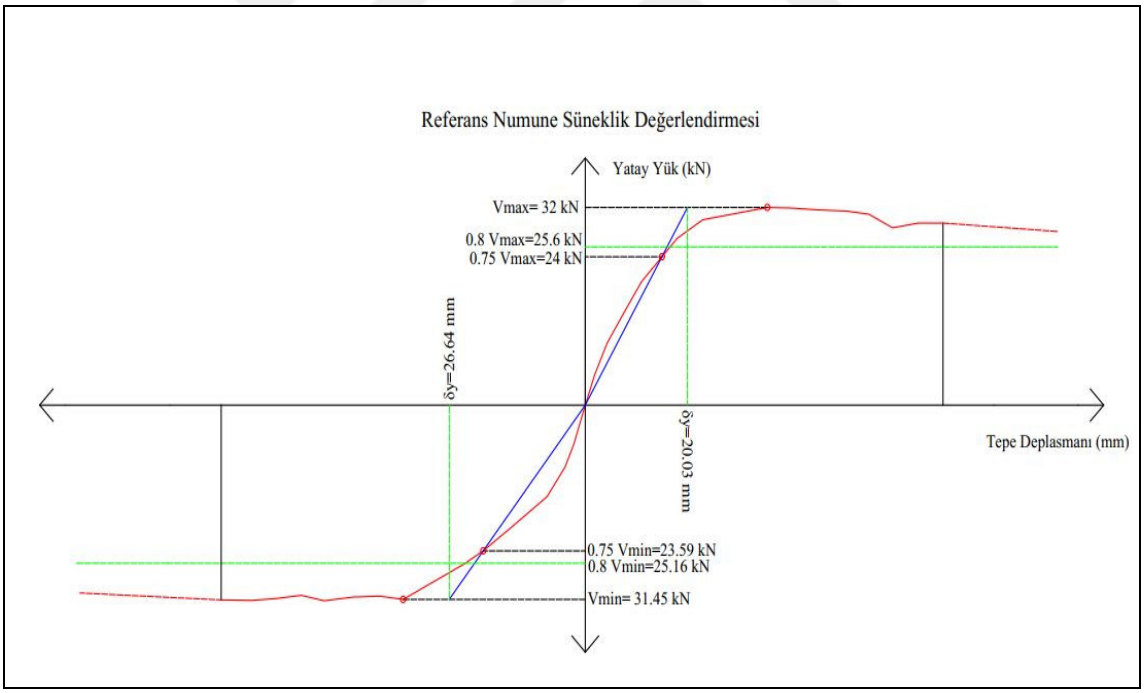
Şekil 3.92. Referans deney numunesine ait rijitlik değişimi grafiği



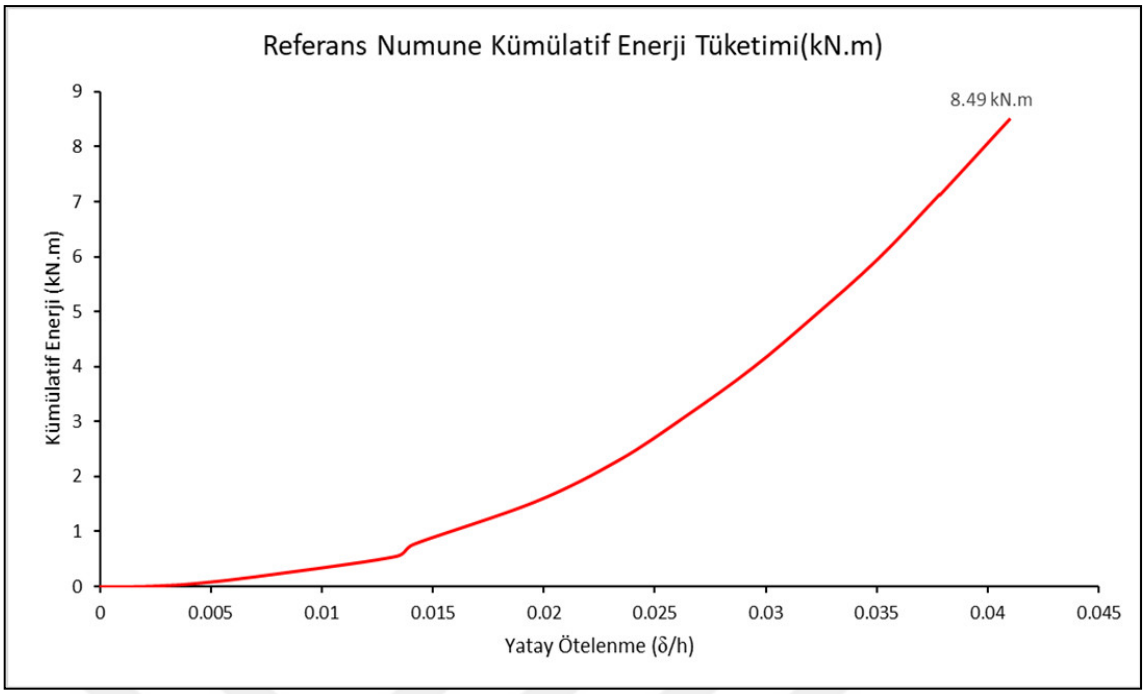
Şekil 3.93. Referans deney numunesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



Şekil 3.94. Referans deney numunesine ait yük geçmişi (Toplam yatay yüke göre)



Şekil 3.95. Referans deney numunesine ait süneklik değerlendirilmesi grafiği



Şekil 3.96. Referans deney numunesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

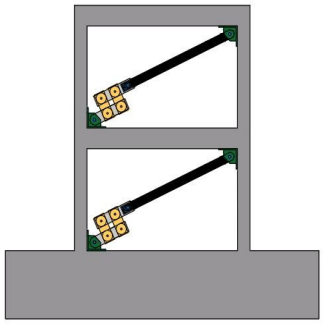
Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak referans çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.96'daki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.92'de gösterilmiştir. Şekil 3.95'de süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir. Deney sonunda gidilen deplasmana kadar maksimum yatay yükten önemli bir düşüş olmadığından süneklik oranı tespit edilememiştir. Grafiğin sürekliliğinden ve eğiminden süneklik oranının 4'den büyük olduğu anlaşılmaktadır.

RN deney çerçevesinde itme yönünde maksimum dayanımın elde edildiği 7. çevrimden son çevrim olan 14. çevrime kadar yatay yük değeri 32 kN'dan, 29.93kN'a düşmüş, %6.5 dayanım kaybı oluşmuştur. Çekme yönünde ise RN deney çerçevesi maksimum dayanımın elde edildiği 10. çevrimden son çevrim olan 14. çevrime kadar yatay yük değeri 31.67 kN'dan, 31.53kN'a düşmüş %1 dayanım kaybı oluşmuştur. Deney düzeneğinden elde edilen strok boyunun yetersizliği nedeniyle plastik mafsalların gelişip, dayanımın düşeceği deplasman değerlerine gidilememiştir.

3.11.2. Deney-2 (T1-KBF)

Deney-2'de test edilen betonarme çerçeve numune, beton, donatı, boyut ve kusurlar açısından referans çerçeveyle aynı özellikleri olan, her iki katında da karbonfiber sürtünme pedli Tip 1 sürtünme sönümleyiciyle rehabilite edilmiş betonarme çerçevedir. Tip 1 sürtünme sönümleyici, çelik bir braket eleman ile kat çerçevesine çapraz köşelerden diyagonal şekilde monte edilmektedir. Her katta aynı yönde, birer adet olacak şekilde, çerçeve deney numunesine toplamda 2 adet sönümleyici ilave edilmiştir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

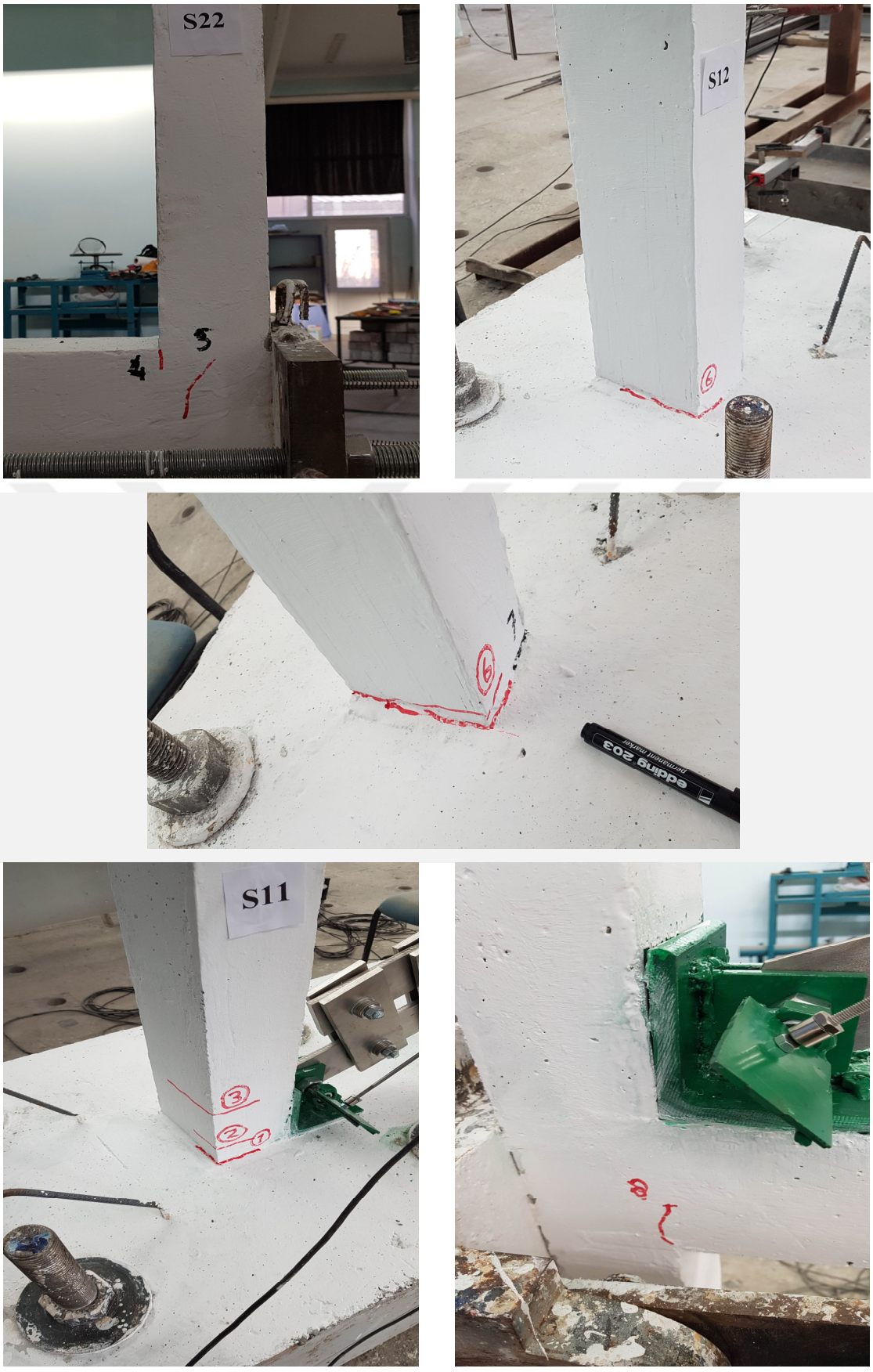
Çizelge 3.8. T1-KBF deney çerçevesinin temel özellikleri

Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-2 Tip 1 karbonfiber		17~18	Tip 1 Sönümleyici Diyagonal Braketli	Karbonfiber Sürtünme Pedi (100 Nm Sıkıştırma Torku)

Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, referans numunede olduğu gibi düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90° bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Tip 1 karbonfiber betonarme çerçeve numunenin (T1-KBF) deney öncesi görünüşü Şekil 3.97'de verilmiştir.

Şekil 3.97. T1-KBF deney çerçevesinin deney öncesi görünüşü

Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 3. çevrimin negatif adımında 16.28 kN yükte ve 4.15 mm tepe deplasmanında S11 kolonu temel birleşim bölgesinde görülmüştür (Şekil 3.98), (Şekil 3.99). Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.



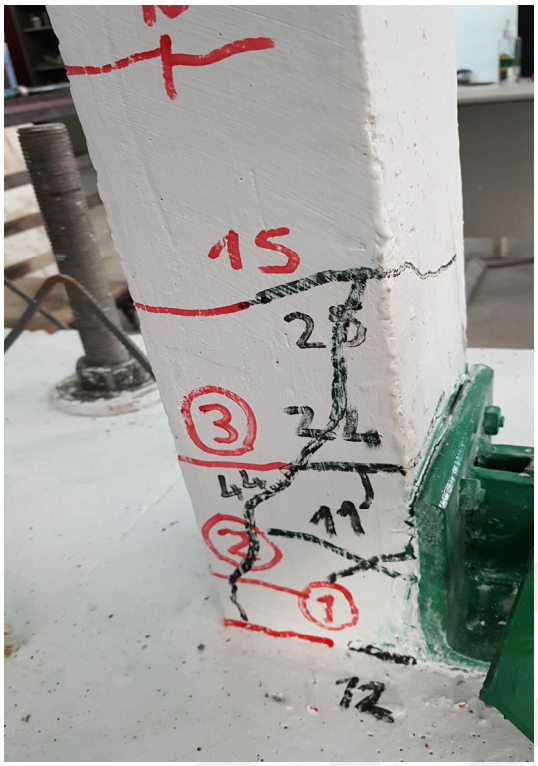
Şekil 3.98. T1-KBF deney çerçevesinde oluşan ilk çatlaklar ve yerleri

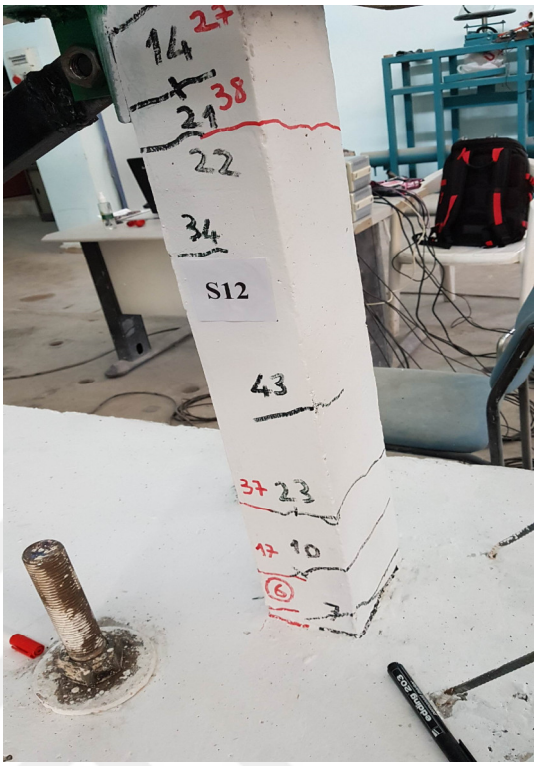
Şekil 3.99. T1-KBF deney çerçevesinin ilk çatlaklardan sonra görünüşü (3.çevrim)

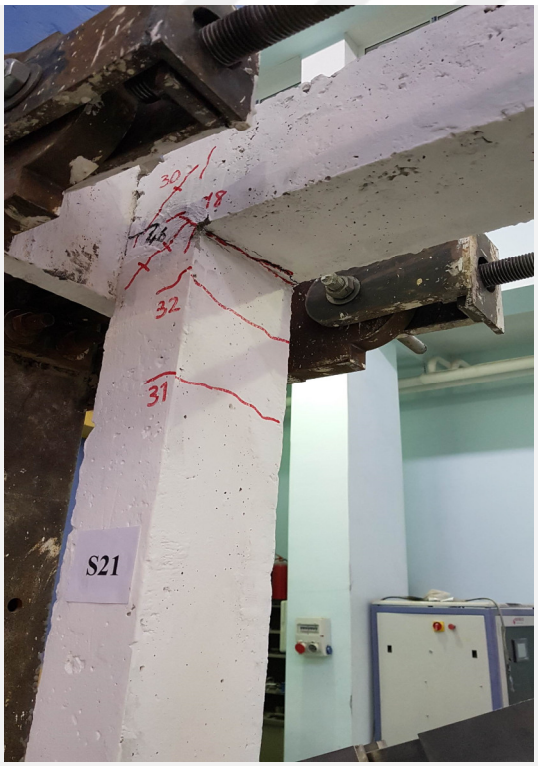
Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.108 ve Şekil 3.109'da gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü referans çerçeve için deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Betonarme çerçeveye diyagonal sönümleyici + braket elemanı eklendiğinden toplam yatay rijitlik ve dayanım bir miktar artmaktadır. Bu nedenle boş referans çerçevenin aktığı yükten daha büyük bir yükte (dolayısıyla daha ileri bir çevrimde) akmanın gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Akmanın gerçekleştiği 8. çevrimin negatif (çekme) adımından sonra yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollü yüklemeye çevrilmiştir.

Yükleme protokolüne göre, 8. Çevrimin negatif (çekme) adımında sistemin akmasını sağlayan 3689 kg (36.89 kN) değerine kadar 500 kg (5kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken 35.60 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, bu değerden sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla, deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye, yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) yükleme

pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 71.01 mm, negatif yönde 70.83 mm deplasman değerinde son verilmiştir.







Şekil 3.100. T1-KBF deney çerçevesinde akmada oluşan çatlaklar ve yerleri (6.çevrim sonu)

Akma çevriminde (8. çevrim) S11 kolonu - temel birleşim bölgesine bağlanan bağlantı köşebenti, 44 nolu kesme çatlağının oluşmasıyla kolondan ayrılmaya başlamıştır. Bu çevrimde 44 nolu çatlak genişliği yaklaşık 2 mm ye ulaştığı için yük düşüşü gözlenmiştir (Şekil 3.100). Bu çevrimi takip eden diğer çevrimlerde, özellikle diyagonal elemanda çekme gerilmesi oluşturan pozitif (itme) adımlarında çatlak genişliği büyümeye devam etmiştir. Deneydeki maksimum deplasman 14'üncü pozitif çevrimde 71.01 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise 29.42 kN olarak ölçülmüştür. Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.9'da verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.9. T1-KBF deney çerçevesinde her çevriminde gözlemlenen çerçeve çatlak ve hasarları

Deney: Tip 1 Karbonfiber (T1-KBF)			
Çevrim No	**Yük**	**Deplasman**	**Açıklama**
+1	+590	+1,91	Deneye 500 kg yük artışıyla ilerleyen, kuvvet kontrollü yükleme protokolü uygulanarak başlanmıştır. İlk iki çevrimde herhangi bir hasar gözlenmemiştir.
-1	-663	-2,10	
+2	+1010	+3,98	
-2	-1190	-3,31	
+3	+1522	+7,40	S11 kolonunun temel birleşim bölgesinde, dış yüzde 1, 2, 3 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonu ve K1 kirişi birleşim bölgesinde 4 ve 5 nolu çatlaklar oluştu. Yine S12 kolonunun temel birleşiminde, iç yüzde 6 nolu çatlak oluştu.
-3	-1630	-4,15	S12 kolonunun temel birleşim bölgesindeki 6 nolu çatlağın karşısında, dış yüzde 7 nolu çatlak oluştu.
+4	+2060	+10,40	S12 kolonu ve K1 kirişinin birleşim bölgesinde bulunan 4 ve 5 nolu çatlaklar uzadı. K1 kirişinin sol ucunda, mesnet yüzünde, altta 8 nolu çatlak oluştu.
-4	-2080	-6,80	K1 kirişinin sağ ucunda mesnet yüzünde, alt tarafta 9 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel mesnetinin 15 cm yukarısında, dış yüzde 10 nolu çatlak, K1 kiriş mesnet yüzünden 12 cm aşağıda, iç yüzde 14 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde, dış yüzde 13 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel birleşiminde 11 ve 12 nolu çatlaklar oluştu.
+5	+2520	+14,05	S11 kolonunun temel birleşiminden 25 cm yukarısında, dış yüzde 15 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunda temel birleşim bölgesinde 10 nolu çatlağın karşısında, iç yüzde 17 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun orta yüksekliğinde, dış yüzde 16 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2

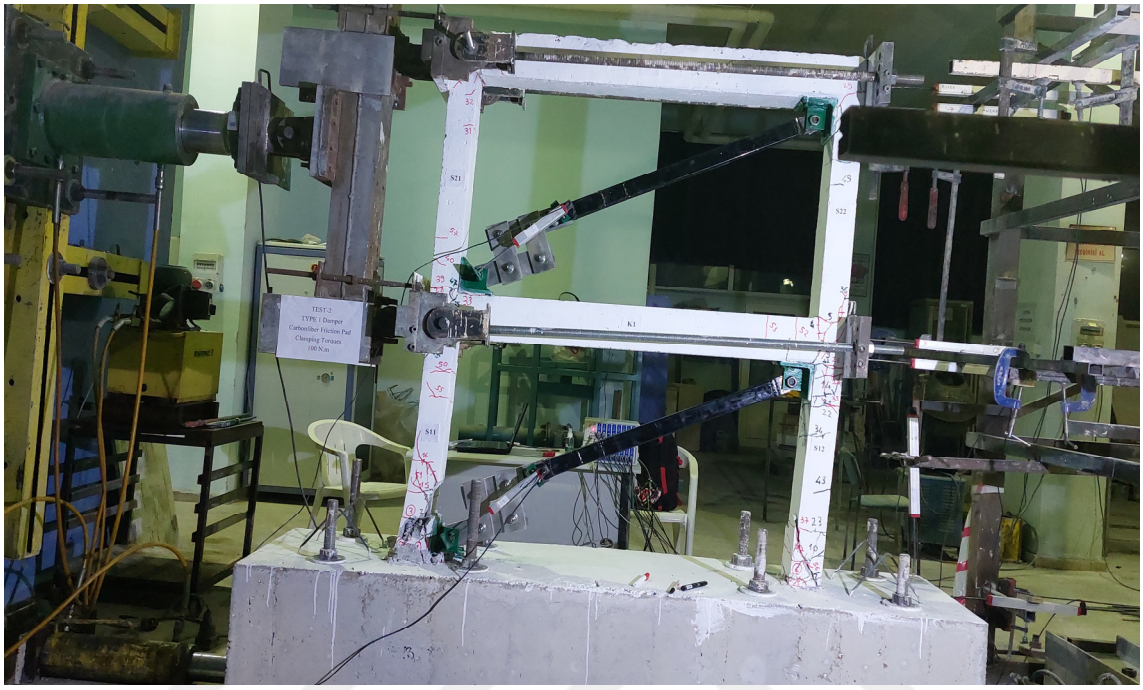
			kirişiyle birleşiminde 18 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45º açıyla 19 nolu çatlak oluştu.
-5	-2530	-11,08	S22 kolonunun K2 kirişi birleşiminden 12 cm aşağıda, iç yüzde 20 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun üst kısmında, K1 kirişinin mesnet yüzünden 12 cm ve 15 cm aşağısında, iç yüzde 21 ve 22 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel birleşiminden 15 cm ve 25 cm yukarısında 24 ve 25 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminden 20 cm yukarıda, dış yüzde 23 nolu çatlak oluştu.
+6	+3023	+18,25	S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde, dış yüzde 26 ve 27 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde dış yüzde 28 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 29 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun üst kısmında, iç yüzde 31 ve 32 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 45º açıyla 30 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sol uçta, üst yüzünde, bağlantı köşebentinin altında 33 nolu çatlak oluştu.
-6	-3000	-16,40	S12 kolonunun K1 kirişi mesnet yüzünden 25 cm aşağıda, iç yüzde 34 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 35 nolu çatlak oluştu, 19 nolu çatlakla birleşti. S22 kolonunun alt ucunda 36 nolu çatlak oluştu.
+7	+3526	+22,46	S12 kolonunda 23 nolu çatlağın karşısında, iç yüzde 37 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunda 22 nolu çatlağın karşısında 38 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun alt ucunda, dış yüzde 39 ve 40 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45º açıyla 41 nolu çatlak oluştu.
-7	-3535	-28,15	S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde, mesnet yüzünde 42 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun orta yüksekliğinde, dış yüzde 43 nolu çatlak oluştu. 1. kat diyagonal elemanının alt köşebent bağlantısı bulunan S11 kolonu ile temel birleşiminde 60º açılı 44 nolu kesme çatlağı oluştu. S11 kolonunun üst ucunda 45 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2 ile birleşim bölgesinde 46 nolu çatlaklar oluştu. Yükleme protokolü kuvvet kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye çevrildi
+8	+4075	+30,10	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar uzadı ve genişledi.
AKMA GERÇEKLEŞTİ DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
-8	-3685	-35,60	S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde daha önce oluşan 39 nolu çatlağın karşısında, iç yüzde 47 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun üst kısmında, iç yüzde 48 ve 49 nolu çatlaklar oluştu. Mevcut çatlaklar genişledi.
+9	+4105	+35,35	S11 kolonunun üst ucunda 50 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel ile mesnet bölgesinde 51 nolu çatlak oluştu, 44 nolu kesme çatlağıyla birleşti. 44 nolu çatlağın genişliği 2-3 mm'ye ulaştı. K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 52 ve 53 nolu çatlaklar oluştu.
-9	-3250	-36,97	K1 kirişinin sağ ucunda, alt yüzde 54 nolu çatlak oluştu.

			S11 kolon tabanında daha önce oluşan 44 nolu kesme çatlağı 5 mm genişliğe ulaştı. Mevcut çatlaklar uzadı ve genişledi.
+10	+4084	+40,20	55, 57, 58 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminde 60º açıyla 56 nolu kesme çatlağı oluştu.
-10	-3110	-45,60	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar uzadı ve genişledi.
+11	+4080	+45,30	
-11	-2800	-50,30	
+12	+3980	+50,20	17, 26, 27 ve 41 nolu çatlaklarda genişleme ve dallanma oldu. 15 ve 16 nolu çatlaklarda uzama ve genişleme oldu.
-12	-2925	-60,45	59 ve 60 nolu çatlaklar oluştu.
+13	+3690	+55,75	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar uzadı ve genişledi.
-13	-2735	-70,80	61-63 nolu çatlaklar oluştu.
+14	+2940	+71,00	%4'lük göreli öteleme oranına ulaşıldığından deneye son verildi.

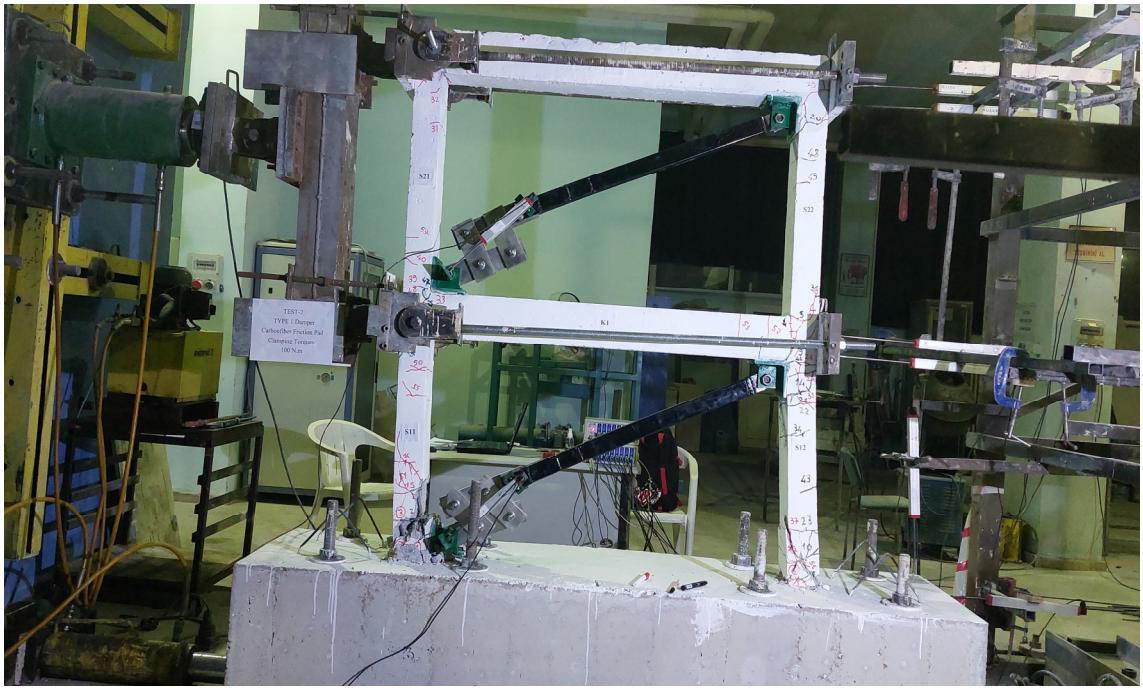
Çalışmadaki betonarme çerçevelerde kolonlar, kirişlerden hareket yönünde daha zayıf olduğundan plastik mafsallar çoğunlukla kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Çatlakların dağılımı referans çerçeve numuneye göre daha dağınıktır. Referans çerçevede kiriş uçlarında herhangi bir hasar görülmemişken, Tip 1 karbonfiber numunesinde kiriş uç bölgelerinde çatlaklar görülmüştür. Referans çerçevede çatlaklar yığılı plastik davranışa özgü yayılım gösterirken, Tip 1 karbonfiber numunesinde çatlak yayılımı daha geniş bir bölgede meydana gelmiştir. Referans numune maksimum deplasmanda henüz taşıma gücünü kaybetmemiştir. Tip 1 karbonfiber numunesinin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 41.06 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (14. çevrim) 29.42 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 36.89 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (14. çevrim) 27.34 kN değerine düşmüştür. Deney çerçevesi maksimum deplasmanda, ulaştığı en büyük dayanımın pozitif yönde %28.35'ini, negatif yönde %25.89'unu kaybetmiş, böylece deney sonunda her iki yönde de önemli bir yük kaybı gerçekleşmiştir, dolayısıyla süneklik oranı referans numuneye göre küçüktür.

İlk çevrimlerde yatay yük az ve betonarme çerçeve etkiyen yüke karşı rijit olduğundan sönümleyicilerde hareket oluşmamıştır. İlk çatlakların oluşmasıyla, sönümleyiciler de harekete geçmiştir. Toplam yatay yükün daha fazla olduğu 1. katta, Tip 1 karbonfiber sönümleyici daha etkin çalışmıştır. Betonarme çerçevedeki 1. kat kolonlarında kesme çatlakları gelişinceye kadar (7. çevrim) sönümleyicilerin itme ve çekme adımlarında etkili çalıştığı gözlenmiştir. Kolon- temel birleşiminde büyük kesme

çatlaklarının oluşmasıyla betonarme çerçeve yumuşamış ve sönümleyicilerin çalışması kısıtlanmıştır (Şekil 3.101), (Şekil 3.102).

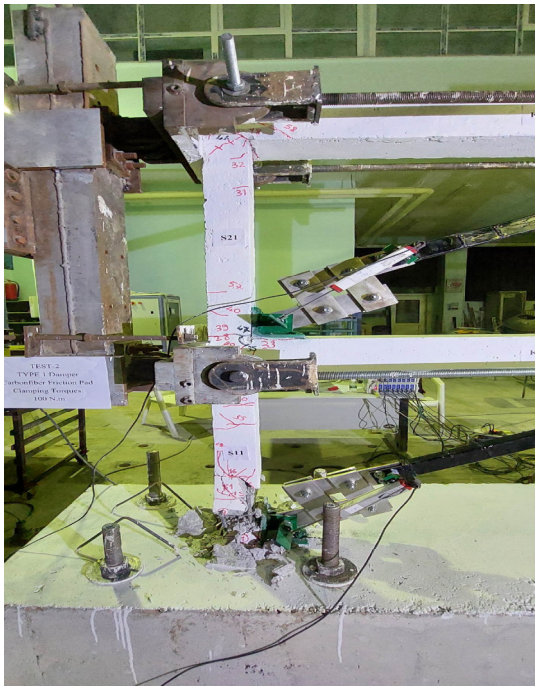


Şekil 3.101. İtmede T1-KBF çerçeve numune görünüşü (10. Çevrim)

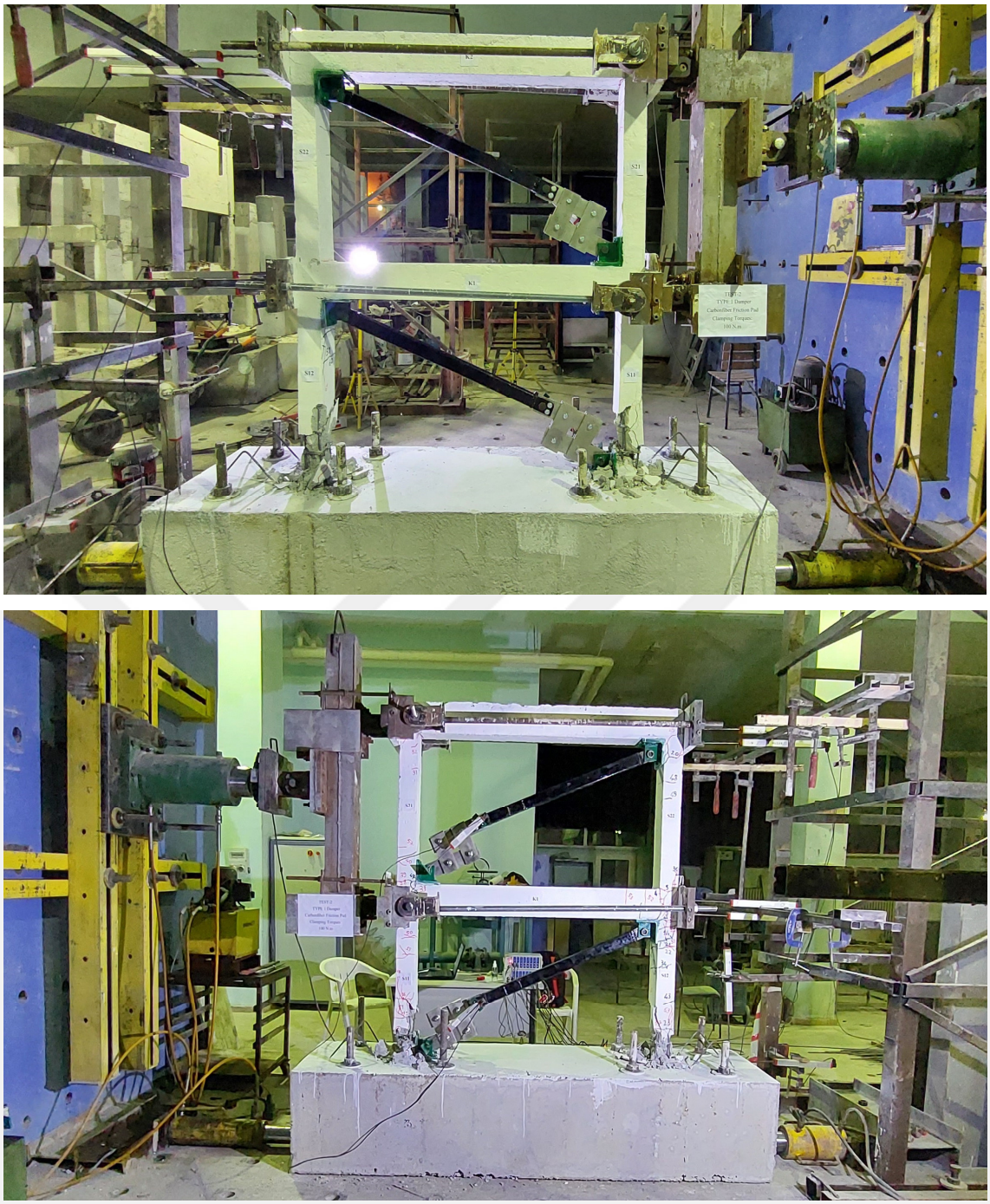


Şekil 3.102. Çekmede T1-KBF çerçeve numune görünüşü (10. Çevrim)

Şekil 3.103'de maksimum deplasman değerinde kolon, kiriş ve birleşim bölgelerinde çatlak ve hasar durumları verilmiştir. Fotoğraflardan görülebileceği gibi genel itibariyle ötelenme ve çatlak gelişiminin büyük bir kısmı 1. kat elemanlarında yoğunlaşmıştır. Deneyin son çevrimlerinde kolonların temel ile birleşim bölgeleri kesme hasarına uğramış ve bu bölgede beton dağılmıştır. Deney başında eğilme çatlakları oluşan kolon-temel birleşimleri, ilerleyen çevrimlerle beraber çatlamakta ve yumuşamaktadır. Bu bölgelerdeki kolon kesitinin çatlayıp zayıflaması ve diyagonal braket + sönümleyici elemanın oluşturduğu çekme etkileri, kolon-temel birleşimlerini kesme hasarına zorlamaktadır. Diyagonal braket + sönümleyicide çekme gerilmesi oluşturan pozitif adımlarda, önce sönümleyicinin bağlı olduğu köşebentteki ankraj dübellerinin çekme etkisi nedeniyle S11 kolonu temel birleşiminde 60º açılı kesme çatlağı oluşmuş (akma çevrimi olan 7. çevrimde) ve takip eden itme adımlarında bu çatlak genişlemiştir. Çerçevenin temel ile bağlanan kolon kesitlerinde kesme kapasitesinin düşüşüyle birlikte 10. çevrimde S12 kolonunun temel birleşiminde de 56 nolu kesme çatlağı oluşmuştur (Şekil 3.101), (Şekil 3.102). Deney sonunda S11 kolonuna ankrajlanan bağlantı köşebenti kolondan sıyrılmış sadece temel ankrajları ile çalışmaya devam etmiştir. Şekil 3.104'de Tip 1 karbonfiber çerçeve numunenin deney sonu ön ve arka genel görünüşü, Şekil 3.103'de ise bu çatlak ve hasarların yerleri ayrıntılı verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.



3.103. T1-KBF deney çerçevesinde deney sonu hasar ve çatlaklar

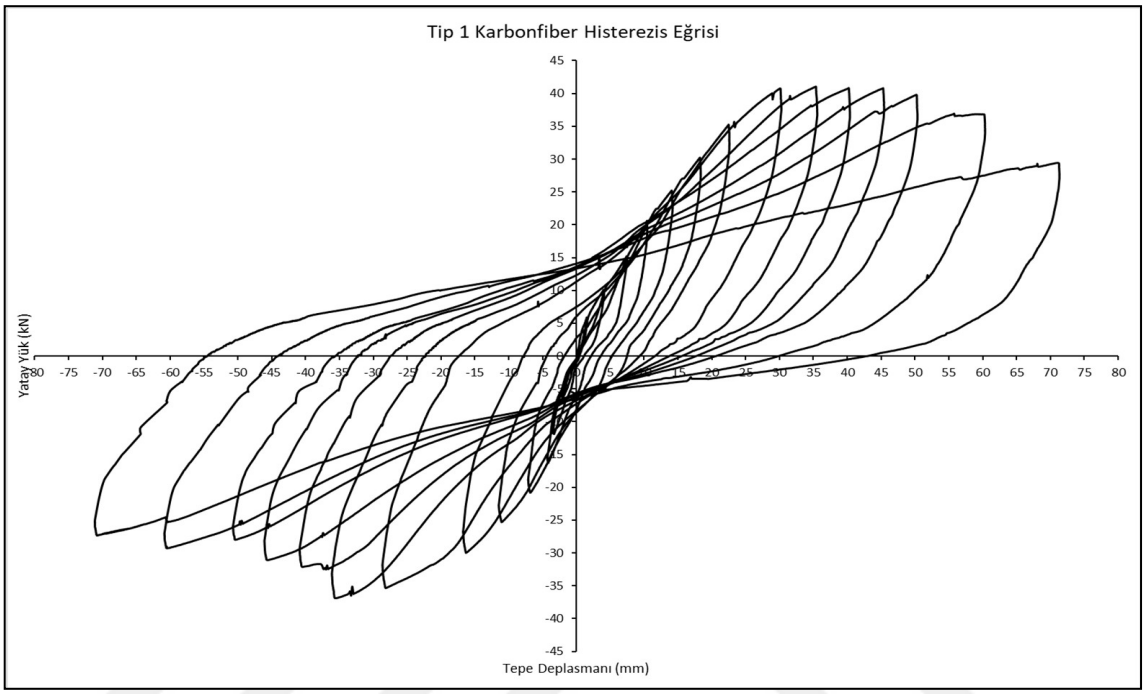


Şekil 3.104. T1-KBF çerçevesinde deney sonu ön ve arka görünüş

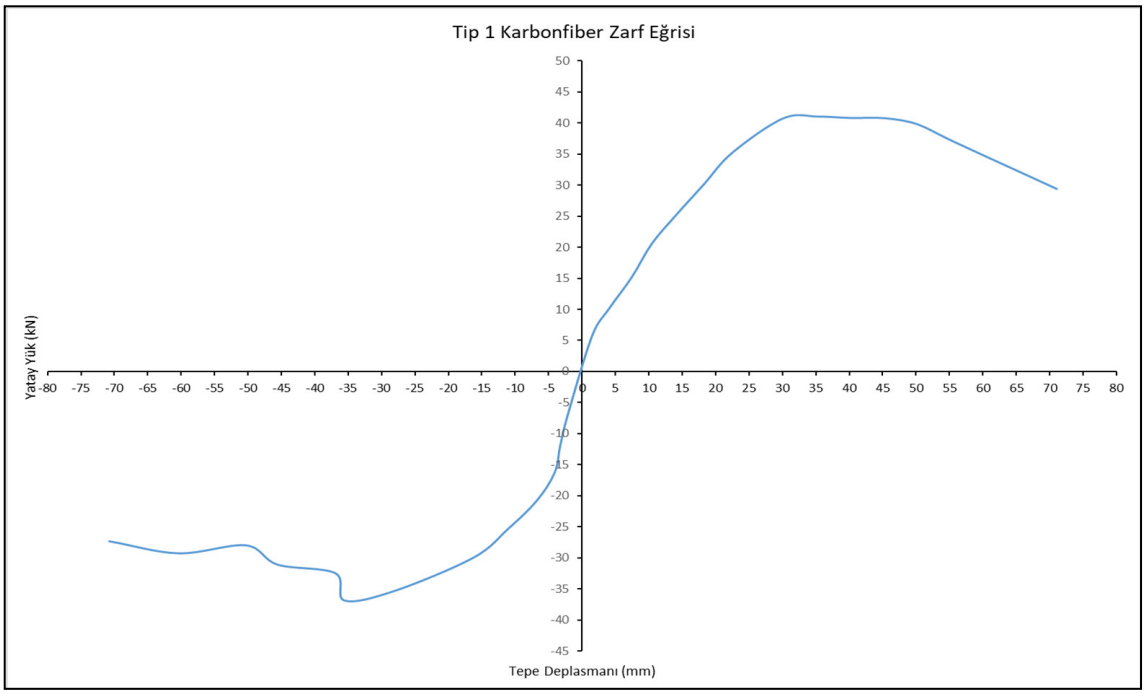
Tip 1 karbonfiber numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.105'de,
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.106'da,
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.107'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.108'de,

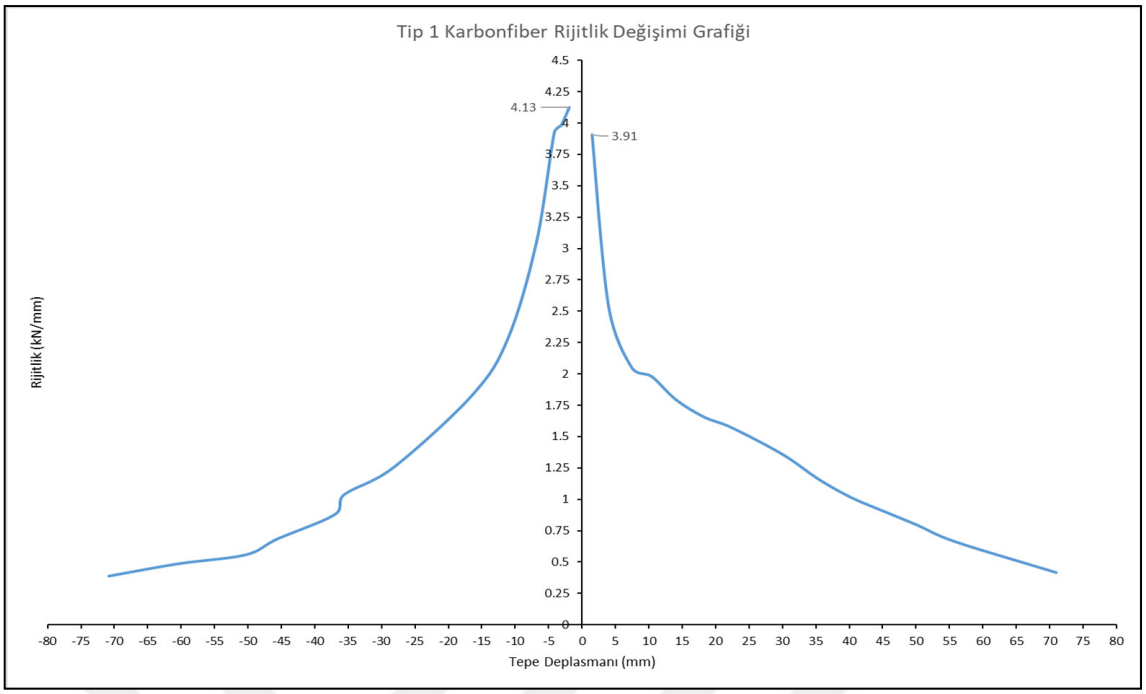
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil 3.109'da,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.110'da,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.111'de gösterilmiştir.



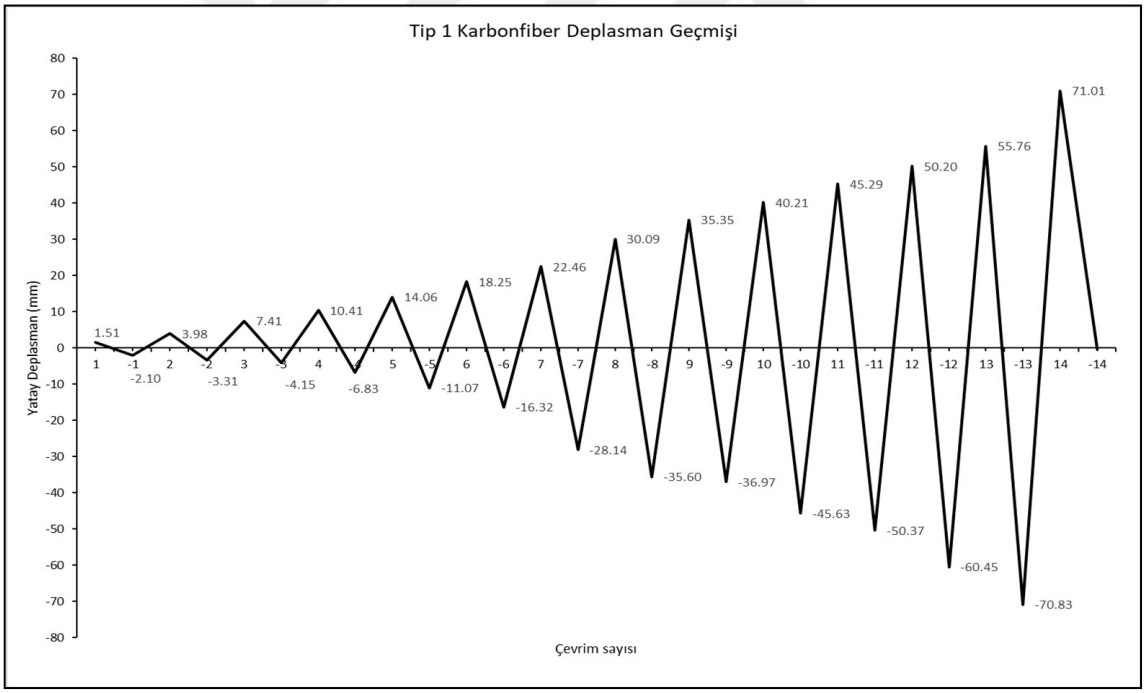
Şekil 3.105. T1-KBF deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



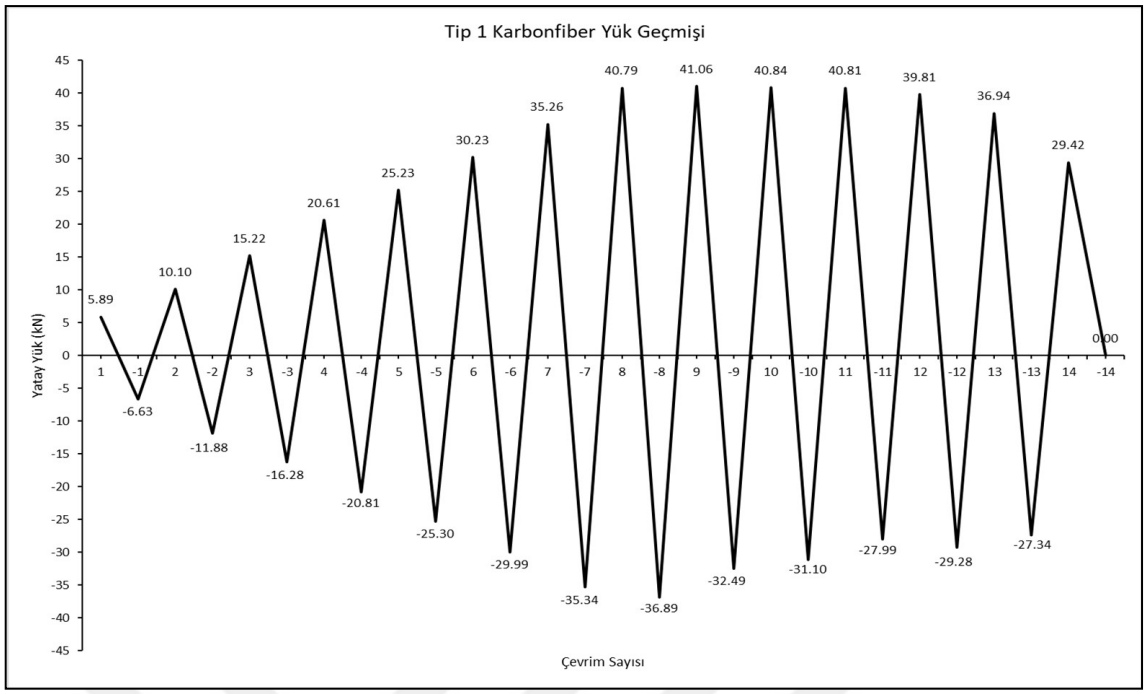
Şekil 3.106. T1-KBF deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı zarf eğrisi



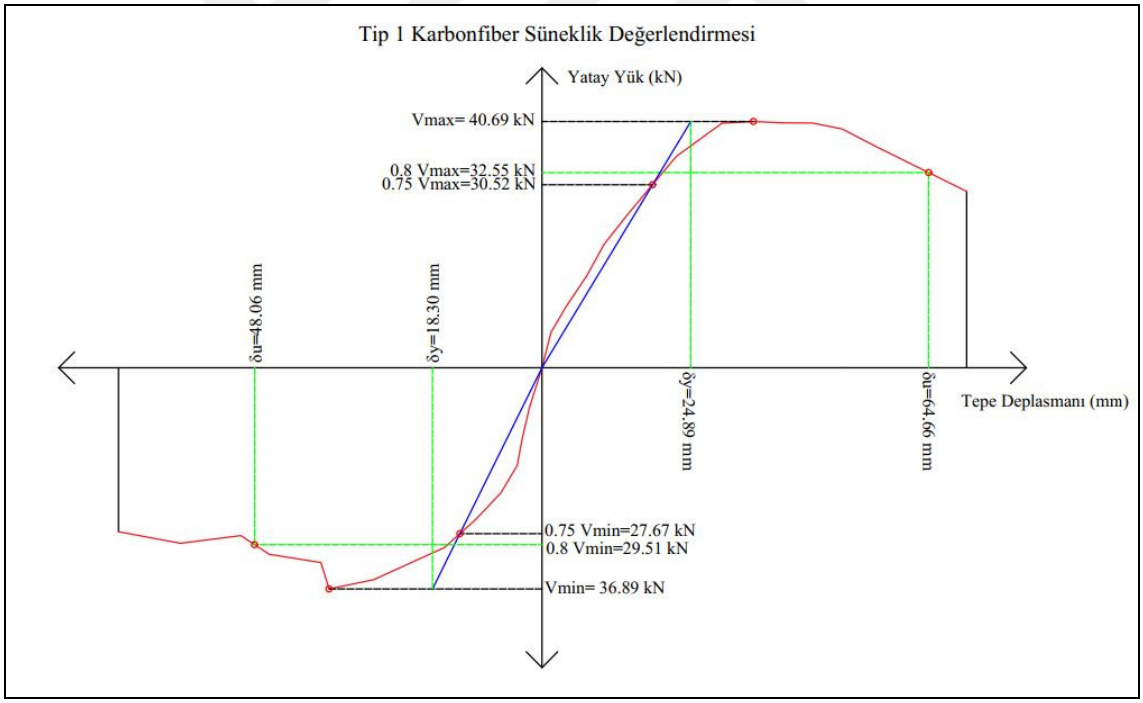
Şekil 3.107. T1-KBF deney çerçevesine ait rijitlik değişimi grafiği



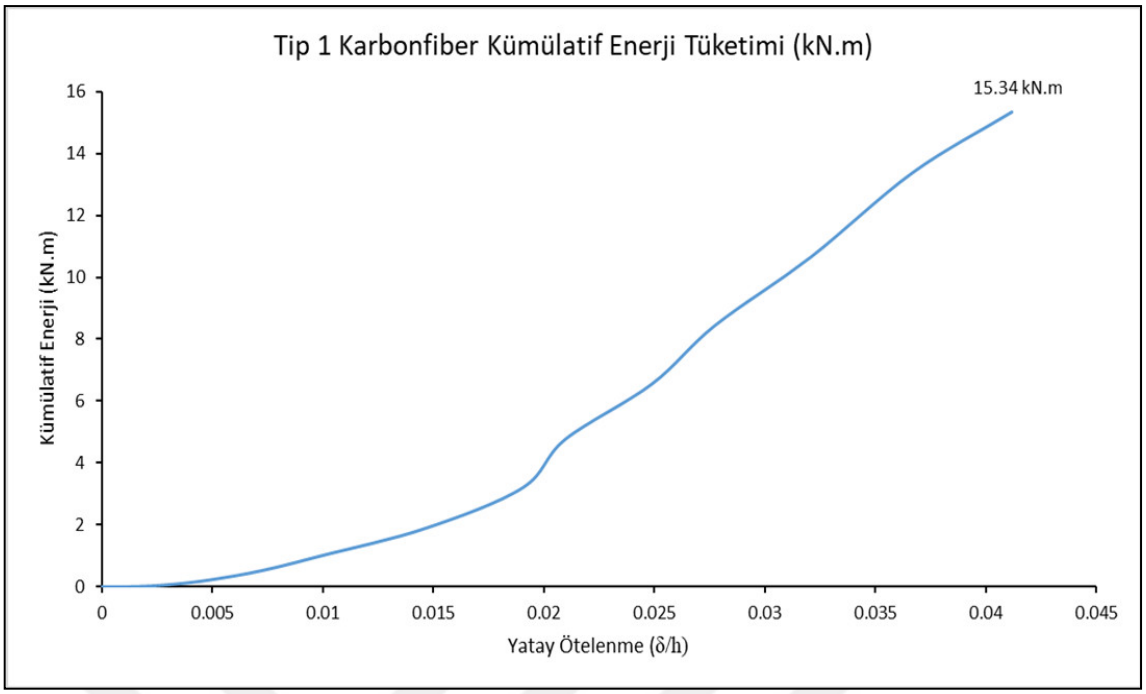
Şekil 3.108. T1-KBF deney çerçevesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



Şekil 3.109. T1-KBF deney çerçevesine ait yük geçmişi (Taban kesme kuvvetine göre)



Şekil 3.110. T1-KBF deney çerçevesine ait süneklik değerlendirilmesi grafiği



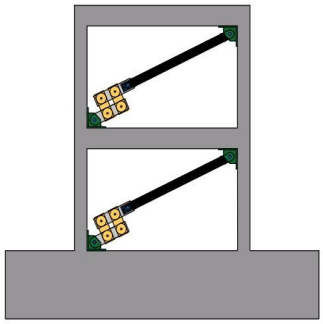
Şekil 3.111. T1-KBF deney çerçevesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak Tip 1 karbonfiber çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.111'deki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.107'de gösterilmiştir. Şekil 3.110'da süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir.

3.11.3. Deney-3 (T1-KRN)

Deney-3'de test edilen betonarme çerçeve numune, beton, donatı, boyut ve kusurlar açısından referans çerçeveyle aynı özellikleri olan, her iki katında da kurşun sürtünme pedli Tip 1 sürtünme sönümleyiciyle rehabilite edilmiş betonarme çerçevedir. Tip 1 sürtünme sönümleyici, çelik bir braket eleman ile kat çerçevesine köşelerden diyagonal şekilde monte edilmektedir. Her katta aynı yönde, birer adet olacak şekilde, çerçeve deney numunesine toplamda 2 adet sönümleyici monte edilmiştir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. T1-KRN deney çerçevesinin temel özellikleri

Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-3 Tip 1 Kurşun		17~18	Tip 1 Sönümleyici Diyagonal Braketli	Kurşun Sürtünme Pedi (100 Nm Sıkıştırma Torku)

Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, referans numunede olduğu gibi düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90° bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Tip 1 kurşun (T1-KRN) numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 3.112 de verilmiştir.

Şekil 3.112. T1-KRN deney çerçevesinin deney öncesi görünüşü

Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 3. çevrimin pozitif (itme) adımında 20.66 kN yükte ve 6.74 mm tepe deplasmanında S11 kolonu temel birleşim bölgesinde görülmüştür (Şekil 3.113), (Şekil 3.114). Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

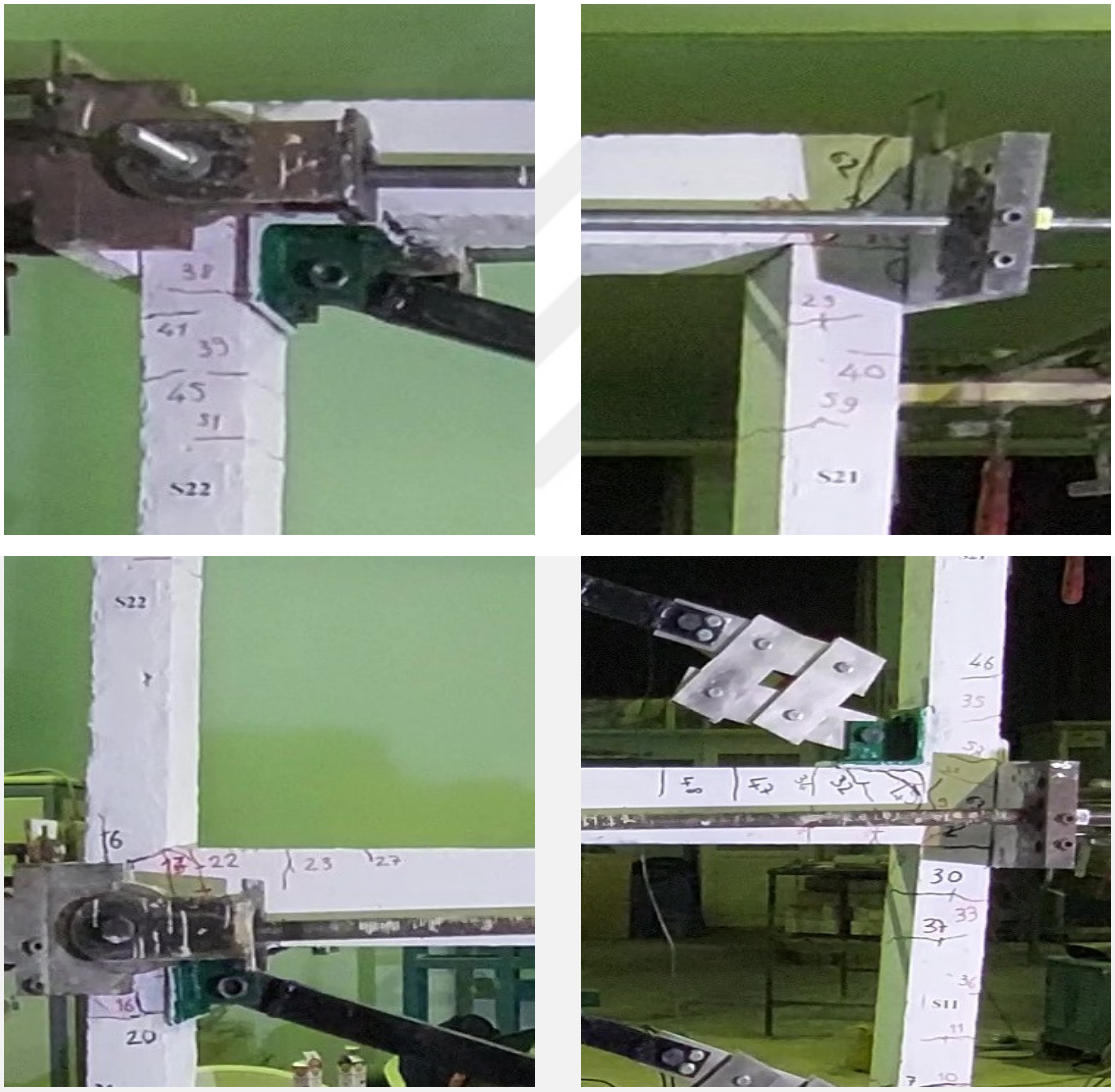
Şekil 3.113. T1-KRN deney çerçevesinde oluşan ilk çatlaklar ve yerleri (3. Çevrim)

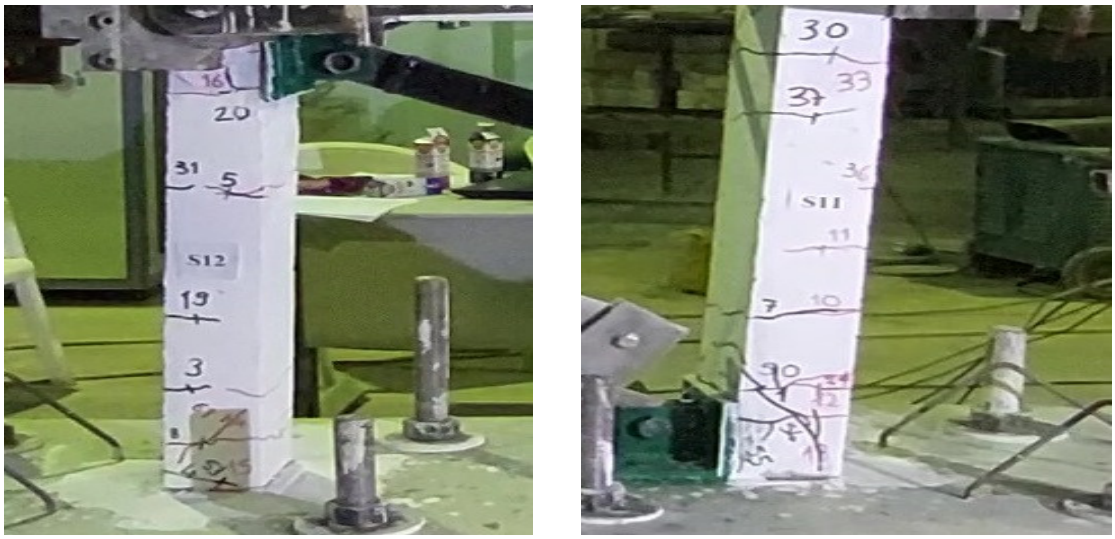
Şekil 3.114. T1-KRN deney çerçevesinin ilk çatlaklar sonrası görünüşü (3. Çevrim)

Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.122 ve Şekil 3.123'de gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü referans çerçeve için deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Betonarme çerçeveye diyagonal sönümleyici + braket elemanı eklendiğinden toplam yatay rijitlik ve dayanım bir miktar artmaktadır. Bu nedenle boş referans çerçevenin aktığı yükten daha büyük bir yükte (dolayısıyla daha ileri bir çevrimde) akmanın gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Akmanın gerçekleştiği 9. çevrimin negatif (çekme) adımından sonra yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollü yüklemeye çevrilmiştir.

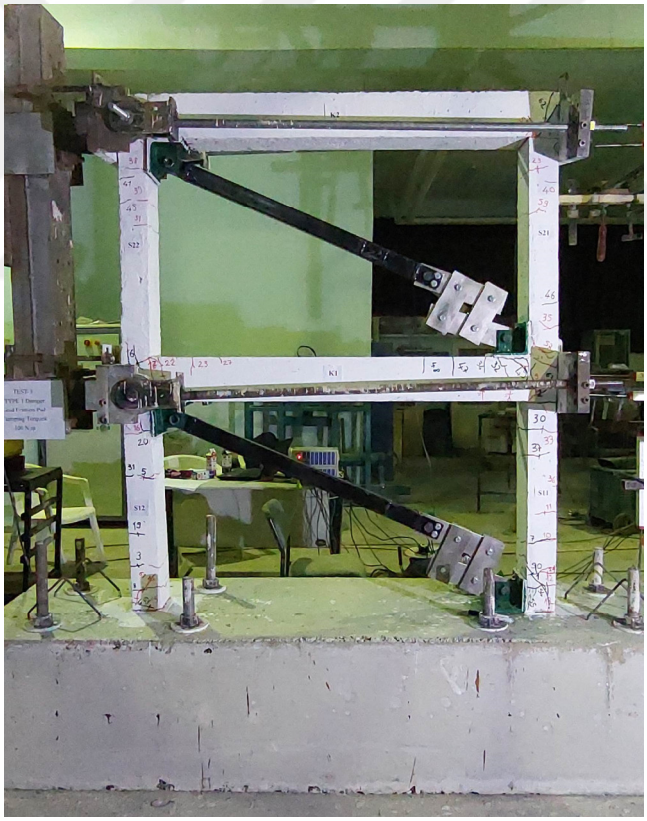
Yükleme protokolüne göre, 9. çevrimin negatif (çekme) adımında sistemin akmasını sağlayan -4518 kg (-45.18 kN) değerine kadar 500 kg (5kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken -29.42 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, bu değerden sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla,

deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) yükleme pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 72.47 mm, negatif yönde -73.54 mm deplasman değerinde son verilmiştir. 14. çevrimin negatif (çekme) adımında bağlantı köşebentinin S11 kolonuna bağlayan ankraj bulonlarının betondan tamamen sıyrılmasıyla, 1. kat sönümleyici + braket elemanının fonksiyonu sınırlanmıştır. Grafiklerde pozitif yönde (itme) 55 mm tepe deplasmanı civarında dayanımda ani düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 3.118).





Şekil 3.115. T1-KRN deney çerçevesinde akmada oluşan çatlaklar ve yerleri (9. Çevrim)



Şekil 3.116. T1-KRN deney çerçevesinin akma sonrası görünüşü (9. Çevrim)

Akma çevriminde (9. çevrim) S12 kolonu - temel birleşim bölgesine bağlanan bağlantı köşebenti, 61 nolu 60º açıyla kesme çatlağının oluşmasıyla kolondan ayrılmaya başlamıştır. Bu çevrimde 61 nolu çatlak genişliği yaklaşık 2 mm'ye ulaştığı için yük düşüşü gözlemlenmiştir. Bu çevrimi takip eden diğer çevrimlerde, özellikle diyagonal elemanda çekme gerilmesi oluşturan pozitif (itme) adımlarında çatlak genişliği

büyümeye devam etmiştir. Deneydeki maksimum deplasman 15'inci negatif çevrimde -73.54 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise -19.20 kN olarak ölçülmüştür. Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.11'de verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.11. Tip 1 Kurşun numuneye ait çatlak ve hasarlara ait bilgiler

Deney: Deney-3 Tip 1 Kurşun (T1-KRN)			
Çevrim No	**Yük**	**Deplasman**	**Açıklama**
-1	-652	-1,36	İlk 2 çevrim ve 3. Çevrimin negatif yönünde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmedi. Akmaya kadar her çevrimde pozitif ve negatif yönlerde 500 kg artışlarla yatay yük artırıldı.
+1	+642	+1,21	
-2	-996	-3,53	
+2	+1138	+1,90	
-3	-1508	-4,88	
+3	+1500	+4,89	S11 kolonunun alt ucunda 10 cm yükseklikte 1 nolu çatlak, K1 ile birleşiminde kolon dış yüzünde 2 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun iç yüzünde 25 cm yükseklikte iç yüzde 7 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminde dış yüzde 4 nolu çatlak, 10 cm yükseklikte dış yüzde 8 nolu çatlak, alt ucundan 20 cm yükseklikte 3 nolu çatlak, 50 cm yükseklikte iç yüzde 5 nolu çatlak oluştu. S22 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 6 nolu çatlak oluştu.
-4	-2060	-6,88	S11 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 9 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunda 7 nolu çatlağın karşısında dış yüzde 10 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun 45 cm yüksekliğinde dış yüzde 11 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunda 1 nolu çatlağın karşısında dış yüzde 12 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel birleşiminde dış yüzde 13 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunda 4 ve 8 nolu çatlakların karşısında iç yüzde 14 ve 15 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonunun üst ucunda dış yüzde 16 nolu çatlak oluştu. S22 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 17 nolu çatlak oluştu. S21 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 18 nolu çatlak oluştu.
+4	+2000	+6,25	S12 kolonunun temel birleşiminden 30 cm yükseklikte dış yüzde 19 nolu çatlak, K1 kirişi ile birleşiminde iç yüzde 20 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2 kirişi birleşiminde dış yüzde 21 nolu çatlak oluştu.
-5	-2550	-8,76	K1 kirişinin sol ucunda üst yüzde10 cm aralıklarla 22 ve 23 ve 27 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 28 nolu çatlak, üst ucunda 29 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda alt yüzde 25 ve 26 nolu çatlaklar oluştu. S11 kolonunun temel birleşiminden 30 cm yükseklikte dış yüzde 24 nolu çatlak oluştu.
+5	+2550	+8,60	S11 kolonunun üst ucunda iç yüzde 30 nolu çatlak, dış yüzde 33 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunda 60 cm yükseklikte 5 nolu

			çatlak karşısında, dış yüzde 31 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 32 ve 34 nolu çatlaklar oluştu.
-6	-3040	-11,30	S21 kolonunun alt ucunda dış yüzde 35 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun orta bölgesinde dış yüzde 50 cm yükseklikte 36 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun 60 cm yüksekliğinde iç yüzde 37 nolu çatlaklar oluştu.
+6	+3000	+11,80	S22 kolonunun üst ucunda iç yüzde 38 ve 39 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun üst ucunda dış yüzde 40 nolu çatlaklar oluştu.
-7	-3540	-14,90	S22 kolonunun üst ucunda dış yüzde 41 ve 45 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 42, 43 ve 44 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun alt ucunda dış yüzde 46 nolu çatlak oluştu.
+7	+3514	+15,56	K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 47, 48, 49 nolu çatlaklar oluştu. S11 kolonunun alt ucunda 15 cm yükseklikte iç yüzde 50 nolu çatlak oluştu.
-8	-4000	-19,95	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar genişledi.
+8	+4000	+20,91	5 nolu çatlak genişledi. 3 ve 8 nolu çatlaklar dallandı ve uzadı. S22 kolonunun üst ucunda 51 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminde 53 nolu çatlak ve iç yüzünde üst uçta 52 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel ile birleşim bölgesinde 60º açıyla 54 nolu kesme çatlağı ve 55 nolu çatlak oluştu.
-9	-4518	-29,42	16 ve 24 nolu çatlaklar dallandı. 26 ve 27 nolu çatlaklar uzadı. S21 kolonunun K1 kirişi ile birleşminde 57 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde 58 nolu çatlak, orta bölgede iç yüzde 59 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel birleşim bölgesinde 60º açıyla 61 nolu kesme çatlağı oluştu. S22 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde 60 nolu çatlak oluştu.
AKMA GERÇEKLEŞTİ. DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
+9	+4300	+30,63	8, 20, 32 ve 54 nolu çatlaklar genişledi ve uzadı. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 62 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 63 ve 65 nolu çatlaklar oluştu. 63 nolu çatlak, 9 nolu çatlakla birleşti. S22 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 64 nolu çatlak oluştu.
-10	-4200	-35,88	17 nolu çatlak genişledi. S12 kolonunun üst ucunda dış yüzde 67 nolu çatlak oluştu ve dallandı. S12 kolonunun temel birleşiminde 66 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde 69 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel birleşim bölgesinde dış yüzde, 68 nolu çatlak oluştu.
+10	+4400	+35,24	S11 kolonunun bağlantı köşebenti bağlı olan temel birleşiminde 54 nolu kesme çatlağı 3-4 mm genişledi.
-11	-4300	-40,60	Mevcut çatlaklar genişledi, yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
+11	+4515	+40,24	
-12	-4380	-45,70	
+12	+4790	+45,37	S11 kolonunun temel birleşimindeki 54 nolu kesme çatlağı 5 mm genişliğe ulaştı.
-13	-4350	-50,70	S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşimindeki 9 nolu çatlak 2 mm genişliğe ulaştı. S11 kolonunun temel birleşimindeki 54 nolu kesme çatlağı genişlemeye devam etti. Diyagonal brakette çekme gerilmesi oluşturan çekme adımlarında, plastik mafsalın da gelişmesiyle birlikte bağlantı köşebentini bu

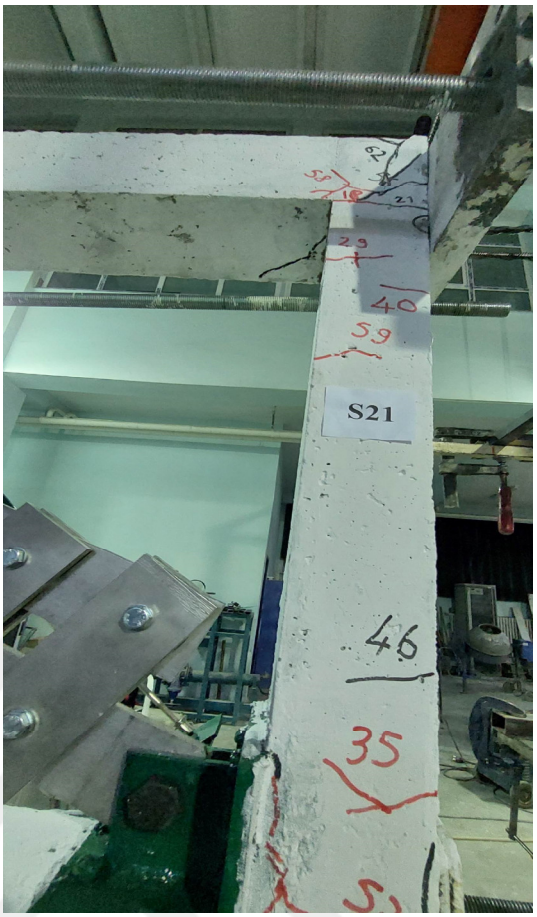
			bölgeye kenetleyen ankraj bulonları betondan sıyrılmaya başladı. Bu nedenle dayanımda düşüş gözlemlendi.
+13	+4300	+50,22	S11 kolonuna bağlanan köşebent 54 nolu kesme çatlağının gelişip betonun dağılmasıyla 1 cm genişliğinde ayrıldı. Bu nedenle 1. kat sönümleyici cihazın çalışması azaldı. S12 kolonunun temel birleşiminde 61 nolu kesme çatlağını kesen, zıt yönde 70 nolu kesme çatlağı oluştu.
-14	-2700	-65,56	1. kat braket + sönümleyici cihazını S11 kolonuna bağlayan ankraj bulonları betondan tamamen sıyrıldı. Bu bölgedeki beton kesit dağıldı. 1. kat sönümleyicisinin fonksiyonu sona erdiğinden ve kolondaki plastik mafsalın gelişmesinden dolayı dayanımda ani düşüş gözlemlendi. Bu nedenle deplasman artışı 15 mm' ye çıkarılarak hasar mekanizmasının gelişimi gözlemlendi. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. S12 kolonunun temel birleşimindeki 61 nolu kesme çatlağı 5 mm genişliğe ulaştı. S12 kolonunun uçlarında büyük dönme açıları oluştuğu görüldü.
+14	+4786	+65,50	S11 kolonundan ayrılan 1. kat sönümleyici + braket eleman bir önceki çevrimde çekme etkisiyle uzama gösterdiğinden, itme adımında basınç gerilmeleri altında sıkıştığından, çalışmaya devam etti ve betonarme çerçeve dayanımının bu yöndeki değerini koruduğu gözlemlendi.
-15	-1920	-73,54	S11 kolonundaki bağlantı köşebenti temel ve kolondan tamamen ayrıldı. S12 kolonunun temel birleşimindeki kesme çatlağı 10-15 mm genişliğe ulaştı.
+15	+2613	+72,47	%4'lük göreli öteleme oranına ulaşıldığından deneye son verildi.

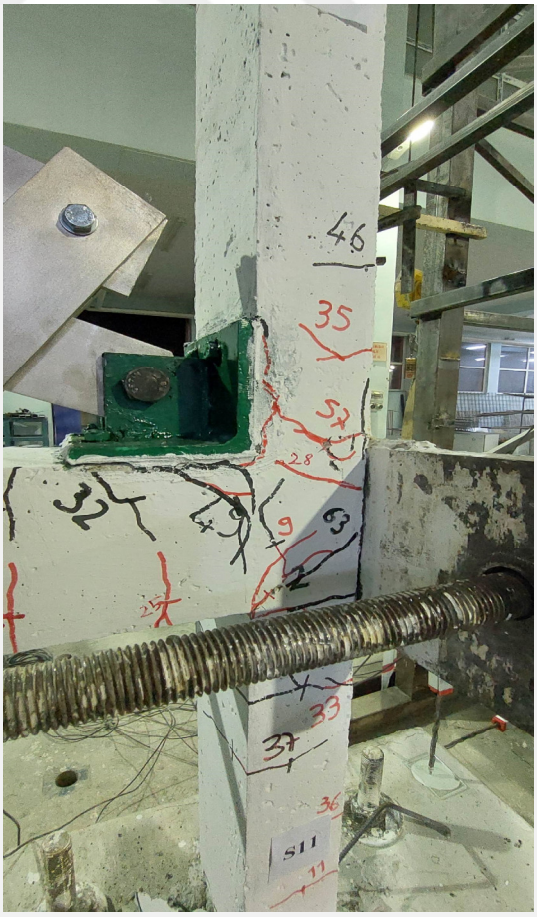
Çalışmadaki betonarme çerçevelerde kolonlar, kirişlerden hareket yönünde daha zayıf olduğundan plastik mafsallar çoğunlukla kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Çatlakların dağılımı referans çerçeve numuneye göre daha dağınıktır. Referans çerçevede kiriş uçlarında herhangi bir hasar görülmemişken, Tip 1 kurşun numunesinde kiriş uç bölgelerinde çatlaklar görülmüştür. Referans çerçevede çatlaklar yığılı plastik davranışa özgü yayılım gösterirken, Tip 1 kurşun numunesinde çatlak yayılımı daha geniş bir bölgede meydana gelmiştir. Referans numune maksimum deplasmanda henüz taşıma gücünü kaybetmemiştir. Tip 1 kurşun numunesinin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 46.13 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (14. çevrim) 21.60 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 47.97 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (14. çevrim) 26.67 kN değerine düşmüştür. Deney çerçevesi maksimum deplasmanda, ulaştığı en büyük dayanımın pozitif yönde %53.17'sini, negatif yönde %44.40'ını kaybetmiş, böylece deney sonunda her iki yönde de önemli bir yük kaybı gerçekleşmiştir, dolayısıyla süneklik oranı referans numuneye göre küçüktür.

İlk çevrimlerde yatay yük az ve betonarme çerçeve etkiyen yüke karşı rijit olduğundan sönümleyicilerde hareket oluşmamıştır. İlk çatlakların oluşmasıyla, sönümleyiciler de harekete geçmiştir. Toplam yatay yükün daha fazla olduğu 1. katta, Tip 1 kurşun sönümleyici daha etkin çalışmıştır. Betonarme çerçevedeki 1. kat kolonlarında kesme çatlakları gelişinceye kadar (8. ve 9. çevrim) sönümleyicilerin itme ve çekme adımlarında etkili çalıştığı gözlenmiştir. Kolon-temel birleşiminde büyük kesme çatlaklarının (S11 kolonunda 54 ve 55, S12 kolonunda 61 nolu çatlaklar) oluşmasıyla betonarme çerçeve yumuşamış ve sönümleyicilerin çalışması kısıtlanmıştır.

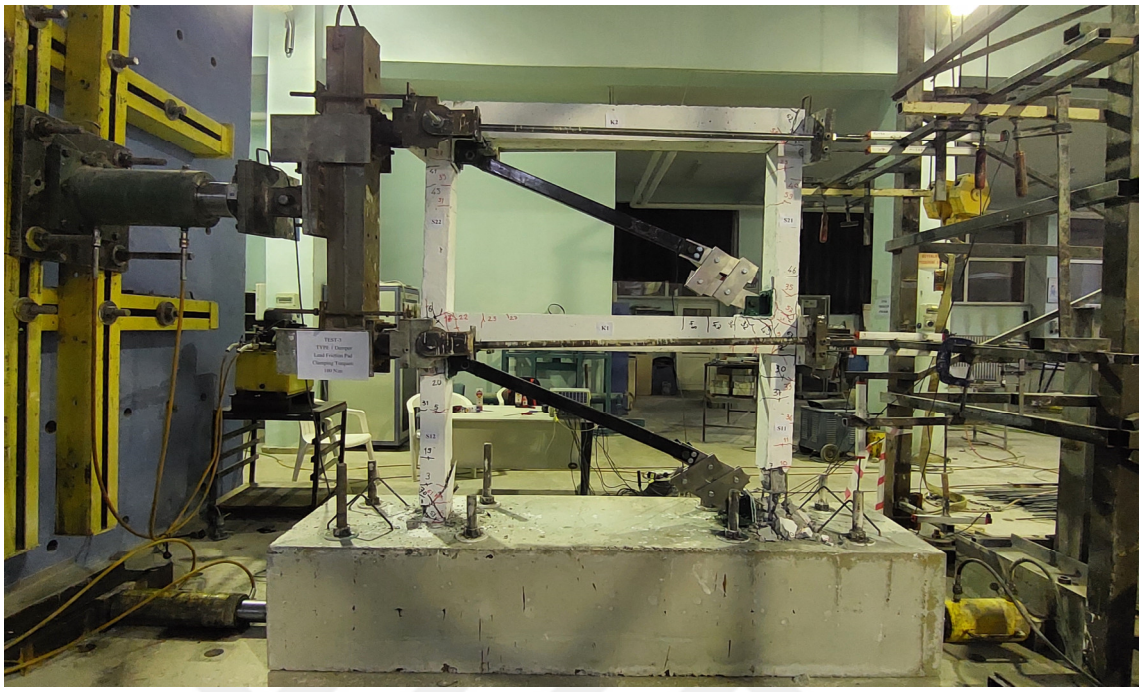
Şekil 3.118'de maksimum deplasman değerinde kolon, kiriş ve birleşim bölgelerinde çatlak ve hasar durumları verilmiştir. Fotoğraflardan görülebileceği gibi genel itibariyle ötelenme ve çatlak gelişiminin büyük bir kısmı 1. kat elemanlarında yoğunlaşmıştır (Şekil 3.117), (Şekil 3.118). Deneyin son çevrimlerinde kolonların temel ile birleşim bölgeleri kesme hasarına uğramış ve bu bölgede beton dağılmıştır. Deney başında eğilme çatlakları oluşan kolon-temel birleşimleri, ilerleyen çevrimlerle beraber çatlamakta ve yumuşamaktadır. Bu bölgelerdeki kolon kesitinin çatlayıp zayıflaması ve diyagonal braket + sönümleyici elemanın oluşturduğu çekme etkileri, kolon-temel birleşimlerini kesme hasarına zorlamaktadır. Diyagonal braket + sönümleyicide çekme gerilmesi oluşturan pozitif adımlarda, önce sönümleyicinin bağlı olduğu köşebentteki ankraj dübellerinin çekme etkisi nedeniyle S11 kolonu temel birleşiminde 60º açılı kesme çatlakları (8. çevrimde 54 ve 55 nolu çatlaklar) oluşmuş ve takip eden itme adımlarında bu çatlak genişlemiştir. Çerçevenin temel ile bağlanan kolon kesitlerinde kesme kapasitesinin düşüşüyle birlikte 9. çevrimde S12 kolonunun temel birleşiminde de 61 nolu kesme çatlağı oluşmuştur (Şekil 3.117), (Şekil 3.118). 13. ve 14. adımlarda S11 kolonuna ankrajlanan bağlantı köşebenti kolondan tamamen sıyrılmış, etkinliği sona ermiştir. Bu nedenle yükte 50-55 mm tepe deplasmanlarında ani bir düşüş gözlenmektedir. Deneyin geri kalan kısmında çevrim adımları 10 mm deplasman artışıyla ilerleyerek %4 tepe ötelenmesinde deney sonlandırılmıştır. Şekil 3.118'de Tip 1 kurşun çerçeve numunenin deney sonu genel görünüşü, Şekil 3.117'de ise bu çatlak ve hasarların yerleri ayrıntılı verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

S22


S21


S11

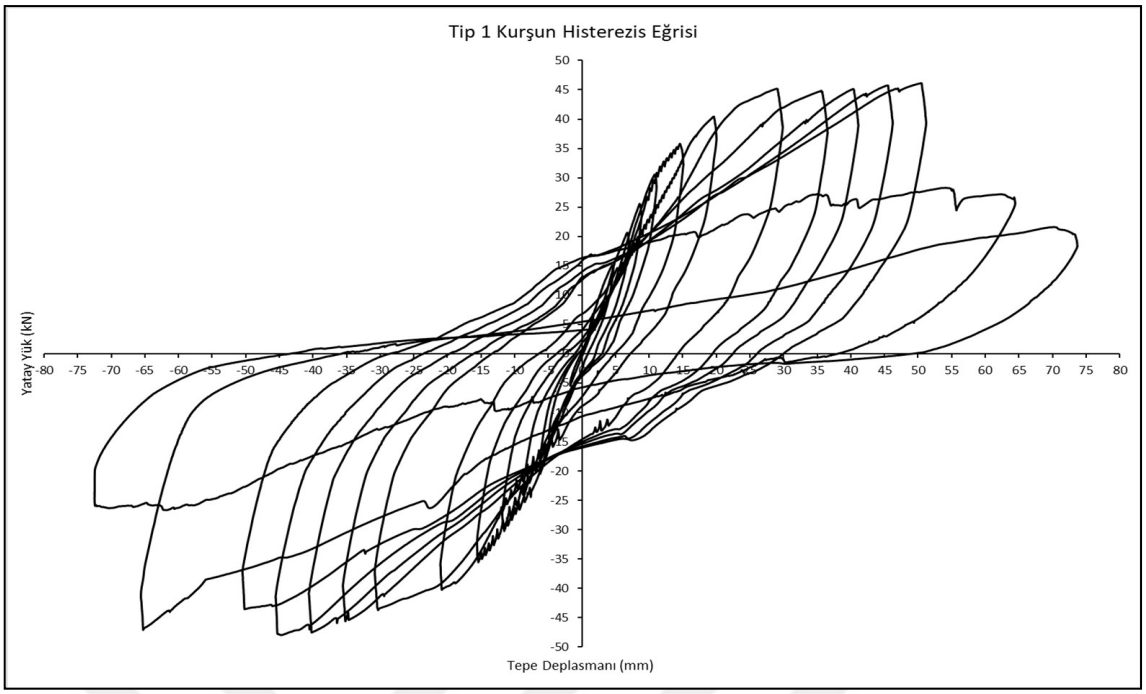
3.117. T1-KRN deney çerçevesinde deney sonu hasar ve çatlaklar



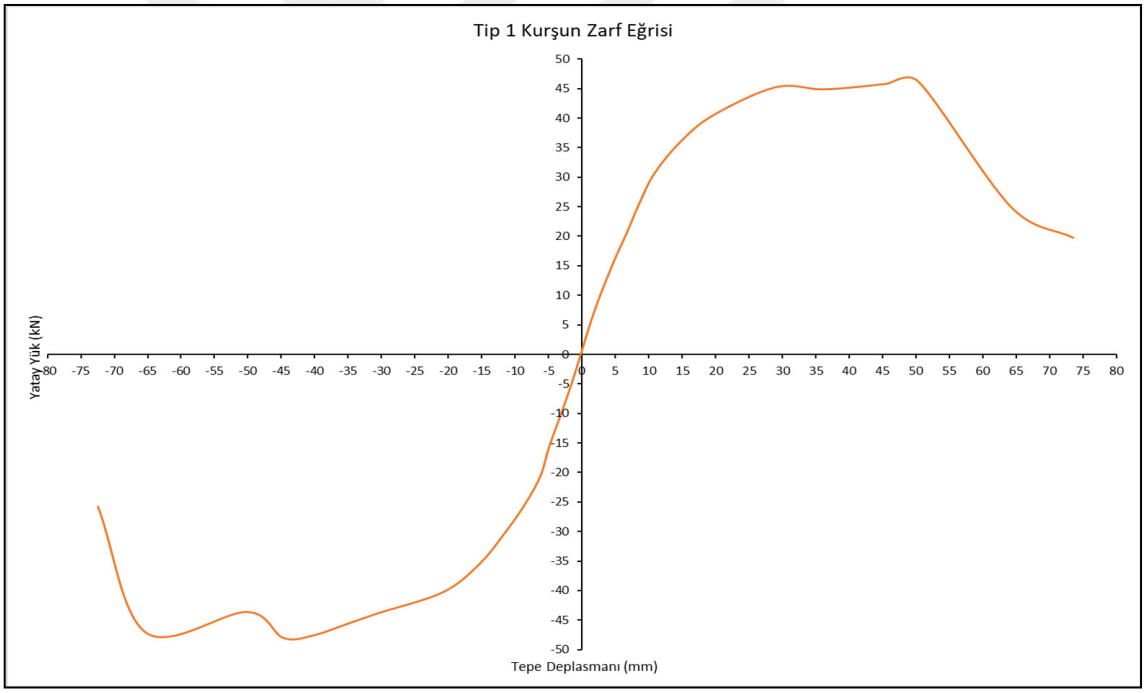
3.118. T1-KRN deney çerçevesinde deney sonu görünüş

Tip 1 kurşun numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

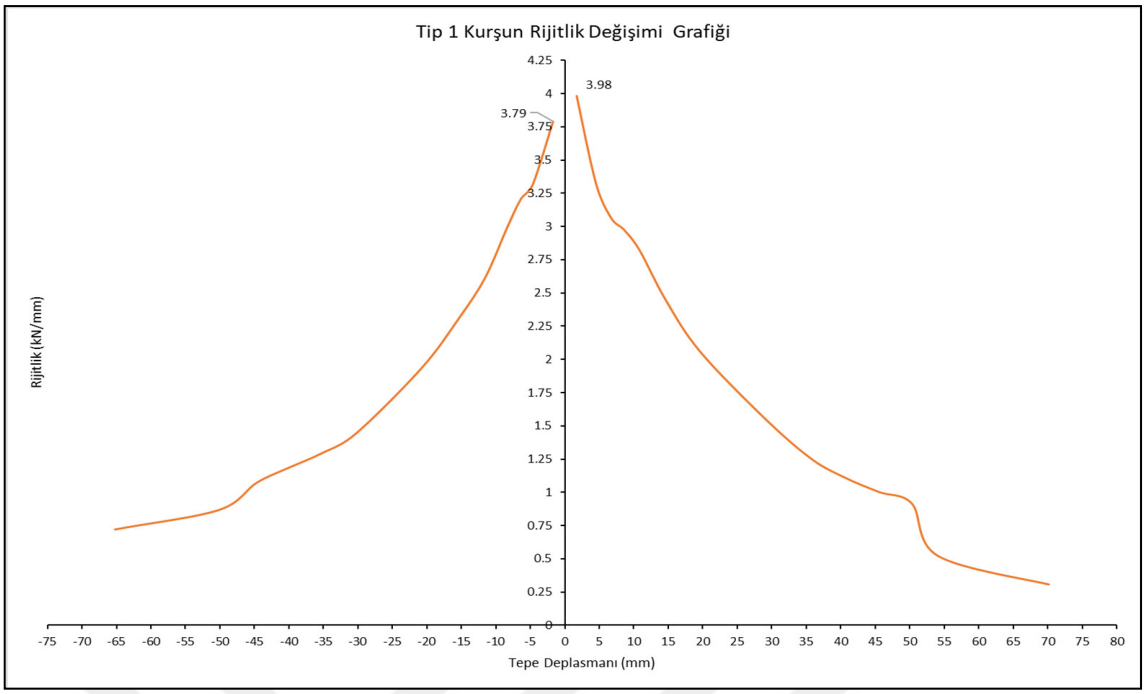
1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.119'da,
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.120'de
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.121'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.122'de,
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil 3.123'de,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.124'de,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.125'de gösterilmiştir.



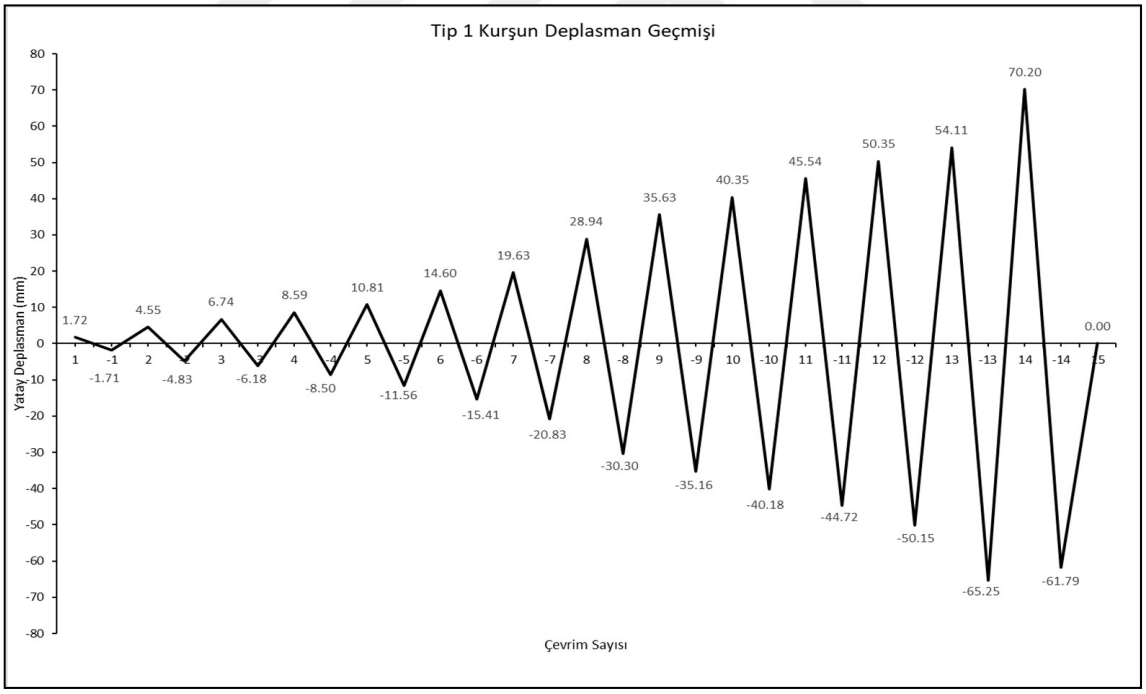
3.119. T1-KRN deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



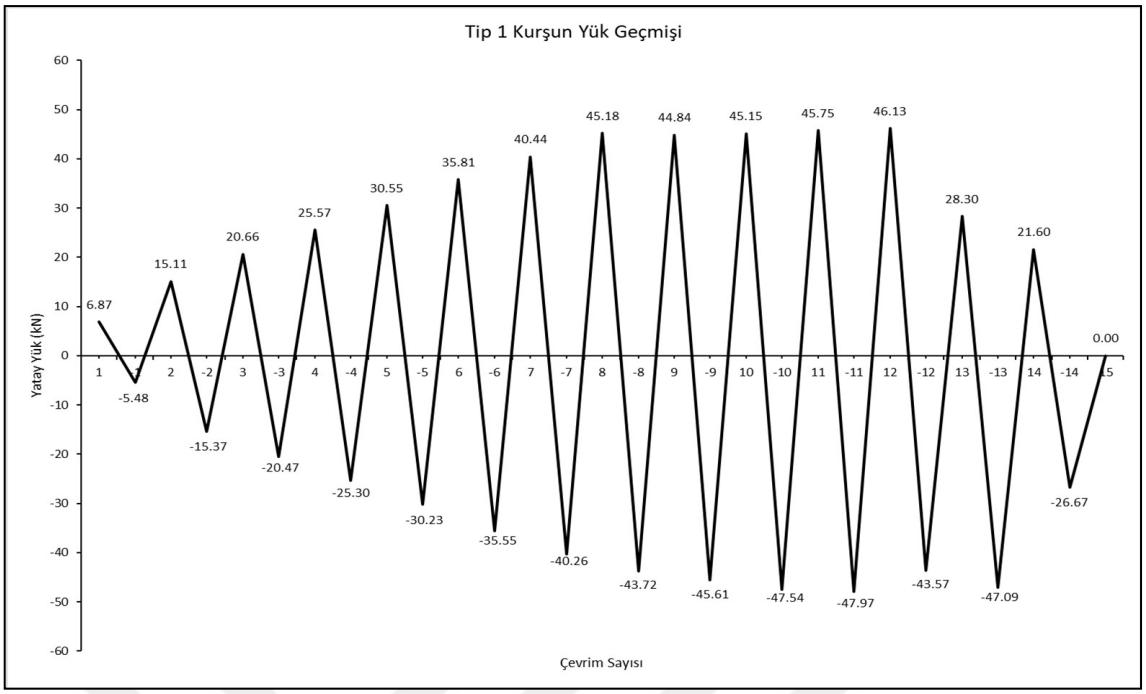
3.120. T1-KRN deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı zarf eğrisi



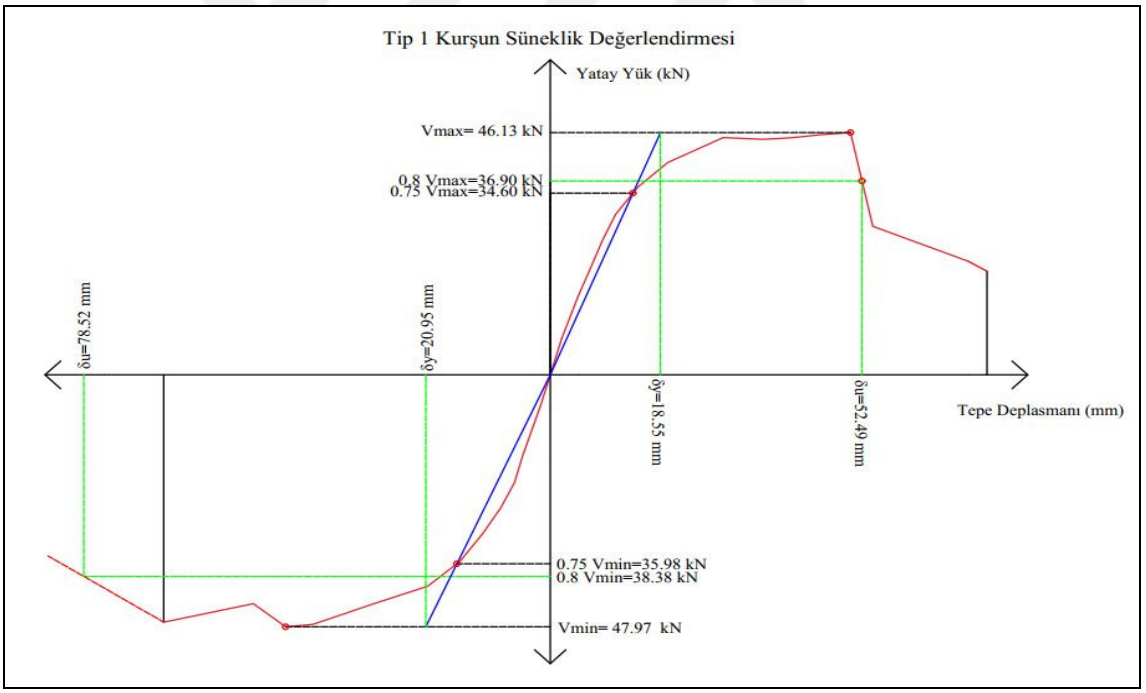
3.121. T1-KRN deney çerçevesine ait rijitlik değişimi grafiği



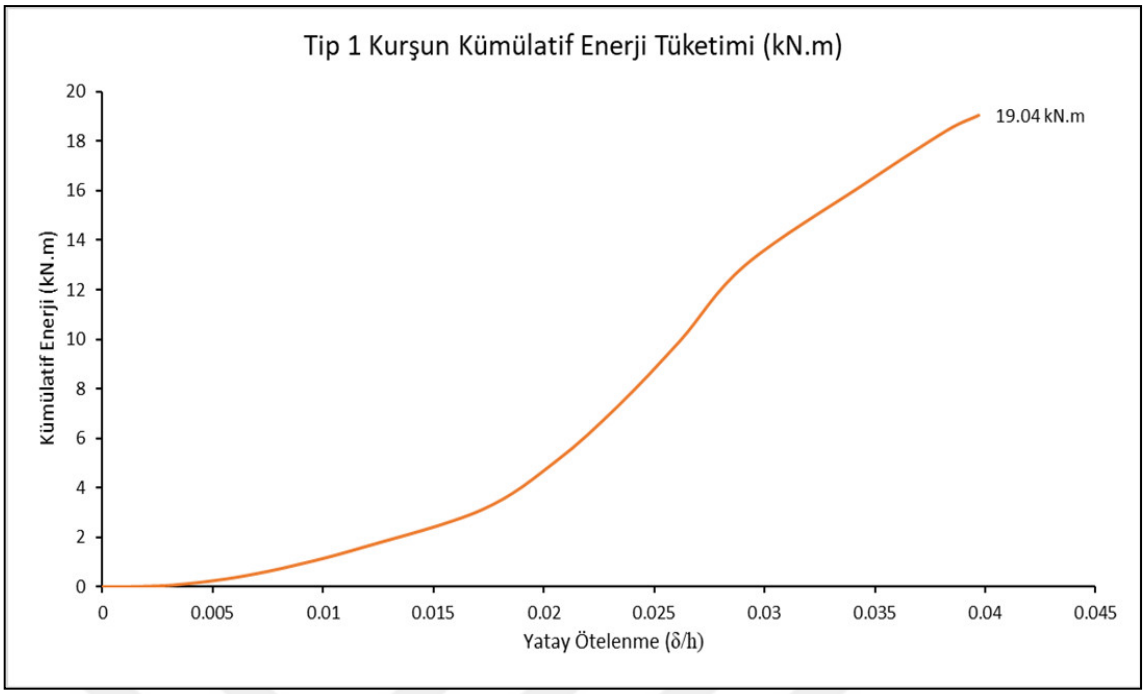
3.122. T1-KRN deney çerçevesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



3.123. T1-KRN deney çerçevesine ait yük geçmişi (Taban kesme kuvvetine göre)



3.124. T1-KRN deney çerçevesine ait süneklik değerlendirilmesi grafiği



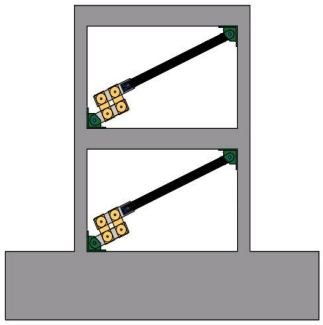
3.125. T1-KRN deney çerçevesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak Tip 1 kurşun çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.125'deki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.121'de gösterilmiştir. Şekil 3.124'de süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir.

3.11.4. Deney-4 (T1-PRÇ)

Deney-4'de test edilen betonarme çerçeve numune, beton, donatı, boyut ve kusurlar açısından referans çerçeveyle aynı özellikleri olan, her iki katında da pirinç sürtünme pedli Tip 1 sürtünme sönümleyiciyle rehabilite edilmiş betonarme çerçevedir. Tip 1 sürtünme sönümleyici, çelik bir braket eleman ile kat çerçevesine köşelerden diyagonal şekilde monte edilmektedir. Her katta aynı yönde, birer adet olacak şekilde, çerçeve deney numunesine toplamda 2 adet sönümleyici ilave edilmiştir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.12'de verilmiştir.

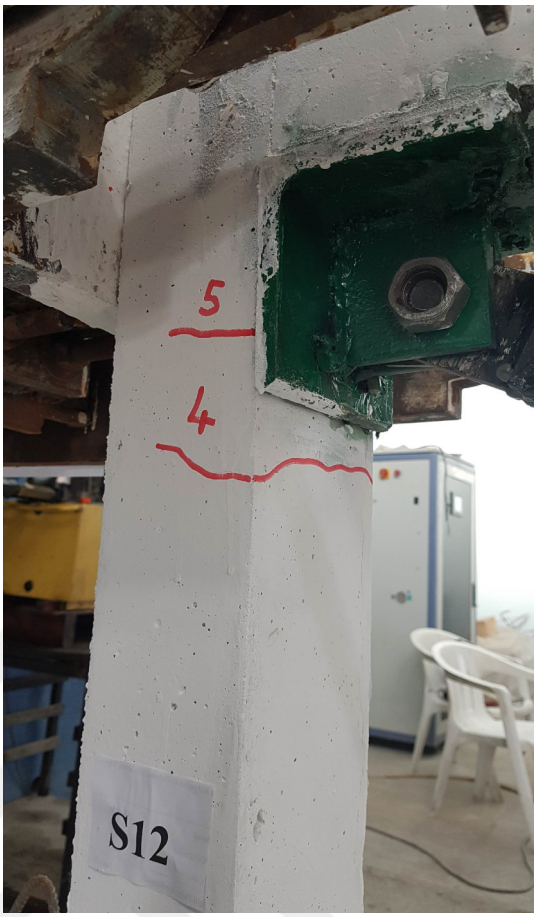
Çizelge 3.12. T1-PRÇ deney çerçevesinin temel özellikleri

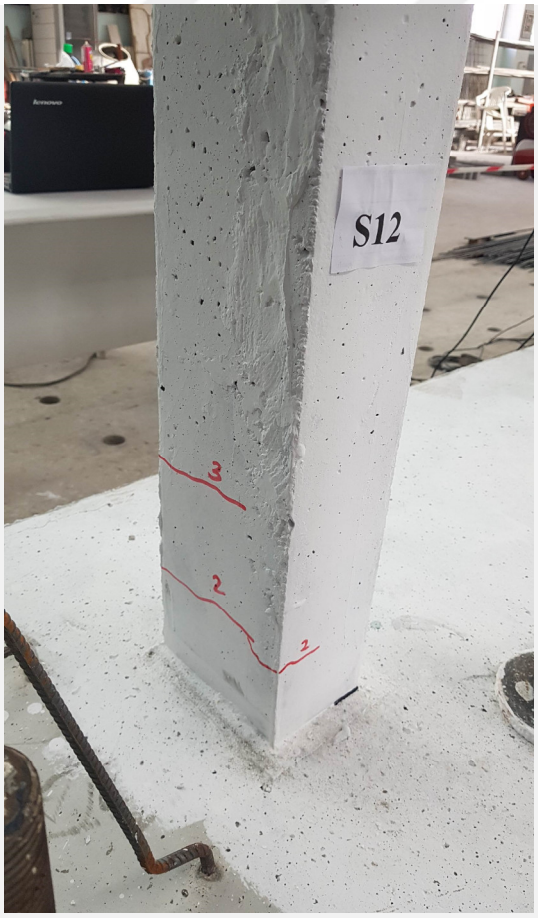
Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-4 Tip 1 Pirinç		17~18	Tip 1 Sönümleyici Diyagonal Braketli	Pirinç Sürtünme Pedi (100 Nm Sıkıştırma Torku)

Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, referans numunede olduğu gibi düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90° bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Tip 1 pirinç (T1-PRÇ) numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 3.126'da verilmiştir.

Şekil 3.126. T1-PRÇ deney çerçevesinde deney öncesi görünüş

S11


5
4
S12


S12
3
2
1

S22
7
8

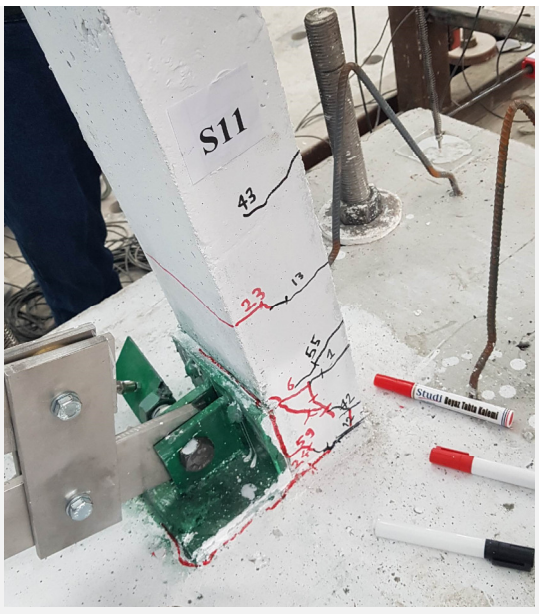
Şekil 3.127. T1-PRÇ deney çerçevesinde oluşan ilk çatlaklar ve yerleri (3. Çevrim)

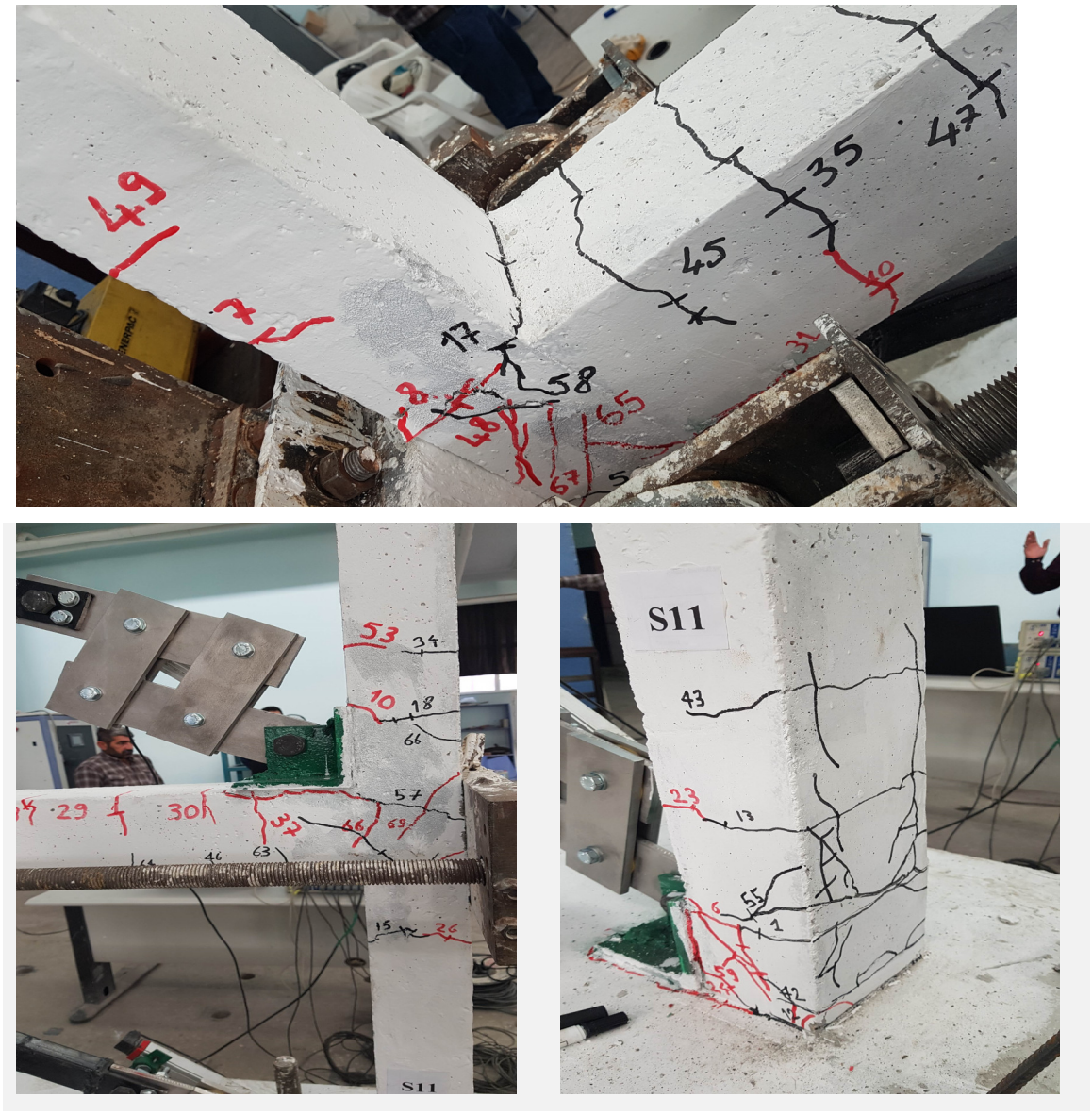
Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 3. çevrimin pozitif (itme) adımında 15,60 kN yükte ve 3,50 mm tepe deplasmanında S11 kolonu temel birleşim bölgesinde, dış yüzde görülmüştür (Şekil 3.125). Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.135 ve Şekil 3.136'da gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü referans çerçeve için deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Betonarme çerçeveye diyagonal sönümleyici + braket elemanı eklendiğinden toplam yatay rijitlik ve dayanım bir miktar artmaktadır. Bu nedenle boş referans çerçevenin aktığı yükten daha büyük bir yükte (dolayısıyla daha ileri bir çevrimde) akmanın gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Akmanın gerçekleştiği 8. çevrimin pozitif

(itme) adımından sonra yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollü yüklemeye çevrilmiştir.

Yükleme protokolüne göre, 8. çevrimin pozitif (itme) adımında sistemin akmasını sağlayan 3979 kg (39.79 kN) değerine kadar 500 kg (5 kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken 20.94 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, bu değerden sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla, deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) yükleme pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 73.48 mm, negatif yönde -72.66 mm deplasman değerinde son verilmiştir.





Şekil 3.128. T1-PRÇ deney çerçevesinde akma sırasında oluşan çatlaklar

Şekil 3.129. T1-PRÇ deney çerçevesinde akma adımında ön ve arka görünüş

Akma çevriminde S12 kolonu – K1 kirişi birleşim bölgesinde 45º açıyla 65 ve 67 nolu çatlaklar oluşmuştur. Bu çevrimde kolon ve kiriş birleşim bölgelerinde yaygın bir çatlak dağılımı gözlemlenmiştir (Şekil 3.128), (Şekil 3.129). Bu çevrimi takip eden diğer çevrimlerde, özellikle diyagonal elemanda çekme gerilmesi oluşturan negatif (çekme) adımlarında çatlak genişlikleri büyümeye devam etmiştir. Deneydeki maksimum deplasman 16'ncı negatif çevrimde -73.48 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise -28.90 kN olarak ölçülmüştür. Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.13'de verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.13. T1-PRÇ deney çerçevesine ait çatlak ve hasarlara ait bilgiler

Deney: Deney-4 Tip 1 Pirinç (T1-PRÇ)			
Çevrim No	**Yük**	**Deplasman**	**Açıklama**
+1	+645	+1,25	Deneyin ilk 2 çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmedi. Akmaya kadar her çevrimde pozitif ve negatif yönlerde 500 kg yük artışlarıyla kuvvet kontrollü yükleme protokolü izlendi.
-1	-655	-1,37	
+2	+1140	+2,30	
-2	-1000	-3,55	
+3	+1560	+3,50	S11 kolonunun temel ile birleşimine yakın kolon dış yüzünde 1 nolu çatlak oluştu.
-3	-1510	-4,90	S12 kolonunda temel birleşim bölgesinde 2,3 nolu S12 kolonunun K1 kiriş birleşim bölgesinde 4,5 nolu çatlaklar oluştu. S11 kolonunda 1 nolu çatlağın düzeyinde iç yüzde 6 nolu çatlak oluştu. S21 kolonu ile K1 kiriş birleşim bölgesinde 7 ve 8 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonu ile K2 kirişi birleşim bölgesinde 9 nolu çatlak oluştu. S21 kolonu ile K1 kirişi birleşim bölgesinde 10 nolu çatlak oluştu.
+4	+2070	+4,95	S12 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde dış yüzde 11 nolu çatlak oluştu. Yine S12 kolonunun temel ile birleşiminde 12, 14 nolu çatlaklar oluştu. S11 kolonunun alt ucuna yakın bir bölgede ve dış yüzde 13 nolu çatlak, üst ucunda K1 kirişi birleşim bölgesinde 15, 16 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde 18 nolu çatlak, K2 kirişi ile birleşiminde 19 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde 17 nolu çatlak, K2 kirişi ile birleşiminde 20 nolu çatlak oluştu.
-4	-2030	-7,75	S12 kolonunun temel birleşiminde ve dış yüzde 21 nolu çatlak, orta kısmında, dış yüzde ise 22 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun alt ucunda iç yüzde 23 nolu çatlak, üst ucunda sırasıyla 15 ve 16 nolu çatlaklara karşılık gelen dış yüzde 26 ve 27 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K2 kirişi ile birleşim bölgesinde 28 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin 2. kat köşebentinin bağlı olduğu (sağ) uçta, üst yüzde 29 ve 30 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişi ile 2. kat alt bağlantı köşebeti arasında 31 nolu çatlak oluştu.
+5	+2540	+7,30	13 ve 15 nolu çatlaklar uzadı, S12 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 5 nolu çatlağın karşısında 32 nolu çatlak oluştu. S12 kolonu alt ucunda, 20 cm yükseklikte, iç yüzde 33 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun alt ucunda dış yüzde 34 nolu çatlak, üst ucunda iç yüzde 36 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sol ucunda, mesnet yüzünün 20 cm uzağında, üst yüzde 35 nolu çatlak oluştu.
-5	-2560	-12,00	S11 kolonunun temel ile birleşimindeki 6 nolu çatlak dikey yönde ilerledi. S22 kolonu ile K1 kirişinin birleşiminde bulunan 7 ve 8 nolu çatlaklar ilerledi. K1 kirişinin sağ ucundaki 29 nolu çatlak ilerledi, bu bölgede 37 ve 38 nolu çatlaklar kiriş üst yüzünde oluştu. S21 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 39 nolu çatlak oluştu. S12 kolonu dış yüzündeki 22 nolu çatlak dallandı ve uzadı. K1 kirişinin sol ucunda, alt yüzde 40 nolu çatlak oluştu.
+6	+3190	+11,30	S12 kolonu üst kısmında 41 nolu çatlak oluştu. S11 kolonu

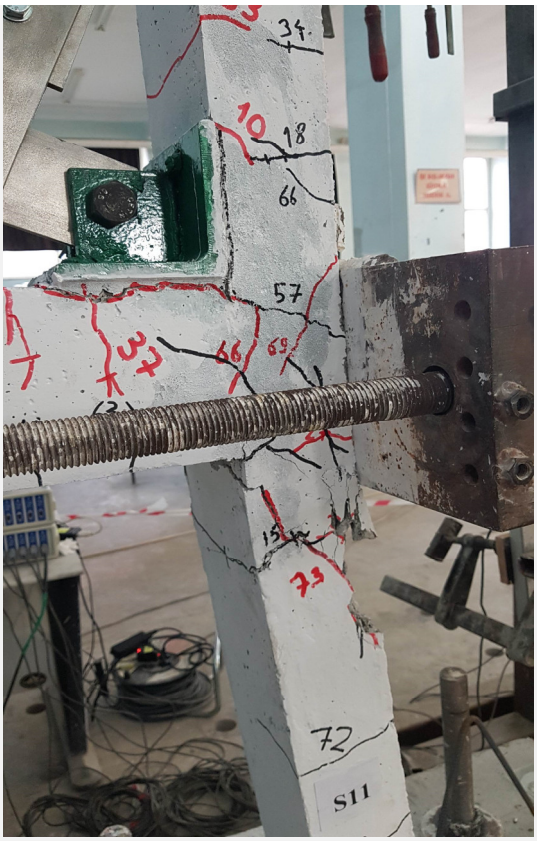
			dibinde 42 ve 43 nolu çatlaklar oluştu. S22 kolonu üst ucunda 44 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sol ucunda 45 ve 47 nolu çatlaklar oluştu, 35 nolu çatlak uzadı. K1 kirişinin sağ ucunda alt yüzde 46 nolu çatlak oluştu.
-6	-3060	-17,20	S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşim bölgesinde 45º açıyla 48 nolu kesme çatlağı oluştu. S22 kolonunun alt kısmında 49 nolu çatlak, S12 kolonuna montajlı köşebent bağlantısının 50 nolu çatlak ile ayrılmaya başladığı görüldü. S12 kolonunda 34 nolu çatlak karşısında 53 nolu çatlak oluştu. S22 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 51 ve 52 nolu çatlaklar oluştu. 8 numaralı çatlak gelişti.
+7	+3570	+15,15	S12 kolonunun temel birleşim bölgesinde 45º açıyla 54 nolu çatlak oluştu, 14 nolu çatlak ile birleşti. Yine S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşim bölgesinde 56 ve 58 nolu çatlaklar oluştu. Aynı kolondaki 41 ve 11 nolu çatlaklar gelişti. S11 kolonunda 1 ve 12 nolu çatlaklar gelişti. S11 kolonunun temel birleşimi bölgesinde 55 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 57 nolu çatlak oluştu.
-7	-3520	-24,40	S11 kolonu alt ucundaki bağlantı köşebenti kolondan ayrılmaya başladı, 59 nolu çatlak oluştu. 59, 6 ve 24 nolu çatlaklar bu bölgede birleşti. S12 kolonunun temel birleşim bölgesinde, dış yüzde 60 nolu çatlak oluştu.
+8	+3980	+20,95	S21 kolonunun orta kısmında, iç yüzde 61 nolu çatlak oluştu, K2 kirişiyle birleşim bölgesinde 65 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 62 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun alt ucundaki 55, 13, 1 ve 12 nolu çatlaklar uzadı. K1 kirişinin sağ ucunda, alt yüzde 63 ve 64 nolu çatlak oluştu.
AKMA GERÇEKLEŞTİ. DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
-8	-3810	-35,20	S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45º açılı 65 ve 67 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde, köşebent altında 66 nolu çatlak oluştu.
+9	+4520	+35,80	S12 kolonunda 41 çatlağı uzadı. S21 kolonunda 18 nolu çatlak uzadı ve dallandı. S22 kolonunun K2 ile birleşiminde 68 nolu çatlak oluştu.
-9	-3510	-40,10	S12 kolonunda 2, 3, 4, 5, 21, 22 nolu çatlaklar gelişti. S11 kolonunda 6, 23, 24, 59 nolu çatlaklar gelişti. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45º'li 69 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 70 nolu çatlak oluştu.
+10	+4395	+40,60	S12 kolonunun temel birleşiminde 71 nolu çatlak oluşumu ile birlikte dış yüzde, betonda basınç ezilmesi gözlendi. S12 kolonunda 45º'li 54 nolu kesme çatlağı uzadı ve genişledi. S12 kolonu ile K1 kirişinin birleşimindeki 58 nolu çatlak 2 mm genişledi. S11 kolonunda orta kısımda 72 nolu çatlak oluştu.
-10	-3550	-45,25	S11 kolonunun üst ucunda 73 nolu çatlak oluştu, 15 ve 26 nolu çatlaklarla birleşti. S12 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 8, 58, 48 nolu çatlaklar birleşti. S12 kolonunda 2 nolu çatlak 60 nolu çatlak ile birleşti. K1 kirişinin sağ ucunda, üstteki 29, 30, 37 nolu çatlaklar uzadı. K1 kirişinin sol ucundaki birleşimde 8, 48, 17 nolu çatlaklar genişledi. S11 kolonunun temel birleşiminde dış yüzde basınç ezilmesi oluştu.
+11	+4375	+45,60	S12 kolonunun temel birleşiminde 33 ve 54 nolu çatlaklar uzadı. Mevcut çatlaklar genişledi.

-11	-4515	-40,24	S11 kolonunun üst ucunda 73 nolu çatlak oluştu, 20 ve 15 nolu çatlaklar ile birleşti.
+12	+3480	+50,25	1. kat bağlantı köşebentleri betondan ayrılmaya başladı, çatlak genişliği 1-2 mm olarak ölçüldü. 1. kat kolonlarında dış yüzdeki boyuna donatılar boyunca çatlaklar oluştuğu görüldü.
-12	-4150	-50,10	S11 kolonu üst ucundaki 73 nolu çatlak uzadı. 1. kat kolonlarında boyuna donatılar boyunca çatlaklar gelişmeye devam etti. S11 kolonunun alt ucunda 74 nolu çatlak oluştu.
+13	+3590	+55,50	1. kat kolonlarında boyuna donatılar boyunca çatlaklar gelişmeye devam etti. Mevcut çatlaklar genişledi. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
-13	-4130	-55,80	
+14	+3270	+60,20	
-14	-3565	-60,55	
+15	+3150	+65,50	1. kat kolonları rijitlik kaybına uğradığı ve yumuşak kat oluştuğu için deplasmanın büyük bir kısmı 1. katta meydana geldi. Donatılar boyunca çatlaklar oluşmaya devam etti.
-15	-3120	-66,40	1. kat köşebentlerinde ayrılma çatlakları genişledi. (Çatlak genişliği 2-3 mm) S11 kolonunda dış yüzde yer yer kabuk betonu döküldü. S11 de 6, 55, 59 nolu çatlakların genişliği 4 mm genişleyerek plastik mafsal oluştu.
+16	+2650	+72,70	S12 kolonunda temel birleşiminde kabuk betonu döküldü. 33, 14, 12 nolu çatlaklar (3-4 mm) genişleyerek plastik mafsal oluşturdu.
-16	-2890	-73,50	16. çevrimde tepe deplasmana göre göreli ötelenme değeri %4'e ulaştığından deneye son verildi.

Çalışmadaki betonarme çerçevelerde kolonlar, kirişlerden hareket yönünde daha zayıf olduğundan plastik mafsallar çoğunlukla kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Çatlakların dağılımı referans çerçeve numuneye göre daha dağınıktır. Referans çerçevede kiriş uçlarında herhangi bir hasar görülmemişken, Tip 1 pirinç numunesinde kiriş uç bölgelerinde çatlaklar görülmüştür. Referans çerçevede çatlaklar yığılı plastik davranışa özgü yayılım gösterirken, Tip 1 karbonfiber numunesinde çatlak yayılımı daha geniş bir bölgede meydana gelmiştir. Referans numune maksimum deplasmanda henüz taşıma gücünü kaybetmemiştir. Tip 1 pirinç numunesinin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 45.13 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (16. çevrim) 28.90 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 38.06 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (15. çevrim) 26.43 kN değerine düşmüştür. Deney çerçevesi maksimum deplasmanda, ulaştığı en büyük dayanımın pozitif yönde %35.96'sını, negatif yönde %30.56'unu kaybetmiş, böylece deney sonunda her iki yönde de önemli bir yük kaybı gerçekleşmiştir, dolayısıyla süneklik oranı referans numuneden küçüktür.

İlk çevrimlerde yatay yük az ve betonarme çerçeve etkiyen yüke karşı rijit olduğundan sönümleyicilerde hareket oluşmamıştır. İlk çatlakların oluşmasıyla,

sönümleyiciler de harekete geçmiştir. Toplam yatay yükün daha fazla olduğu 1. katta, Tip 1 pirinç sönümleyici daha etkin çalışmıştır. Önceki deneylerde (T1-KBF, T1-KRN) meydana gelen ankraj bağlantılarındaki sıyrılma yaşanmamış, sönümleyiciler tüm deney boyunca çalışmıştır. Betonarme çerçevedeki 1. kat kolonlarının temel birleşimlerinde (7. çevrim ve 8. çevrim) ve 1. kat kolonlarının K1 kirişine bağlanan uçlarında (9. çevrim ve 10. çevrim) kesme çatlakları oluşuncaya kadar sönümleyicilerin itme ve çekme adımlarında etkili çalıştığı gözlenmiştir. Deney sonuna doğru kesme çatlaklarının gelişmesiyle betonarme çerçeve yumuşamış ve sönümleyicilerin çalışması azalmıştır. Son çevrimlerde 1. kat kolonlarının dış yüzlerinde donatılar boyunca çatlaklar oluşmuş ve yer yer kabuk betonu dökülmüştür. Deney sonunda 1. katta kat mekanizması oluşumu görülmüştür (Şekil 3.130, Şekil 3.131). Şekil 3.131'de Tip 1 pirinç çerçeve numunenin deney sonu (16. çevrim) itme ve çekmede genel görünüşü, Şekil 3.130'da ise bu çatlak ve hasarların yerleri ayrıntılı verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.


S11

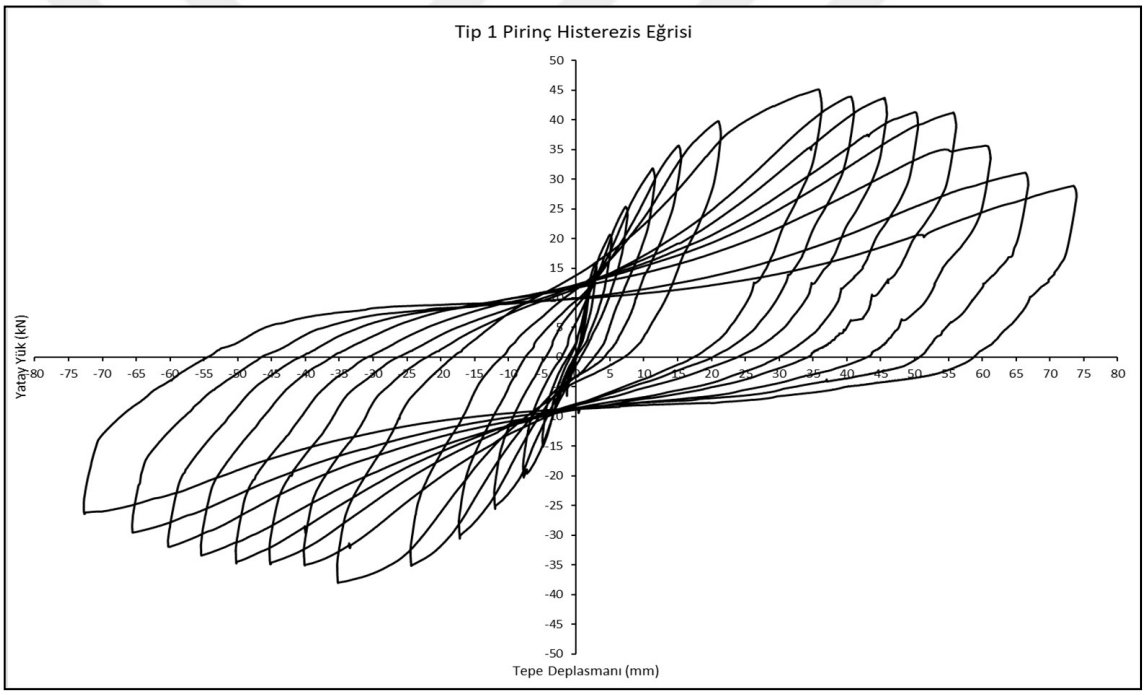
TYP
Brass
Clamp
S12

Şekil 3.130. T1-PRÇ deney çerçevesinde deney sonu hasar ve çatlaklar

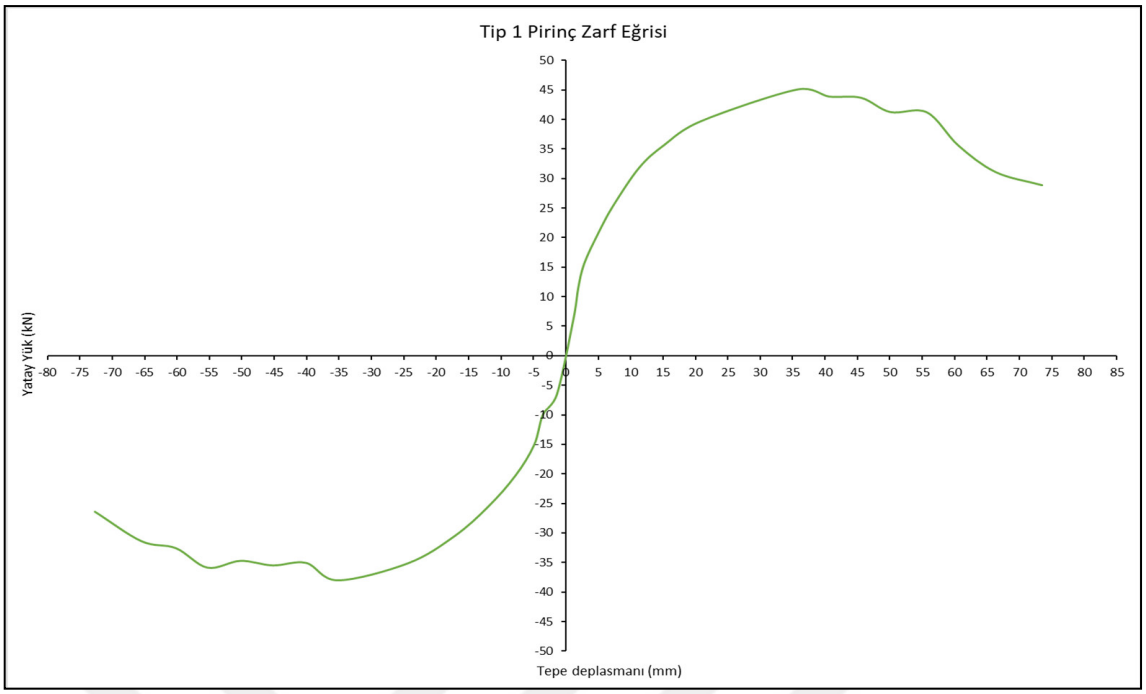
Şekil 3.131. T1-PRÇ deney çerçevesinin son çevrimde itme ve çekmede görünüşü (16. Çevrim)

Tip 1 pirinç numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

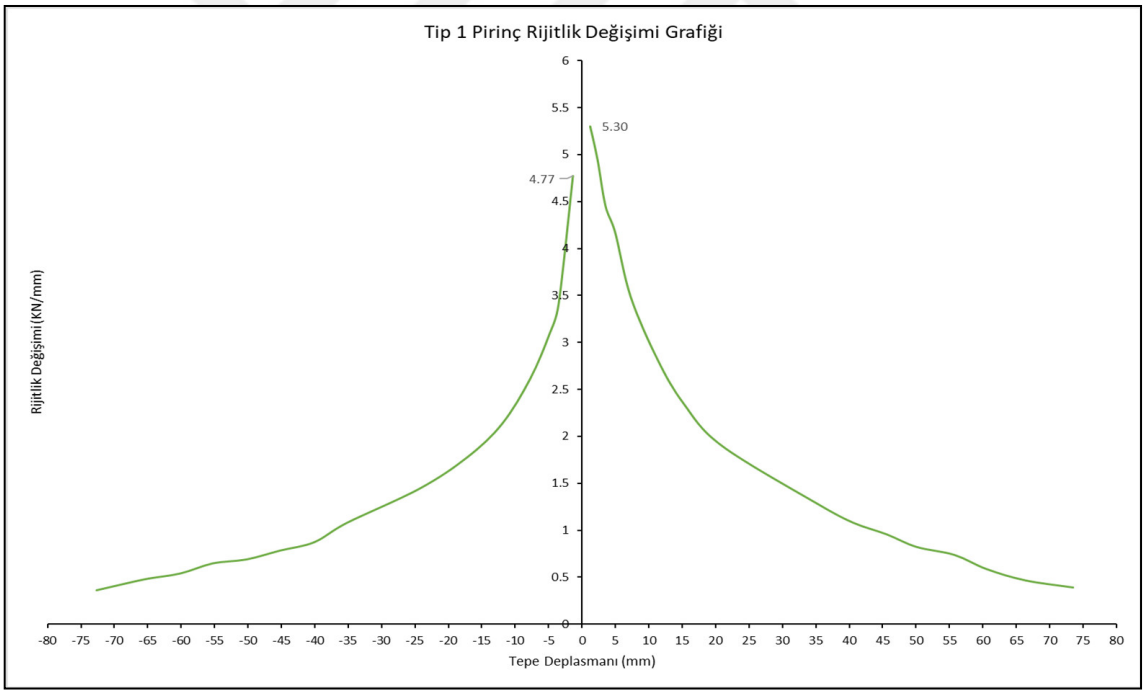
1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.132'de
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.133'de
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.134'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.135'de,
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil3.136'da,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.137'de,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.138'de gösterilmiştir.



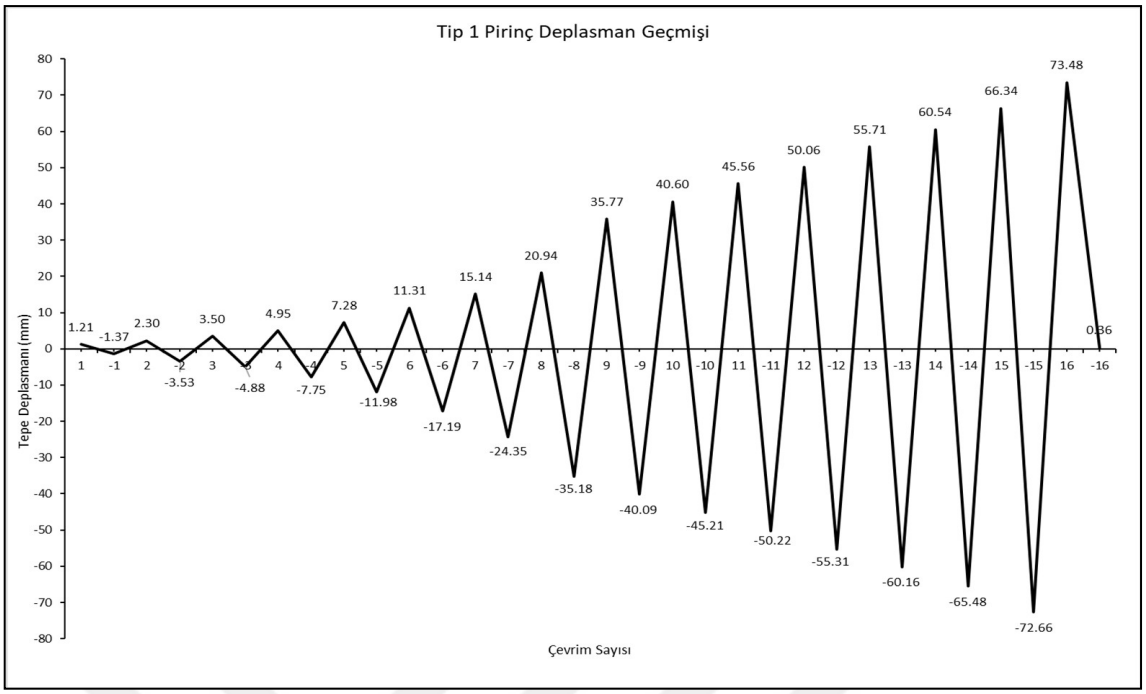
Şekil 3.132. T1-PRÇ deney çerçevesinin tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



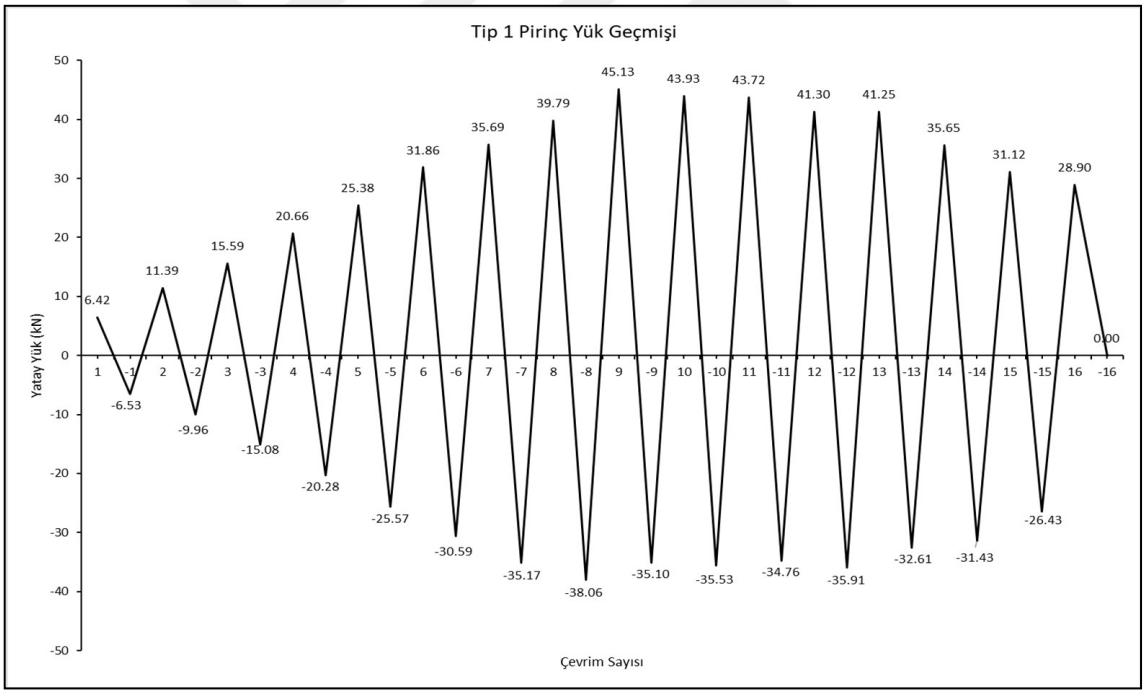
Şekil 3.133. T1-PRÇ deney çerçevesinin tepe deplasmanına bağlı zarf eğrisi



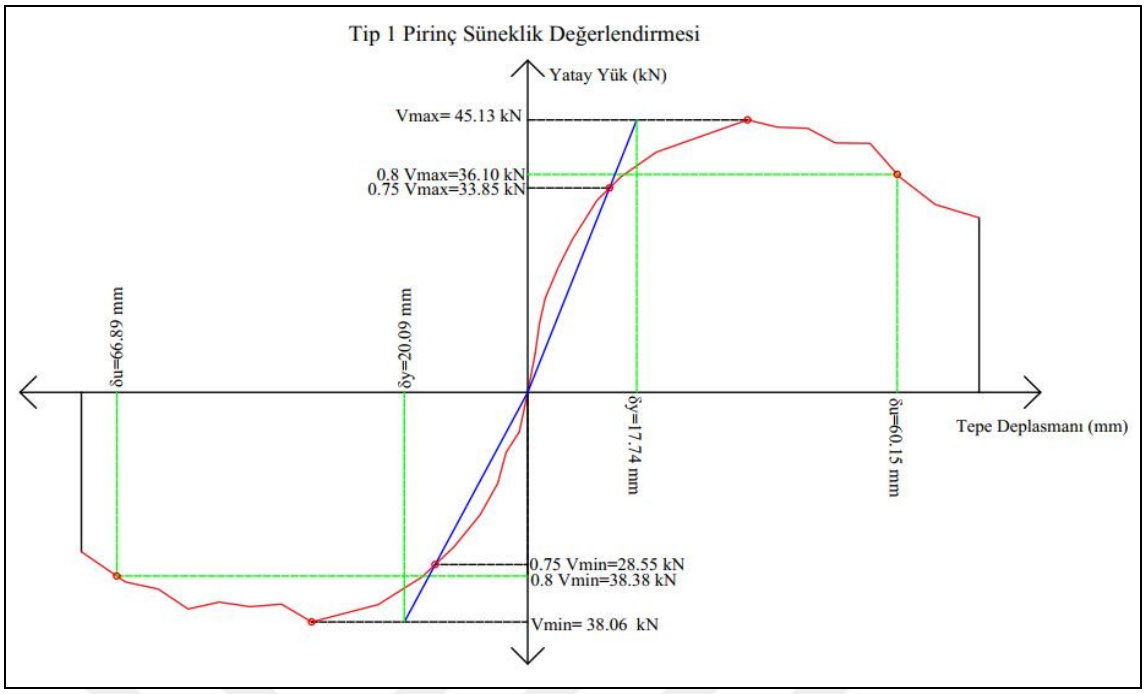
Şekil 3.134. T1-PRÇ deney çerçevesine ait rijitlik değişimi grafiği



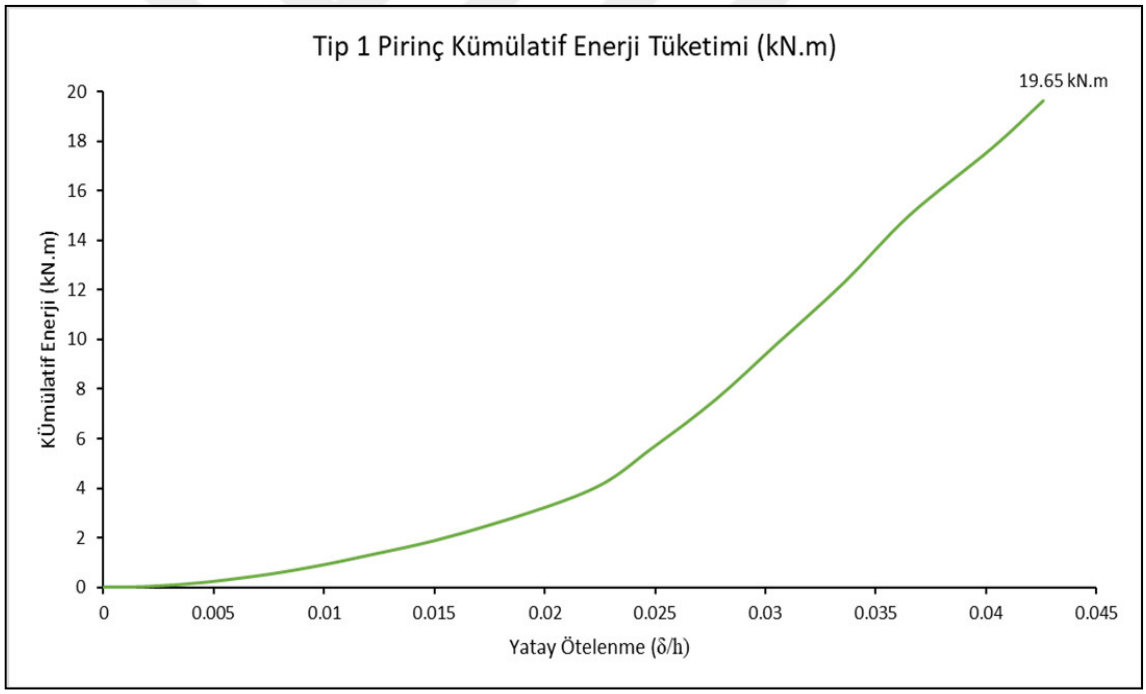
Şekil 3.135. T1-PRÇ deney çerçevesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



Şekil 3.136. T1-PRÇ deney çerçevesine ait yük geçmişi (Taban kesme kuvvetine göre)



Şekil 3.137. T1-PRÇ deney çerçevesine ait süneklik değerlendirmesi grafiği



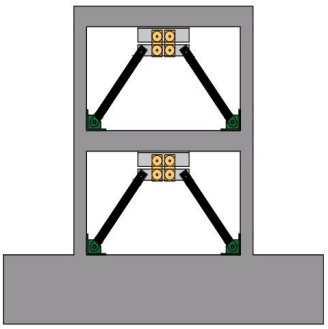
Şekil 3.138. T1-PRÇ deney çerçevesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak Tip 1 pirinç çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.138'deki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.134'de gösterilmiştir. Şekil 3.137'de süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir.

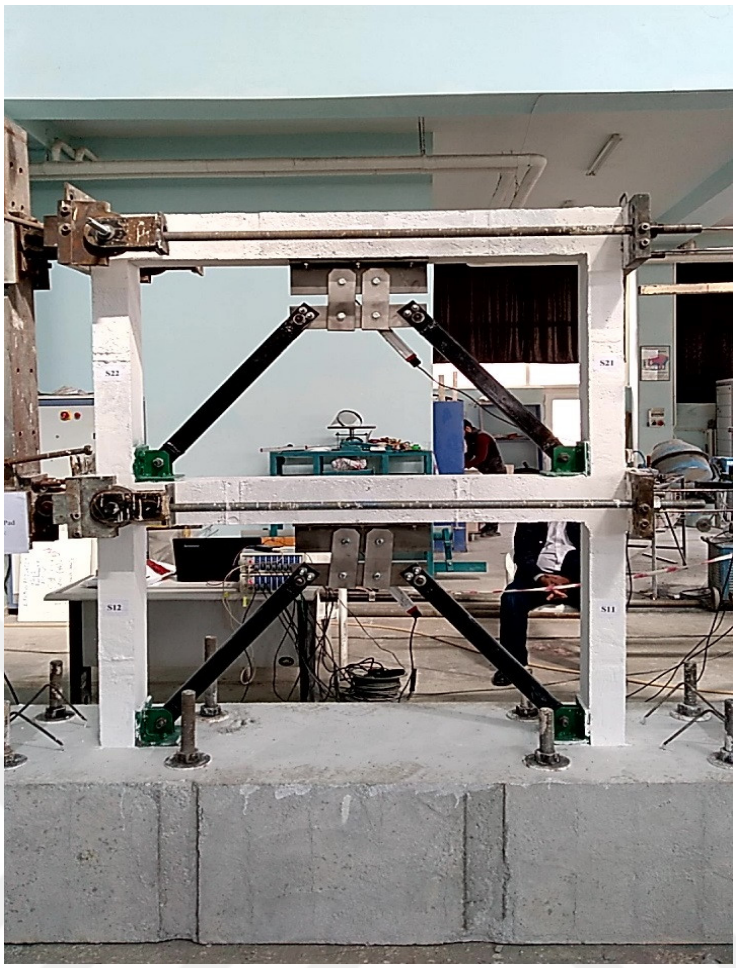
3.11.5. Deney-5 (T2-KBF)

Deney-5'de test edilen betonarme çerçeve numune, beton, donatı, boyut ve kusurlar açısından referans çerçeveyle aynı özellikleri olan, her iki katında da karbonfiber sürtünme pedli Tip 2 sürtünme sönümleyiciyle rehabilite edilmiş betonarme çerçevedir. Tip 2 sürtünme sönümleyici, çelik iki braket eleman ile kat çerçevesine chevron (ters V) şeklinde monte edilmektedir. Her katta aynı yönde, birer adet olacak şekilde, çerçeve deney numunesine toplamda 2 adet sönümleyici ilave edilmiştir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.14'de verilmiştir.

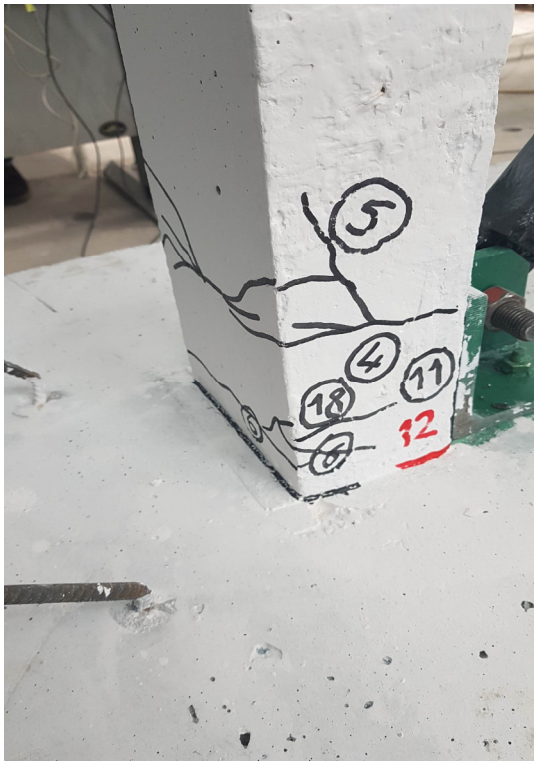
Çizelge 3.14. T2-KBF deney çerçevesinin temel özellikleri

Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-5 Tip 2 Karbonfiber		17~18	Tip 2 Sönümleyici ve Chevron (ters V) braket	Karbonfiber Sürtünme Pedi (100 Nm Sıkıştırma Torku)

Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, referans numunede olduğu gibi düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90^{o} bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Tip 2 karbonfiber (T2-KBF) numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 3.139'da verilmiştir.



Şekil 3.139. T2-KBF deney çerçevesinin deney öncesi görünümü



Şekil 3.140. T2-KBF deney çerçevesinde oluşan ilk çatlaklar

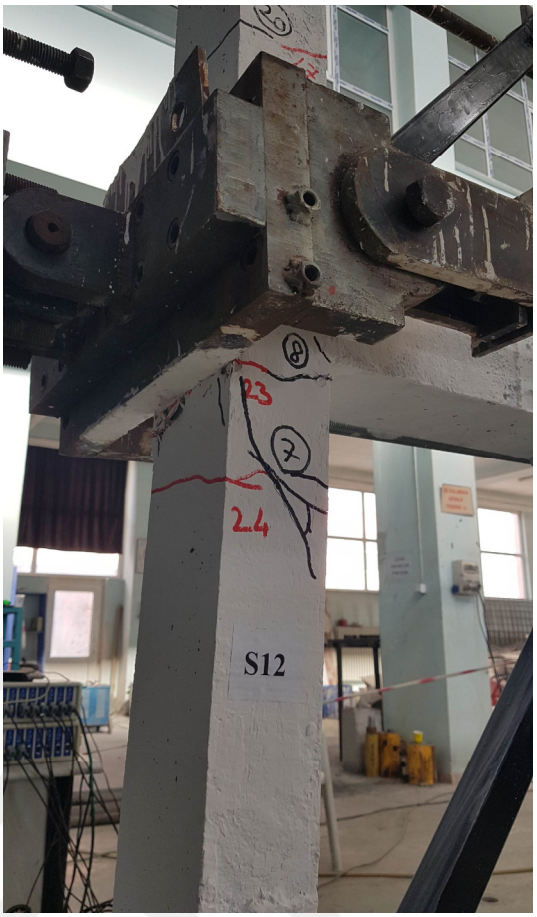
Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 4. çevrimin pozitif adımında 20.50 kN yükte ve 4.24 mm tepe deplasmanında S11 kolonu temel birleşim bölgesinde

görülmüştür (Şekil 3.137). Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

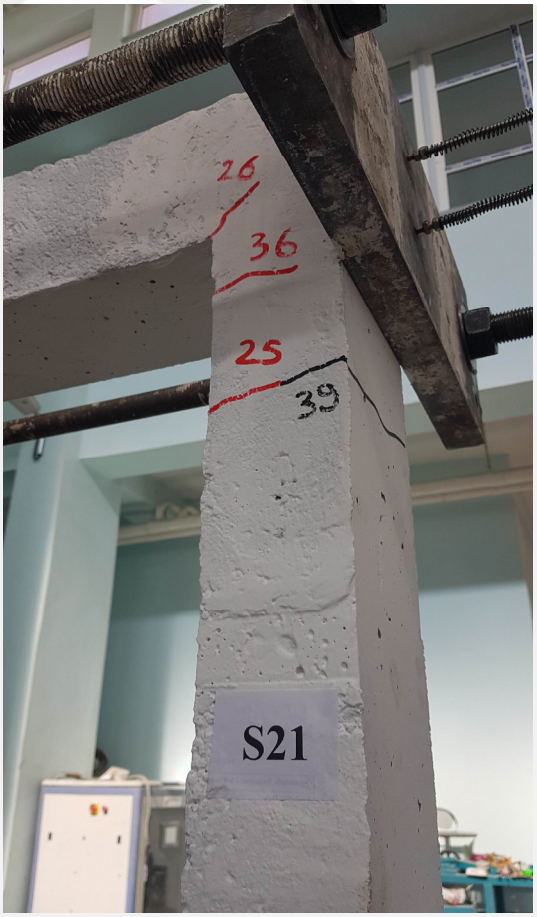
Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.148 ve Şekil 3.149'da gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü referans çerçeve için deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Betonarme çerçeveye chevron (ters V) sönümleyici + braket elemanı eklendiğinden toplam yatay rijitlik ve dayanım bir miktar artmaktadır. Bu nedenle boş referans çerçevenin aktığı yükten daha büyük bir yükte (dolayısıyla daha ileri bir çevrimde) akmanın gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Akmanın gerçekleştiği 9. çevrimin pozitif (itme) adımından sonra yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollü yüklemeye çevrilmiştir.

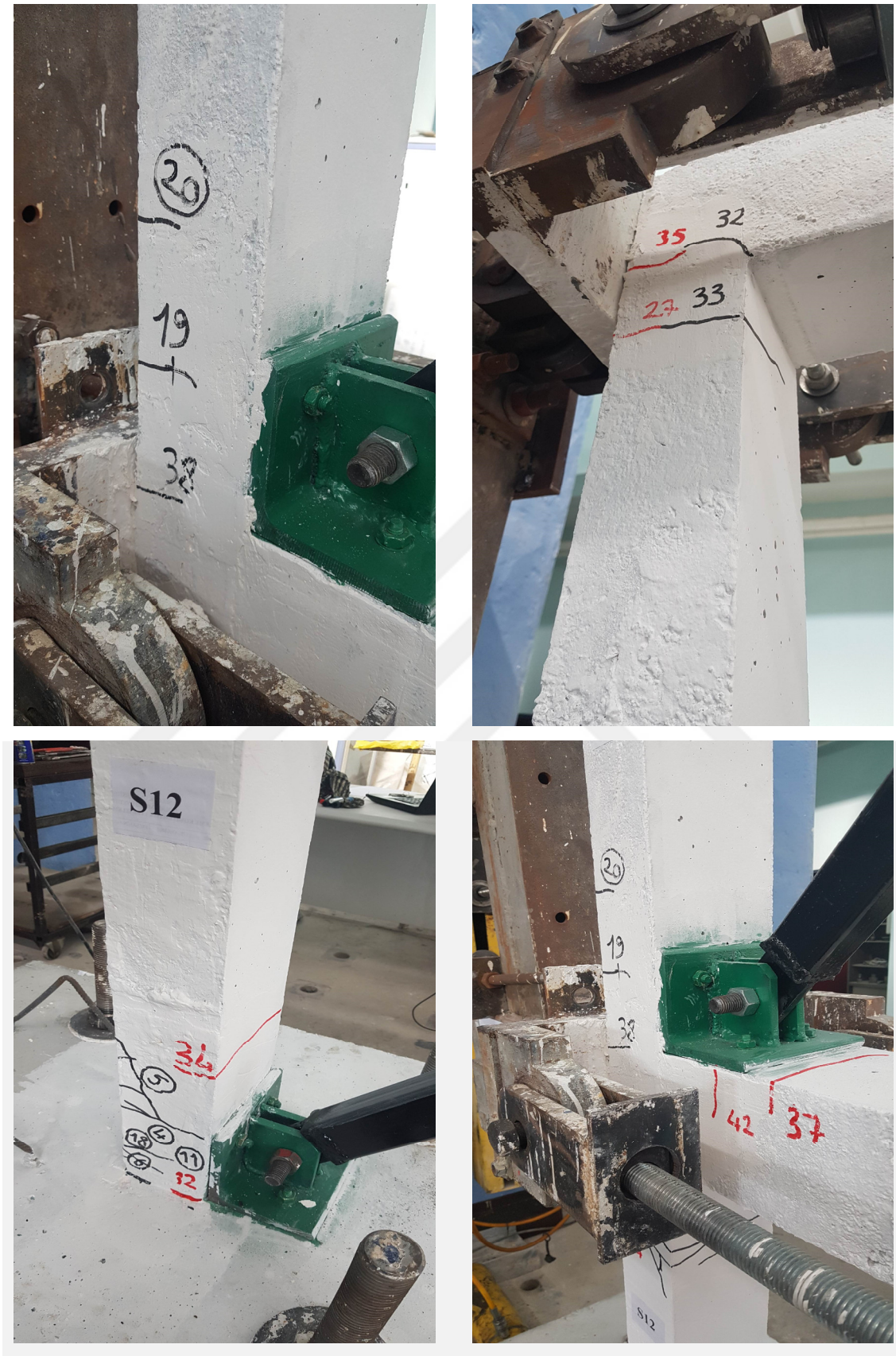
Yükleme protokolüne göre, 9. çevrimin pozitif (itme) adımında sistemin akmasını sağlayan 4150 kg (41.50 kN) değerine kadar 500 kg (5kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken 25.22 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, bu değerden sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla, deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) yükleme pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 72.53 mm, negatif yönde -71.17 mm deplasman değerinde son verilmiştir. Tip 2 karbonfiber numunesinin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 45.53 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (19. çevrim) 26.48 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 51.37 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (19. çevrim) 26.22 kN değerine düşmüştür. Deney çerçevesi son çevrimde pozitif (itme) adım yönünde maksimum yük taşıma kapasitesinin % 41.84'lük kısmını kaybetmiştir, negatif (çekme) adım yönünde ise maksimum yük taşıma kapasitesinin %48.96'sını kaybetmiştir, dolayısıyla sünekliği referans numuneden daha düşüktür.

S11
43
28
13
7
40
30


8
23
7
24
S12

41
16
29
21
22
31
2
17
9
S11
43


26
36
25
39
S21



Şekil 3.141. T2-KBF deney çerçevesinde akma sırasında oluşan çatlaklar

Şekil 3.142. T2-KBF deney çerçevesinde akma sırasında oluşan çatlaklar (9. çevrim)

Akma çevriminde S11 kolonu - temel birleşim bölgesindeki çatlaklar genişlemeye (çatlak genişliği >1 mm) başlamıştır. Akmanın meydana geldiği 9. çevrimden sonra, 12. çevrimdeki (39.4 mm tepe deplasmanı) maksimum dayanım değeri olan 45.53 kN'a kadar dayanım artmaya devam etmiştir. Akma çevrimini takip eden diğer çevrimlerde, özellikle 1. kat kolon uçlarındaki plastik mafsal bölgelerinde çatlaklar gelişmeye ve genişlemeye devam etmiştir (Şekil 3.138), (Şekil 3.139). Betonarme çerçevede yaklaşık %3 tepe ötelenmesine karşılık gelen 50-55 mm tepe deplasmanı seviyelerinde yeni çatlak oluşumu sona ermiş, bu tepe deplasmandan sonraki çevrimlerde mevcut çatlakların genişlediği ve uzadığı görülmüştür. Deney sonunda 1. kat kolon uçlarındaki plastik mafsalların gelişmesi nedeniyle kat mekanizması oluşumu görülmüştür. %4 ötelenme değerine yaklaşırken 1. kat kolonlarındaki donatılar boyunca oluşmuş çatlaklar geliştiği ve kabuk betonunun döküldüğü görülmüştür. Deneydeki maksimum deplasman 18'inci pozitif çevrimde 72.53 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise 20.57 kN olarak ölçülmüştür. Çerçevedeki hasar durumu incelendiğinde, Tip 1 diyagonal braketli sönümleyicili çerçeve numunelere göre daha yaygın bir çatlak yayılımı gözlenmiş, plastik mafsalların gelişmesi daha geç olmuştur. Deney sonundaki çevrimlerde bağlantı köşebentindeki ankraj dübellerinin kolon kesitinden sıyrıldığı görülmüştür. Bu nedenle pozitif (itme) adımında dayanım değeri, negatif yöndekine göre daha fazla düşmüştür.

Tip 1 sönümleyicili çerçevelerin göçme mekanizması, kolon-temel birleşimlerindeki kesme hasarından ve sönümleyici bağlantısının sıyrılarak sönümleyici fonksiyonunu sona erdirmesine bağlı gelişmiştir. Bu deneyde ise göçme sınırına doğru kolon uçlarında plastik mafsallar oluşmuş, ve özellikle pozitif yönde çerçevenin daha fazla yumuşamasından dolayı kat mekanizması durumu oluşmuştur. Tip 2 sönümleyici + chevron braket sisteminin yapısal taşıyıcılarla daha fazla etkileşime girdiği ve hasarı yaydığı görülmüştür.

Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.15'de verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.15. T2-KBF deney çerçevesine ait çatlak ve hasarlara ait bilgiler

Deney-5: Tip 2 Karbonfiber (T2-KBF)			
Çevrim No	**Yük (kg)**	**Deplasman (mm)**	**Açıklama**
+1	+500	+0,60	İlk üç çevrimde çatlak oluşumu gözlenmedi. Yükleme protokolü olarak kuvvet kontrollü yükleme protokolü izlendi. Akmaya kadar her çevrimde pozitif ve negatif yönlerde 500 kg artışlarla yatay yük artırıldı.
-1	-632	-1,24	
+2	+1009	+1,29	
-2	-1157	-2,14	
+3	+1480	+2,29	
-3	-1604	-2,56	
+4	+2050	+4,24	S11 kolonunun temel birleşiminde 60º açıyla 1 nolu çatlak, üst uçta 2 ve 3 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonunda alt uçta 4 ve 60º açıyla 5 nolu çatlak, temel birleşiminde dış yüzde 6 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun üst ucunda iç yüzde 7 ve 8 nolu çatlakları oluştu.
-4	-2050	-4,24	S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 9 ve 10 nolu çatlaklar oluştu.
+5	+2503	+6,07	S12 kolonunun temel birleşiminde dış yüzde 11 nolu çatlak oluştu.
-5	-2567	-6,53	S12 kolonunun alt ucundaki 4 nolu çatlak dallandı ve uzadı. S12 kolonunun alt ucunda 12 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun alt ucunda, dış yüzde 13, 14, 15 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun alt ucunda, dış yüzde 16 nolu çatlak oluştu.
+6	+3050	+8,76	S11 kolonunun üst ucunda 17 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun alt ucunda oluşan 1 nolu çatlak genişledi (< 1mm) ve dallandı. S12 kolonunda 18-20 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişi ile S11 kolonunun üst uç birleşiminde 21 ve 22 nolu çatlaklar oluştu.
-6	-3100	-8,91	S12 kolonunun üst ucunda 23 nolu çatlak oluştu ve 8 nolu

			çatlak ile birleşti. S12 kolonunun üst ucunda 24 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun üst ucunda 25 ve 26 nolu çatlaklar oluştu. S22 kolonunun üst ucunda 27 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel birleşiminden 25 cm yukarıda 28 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde 29 nolu çatlaklar oluştu.
+7	+3503	+11,33	S12 kolonunun üst ucunda oluşan 7 ve 8 nolu çatlaklar dallandı ve genişledi. (<1 mm) S11 kolonunun alt ucunda oluşan 1 nolu çatlak dallandı ve genişledi. S11 kolonu ile temel birleşiminde 30 nolu çatlak oluştu. S11 kolonu ile K1 kirişinin birleşim bölgesinde 31 nolu çatlak oluştu. S22 kolonu ile K2 kirişinin birleşim bölgesinde 32 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişiyle birleşim bölgesinde 33 nolu çatlak oluştu ve 27 nolu çatlak ile birleşti.
-7	-3507	-11,15	34 nolu çatlak oluştu. S22 kolonu ile K2 kirişinin birleşiminde 35 nolu çatlak oluştu ve 32 ile birleşti. 36 nolu çatlak oluştu. K1 kirişi ile S11 kolonu birleşiminde 37 nolu çatlak oluştu.
+8	+4008	+17,66	S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 38 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun üst ucunda dış yüzde 39 nolu çatlak oluştu, 25 nolu çatlak ile birleşti. S11 kolonunun temel birleşiminde 40 nolu çatlaklar oluştu.
-8	-4060	-14,76	S12 kolonunun alt ucunda oluşan 16 nolu çatlak dallandı. S22 kolonu ile K2 kirişinde oluşan 36 nolu çatlak dallandı. S21 kolonunda 41 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sol ucunda üst yüzde 42 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun 35 cm yüksekliğinde dış yüzde 43 nolu çatlak oluştu.
AKMA GERÇEKLEŞTİ. DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
+9	+4150	+25,22	S11 kolonunun alt ucunda oluşan 1, 30 ve 40 nolu çatlaklar genişledi. (> 1mm) S11 kolonunun üst ucunda 17 nolu çatlak dallandı. S12 kolonu ile temel birleşiminde oluşan 6 ve 18 nolu çatlaklar birleşti. S22 kolonu ile K2 kirişinin birleşiminde 32 nolu çatlak ile 35 nolu çatlak birleşti. S22 kolonunun orta kısmında iç yüzde 44 nolu çatlak oluştu.
-9	-4800	-25,51	S22 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45, 46, 47 nolu çatlaklar oluştu. S22 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 48 nolu çatlaklar oluştu ve 35 nolu çatlakla birleşti. S12 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 49 nolu çatlak oluştu ve 26 nolu çatlakla birleşti.
+10	+4221	+30,26	Kolon ve kirişlerdeki mevcut çatlaklar genişledi. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. S11 kolonu ile temel birleşiminde basınç ezilmesi oluştu.
-10	-4950	-30,85	S12 kolonunun temel birleşim bölgesinde 50 nolu çatlak oluştu, 4 ve 5 nolu çatlaklar ile birleşti. K1 kirişinin sol ucunda üst yüzde 51 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda alt yüzünde 52 nolu çatlak oluştu. Mevcut çatlakların genişlemesi devam etti. 29 ve 45 nolu çatlak (>2mm) genişledi. 9 ve 16 nolu çatlak dallandı ve genişledi. Kolon temelinde boyuna çatlak oluştu. (Kabuk betonu çatladı)
+11	+4380	+35,29	S11 kolonunun dış yüzünde basınç ezilmesi arttı. Mevcut çatlaklar genişlemeye devam etti.
-11	-5080	-35,70	S11 kolonunun üst ucunda 53 nolu çatlak oluştu.

+12	+4250	+40,40	S11 kolonu ile temel birleşiminde ankrajlı bağlantı köşebenti kolondan 5 mm ayrıldı. K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 54 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun alt ucunda 55 nolu çatlak oluştu. 55 nolu çatlak 16 nolu çatlak ile birleşti. 29 nolu çatlak 31 nolu çatlak ile birleşti. 7 nolu çatlak dallandı ve uzadı.
-12	-5050	-40,73	48 nolu çatlak ile 35 nolu çatlak birleşti. 26 nolu çatlak 49 nolu çatlak ile birleşip dallandı.
+13	+4370	+45,57	38 nolu çatlak ile 8 nolu çatlak dallandı.
-13	-4970	-46,25	S12 kolonunun orta kısmında 56 nolu çatlak oluştu.
+14	+3950	+50,69	14 ve 15 nolu çevrimlerde yeni bir çatlak oluşumu gözlenmedi, mevcut çatlakların genişlemesi ve dallanıp uzaması devam etti.
-14	-4550	-51,07	
+15	+3900	+55,70	
-15	-4280	-57,21	
+16	+2600	+60,52	S11 kolonunun temel ile birleşimindeki bağlantı köşebentini tutan ankraj cıvataları kolondan ayrıldı. Ankraj cıvataları çekmeye çalışmadığı için yatay yük kapasitesinde kayda değer bir düşüş gözlendi.
-16	-4100	-61,16	Bu çevrimlerde yeni bir çatlak oluşumu gözlenmedi, mevcut çatlakların genişlemesi ve dallanıp, uzaması devam etti.
+17	+2255	+65,58	
-17	-3919	-66,24	
+18	+2057	+72,53	18. çevrimde göreli ötelenme değeri %4'e ulaştığından deneye son verildi.
-18	-4020	-71,17	

Çalışmadaki betonarme çerçevelerde kolonlar, kirişlerden hareket yönünde daha zayıf olduğundan plastik mafsallar çoğunlukla kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Tip 2 sönümleyicilerin kullanıldığı deney çerçevelerinde çatlakların dağılımı, referans ve Tip 1 sönümleyicili çerçeve numunelere göre daha dağınıktır. Referans çerçevede kiriş uçlarında herhangi bir hasar görülmemişken, Tip 2 karbonfiber numunesinde kiriş uç bölgelerinde çatlaklar görülmüştür. Referans çerçevede çatlaklar yığılı plastik davranışa özgü yayılım gösterirken, Tip 2 pirinç numunesinde çatlak yayılımı daha geniş bir bölgede meydana gelmiştir.

İlk çevrimlerde yatay yük az ve betonarme çerçeve etkiyen yüke karşı rijit olduğundan sönümleyicilerde hareket oluşmamıştır. İlk çatlakların oluşmasıyla, sönümleyiciler de harekete geçmiştir. Toplam yatay yükün daha fazla olduğu 1. katta, Tip 2 karbonfiber sönümleyici daha etkin çalışmıştır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerin kolon-temel birleşimlerinde büyük kesme çatlaklarının oluşmasıyla betonarme çerçeve yumuşamış ve sönümleyicilerin çalışması kısıtlanmıştı. Genel olarak Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde chevron braket sisteminin bu açıdan daha avantajlı olduğu görülmüştür. Hasar 1. kat kolonlarının tamamına yayılmış, taşıyıcı elemanlardaki kesme çatlakları gelişmemiştir. 2. kat kolonlarında da yaygın çatlaklar gözlenmiştir. Deney sonunda 1. kat kolonlarının dış yüzünde donatılar boyunca kabuk betonu dökülmüştür.

Tip 2 sönümleyicili çerçevelerin Tip 1 sönümleyicili çerçevelere göre hasarı daha az olmasına rağmen, Tip 2 sönümleyicili çerçeveler içerisinde en çok hasar gören çerçeve Tip 2 karbonfiber sönümleyicili çerçeve olmuştur. Tip 2 sönümleyici + chevron braket sisteminin yapısal taşıyıcılarla daha fazla etkileşime girdiği ve hasarı yaydığı görülmüştür. Deneyin son çevrimlerinde 1. kat kolonlarının alt ve üst ucundaki plastik mafsallar gelişerek kat mekanizması durumuna yol açmıştır. 16. Çevrimde S12 kolonuna bağlanan bağlantı köşebentinin ankraj dübellerinin betondan sıyrılmasıyla ani dayanım kaybı yaşanmıştır.

Şekil 3.157'de maksimum deplasman değerinde kolon, kiriş ve birleşim bölgelerinde çatlak ve hasar durumları verilmiştir. Fotoğraflardan görülebileceği gibi genel itibariyle ötelenme ve çatlak gelişiminin büyük bir kısmı 1. kat elemanlarında yoğunlaşmıştır. Şekil 3.158'de Tip 2 pirinç çerçeve numunenin deney sonu genel görünüşü verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

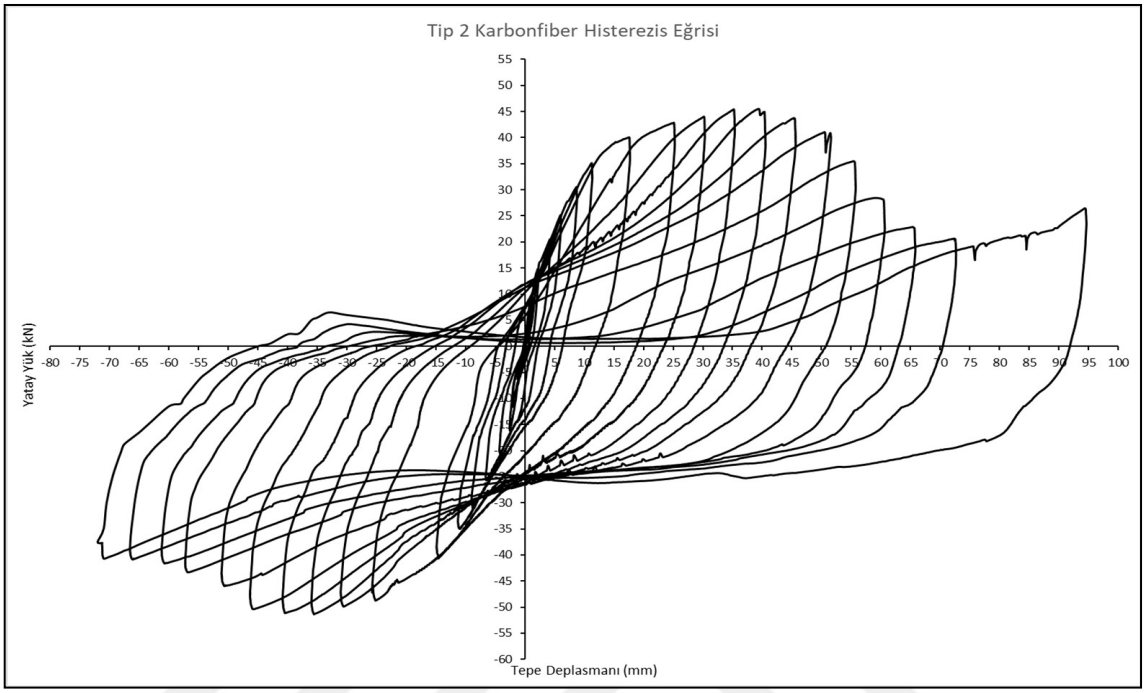
Şekil 3.143. T2-KBF deney çerçevesinde deney sonunda oluşan çatlak ve hasarlar

Şekil 3.144. T2-KBF deney çerçevesinde deney sonunda ön ve arka görünüş

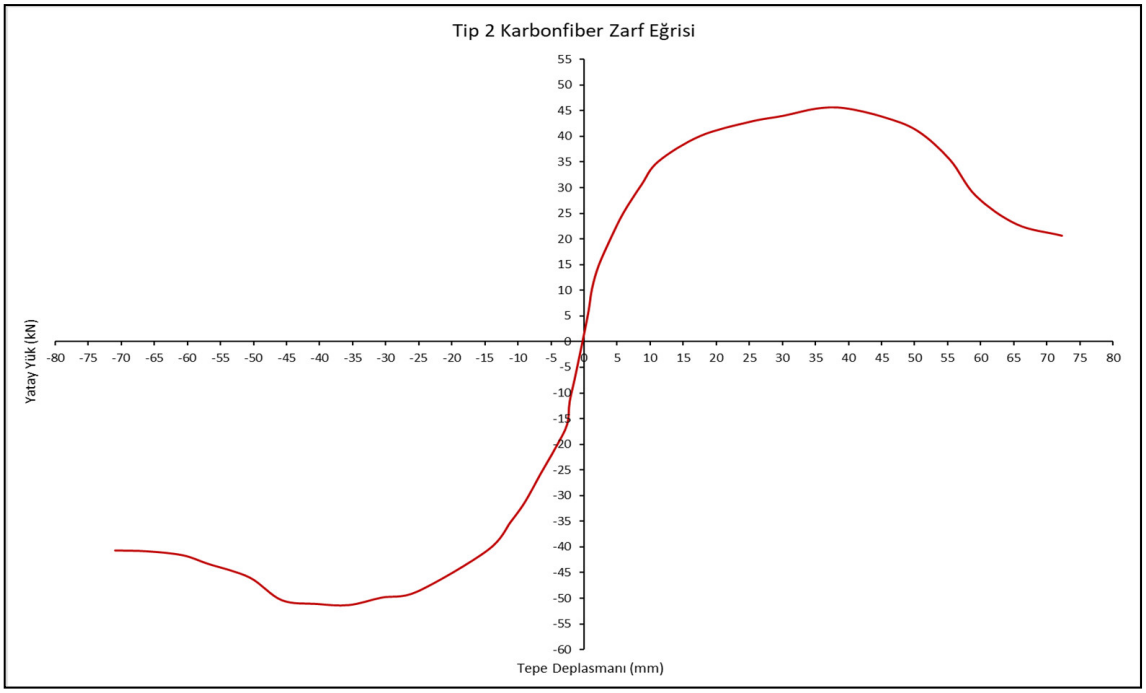
Tip 2 karbonfiber numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.145'de
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.146'da
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.147'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.148'de,

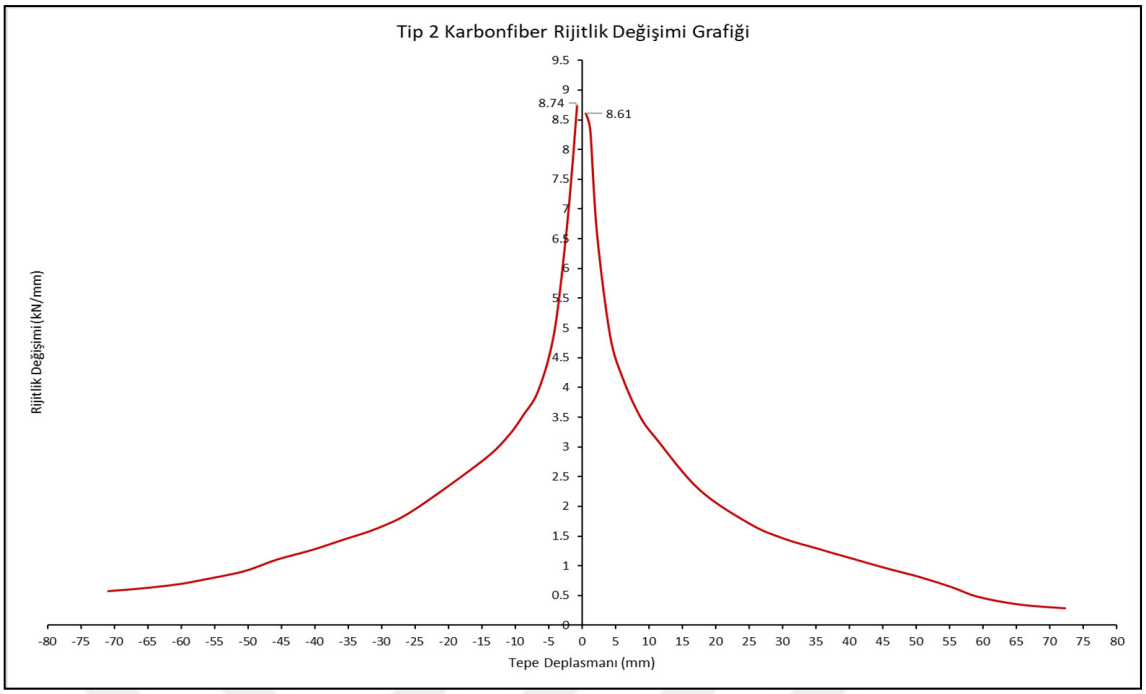
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil 3.149'da,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.150'de,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.151'de gösterilmiştir.



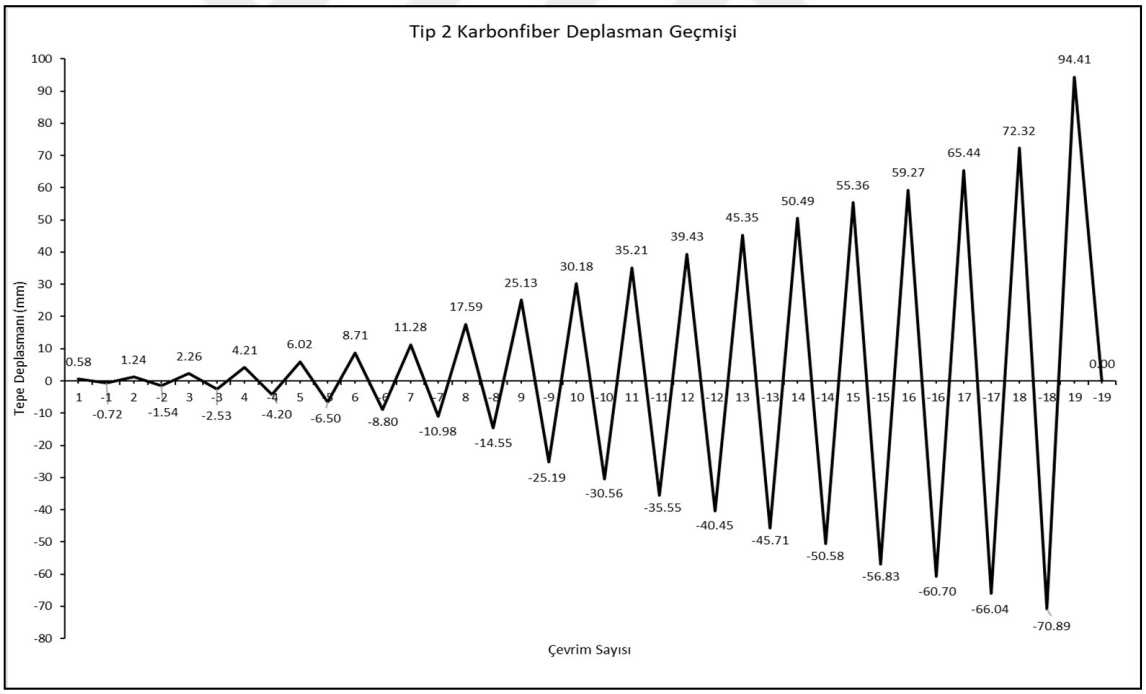
Şekil 3.145. T2-KBF deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



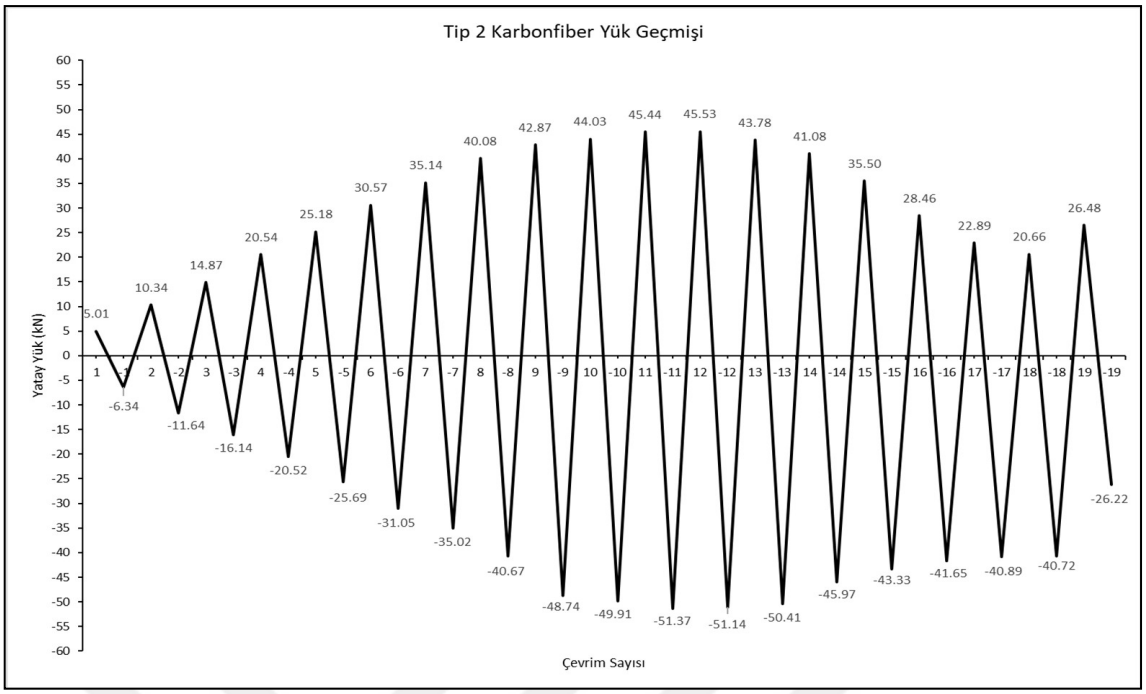
Şekil 3.146. T2-KBF deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



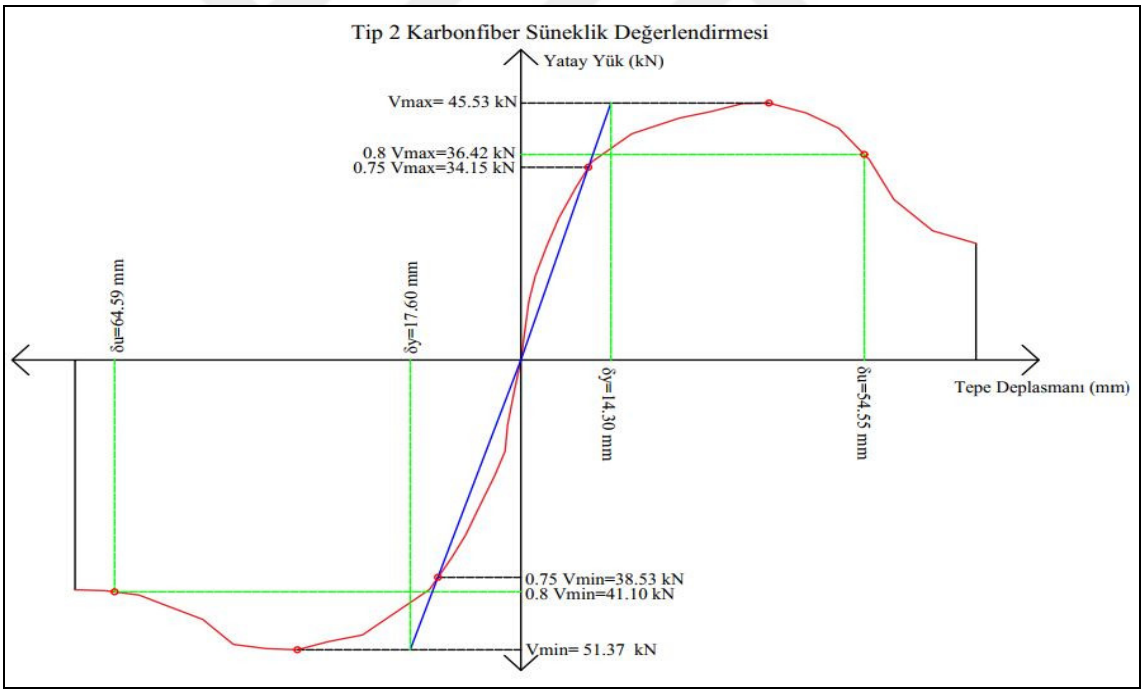
Şekil 3.147. T2-KBF deney çerçevesine ait rijitlik değişimi grafiği



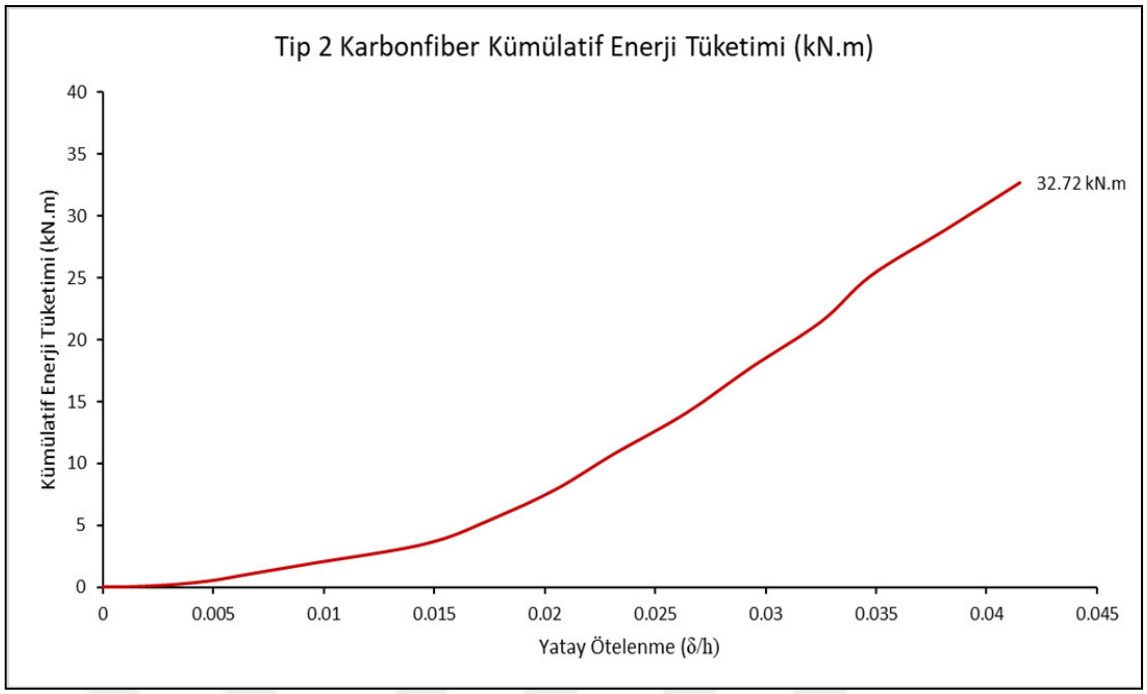
Şekil 3.148. T2-KBF deney çerçevesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



Şekil 3.149. T2-KBF deney çerçevesine ait yük geçmişi (Taban kesme kuvvetine göre)



Şekil 3.150. T2-KBF deney çerçevesine ait süneklik değerlendirilmesi grafiği



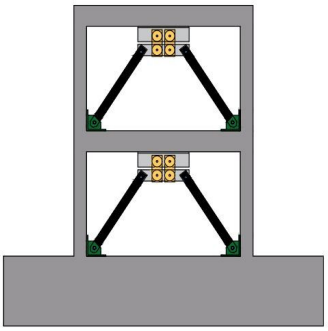
Şekil 3.151. T2-KBF deney çerçevesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak Tip 2 karbonfiber çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.151'deki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.147'de gösterilmiştir. Şekil 3.150'de süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir.

3.11.6. Deney-6 (T2-PRÇ)

Deney-6'da test edilen betonarme çerçeve numune, beton, donatı, boyut ve kusurlar açısından referans çerçeveyle aynı özellikleri olan, her iki katında da pirinç sürtünme pedli Tip 2 sürtünme sönümleyiciyle rehabilite edilmiş betonarme çerçevedir. Tip 2 sürtünme sönümleyici, çelik iki braket eleman ile kat çerçevesine chevron (ters V) şeklinde monte edilmektedir. Her katta aynı yönde, birer adet olacak şekilde, çerçeve deney numunesine toplamda 2 adet sönümleyici ilave edilmiştir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.16'da verilmiştir.

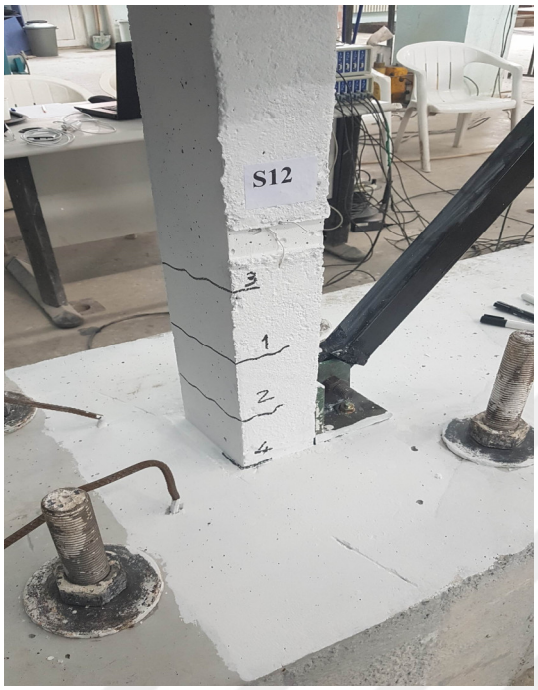
Çizelge 3.16. T2-PRÇ deney çerçevesinin temel özellikleri

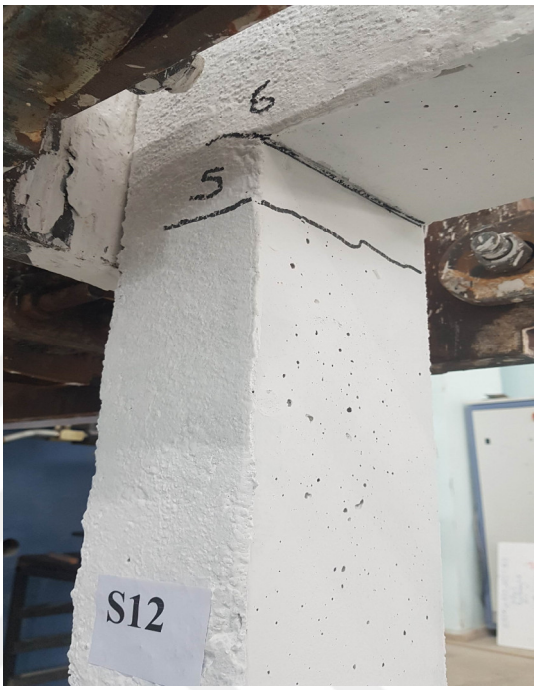
Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-6 Tip 2 Pirinç		17~18	Tip 2 Sönümleyici ve Chevron (ters V) braket	Pirinç Sürtünme Pedi (100 Nm Sıkıştırma Torku)

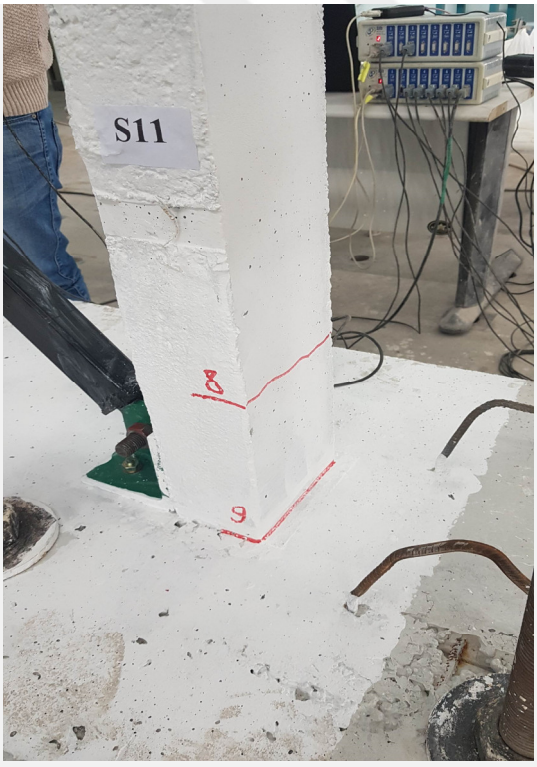
Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, referans numunede olduğu gibi düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90° bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Tip 2 pirinç (T2-PRÇ) numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 3.152'de verilmiştir.

Şekil 3.152. T2-PRÇ deney çerçevesinin deney öncesi görünümü

Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 3. çevrimin pozitif adımında 15,10 kN yükte ve 3,58 mm tepe deplasmanında S12 kolonu temel birleşim bölgesinde görülmüştür (Şekil 3.153), (Şekil 3.154). Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.







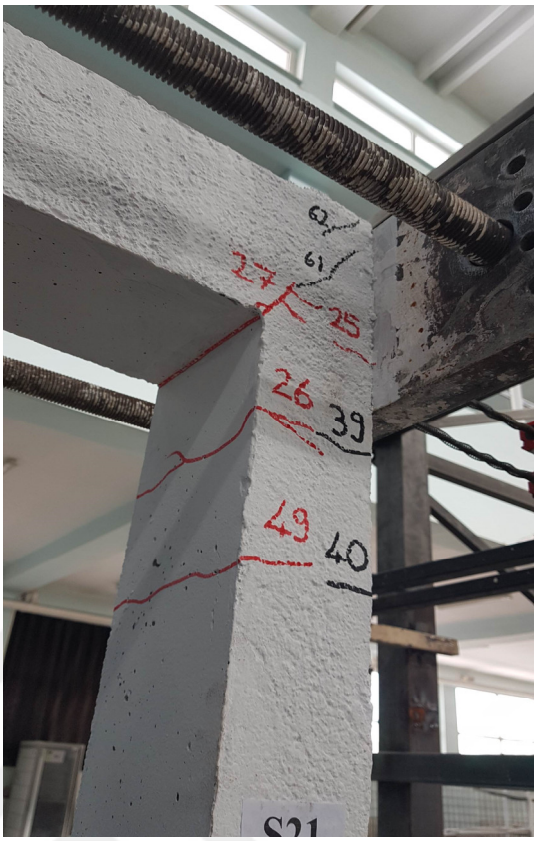
Şekil 3.153. T2-PRÇ deney çerçevesinde oluşan ilk çatlaklar

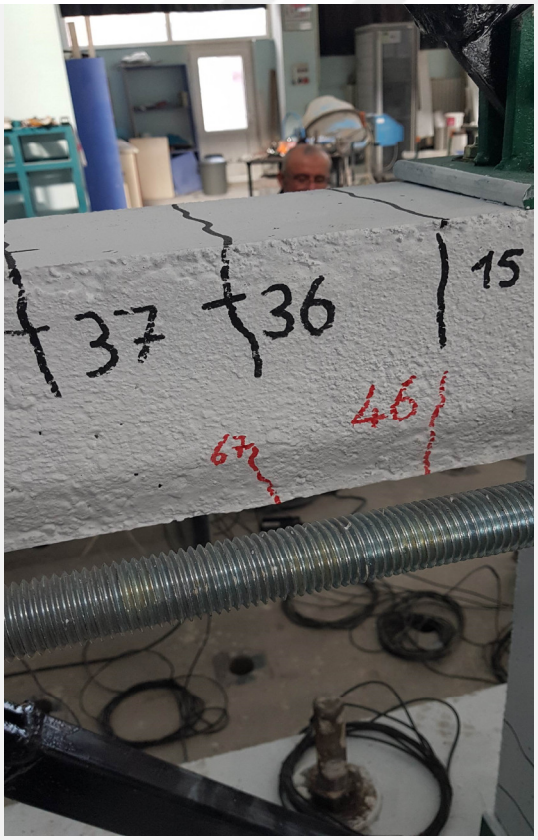
Şekil 3.154. T2-PRÇ deney çerçevesindeki ilk çatlaklardan sonra görünüş

Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.162 ve Şekil 3.163'de gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü referans çerçeve için deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Betonarme çerçeveye chevron (ters V) sönümleyici + braket elemanı eklendiğinden toplam yatay rijitlik ve dayanım bir miktar artmaktadır. Bu nedenle boş referans çerçevenin aktığı yükten daha büyük bir yükte (dolayısıyla daha ileri bir çevrimde) akmanın gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Akmanın gerçekleştiği 9. çevrimin negatif (çekme) adımından sonra yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollü yüklemeye çevrilmiştir.

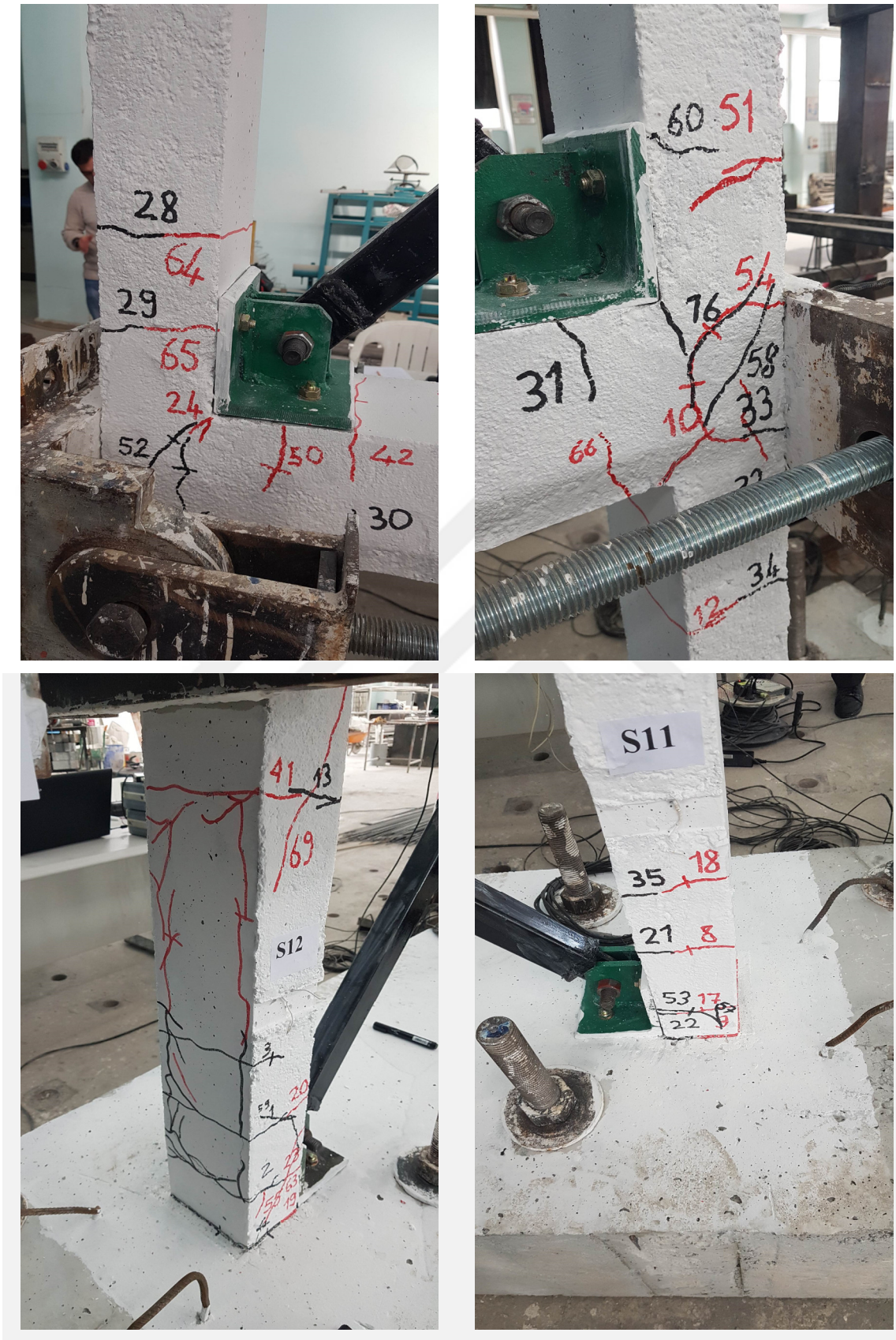
Yükleme protokolüne göre, 9. çevrimin negatif adımında sistemin akmasını sağlayan -4100 kg (-41,00 kN) değerine kadar 500 kg (5kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken -36,96 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, bu değerden sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla, deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) yükleme pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 72,35 mm, negatif yönde -66,48 mm deplasman değerinde son verilmiştir. Tip 2 pirinç numunesinin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 47.93 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (16. çevrim) 46.13 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 40.31 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (15. çevrim) 38.33 kN değerine düşmüştür. Deney çerçevesi son çevrimde pozitif (itme) adım yönünde maksimum yük taşıma kapasitesinin %3.76'lık kısmını kaybetmiştir, negatif (çekme) adım yönünde ise maksimum yük taşıma kapasitesinin %4.91'ini kaybetmiştir, dolayısıyla sünek kabul edilebilir bir davranış sergilemiştir.

14
47


61
27
25
26
39
49
40
S21


37
36
15
46
67

15
24
50
42
30
43
38
45



Şekil 3.155. T2-PRÇ deney çerçevesinde akma sırasında oluşan çatlaklar

Şekil 3.156. T2-PRÇ deney çerçevesinde akmadan sonra görünüm

Çerçeve numunede akma, S12 kolonunun üst kısmında yaklaşık 60º açıyla oluşan 69 nolu çatlak ile meydana gelmiştir (Şekil 3.155). Akmanın meydana geldiği 9. çevrime kadar özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde 69 adet çatlak oluşmuştur. Akma çevriminden sonra beklenenin aksine çerçevede yük düşüşü yaşanmamış, maksimum yükün elde edildiği 14. çevrimin pozitif adımına kadar gittikçe azalan bir yatay yük artışı gözlemlenmiştir. Negatif yönde ise 9. çevrimde maksimum yüke ulaşılmıştır. Negatif yöndeki maksimum yük, pozitif yöndeki maksimum yükten %13 daha azdır. Akma çevrimini takip eden diğer çevrimlerde, özellikle kirişlerde ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde çatlak yoğunluğu artmış, mevcut çatlaklar ise gelişmeye devam etmiştir. Deneydeki maksimum deplasman 16'ıncı pozitif çevrimde 72.35 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise 44.80 kN olarak ölçülmüştür. Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.17'de verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.17. T2-PRÇ deney çerçevesine ait çatlak ve hasarlara ait bilgiler

Deney 6: Tip 2 Pirinç (T2-PRÇ)			
Çevrim No	**Yük**	**Deplasman**	**Açıklama**
+1	+660	+0,80	İlk iki çevrimde çatlak oluşumu gözlenmedi. Yükleme olarak kuvvet kontrollü yükleme protokolü izlendi. Akmaya kadar her çevrimde pozitif ve negatif yönlerde 500 kg artışlarla yatay yük büyütüldü.
-1	-540	-0,60	
+2	+1004	+1,42	
-2	-1047	-1,34	
+3	+1510	+3,58	S12 kolonunun temel birleşiminden 25 cm yükseklikte dış yüzde 1 nolu çatlak, 12 cm yükseklikte 2 nolu çatlak, 40 cm yükseklikte 3 nolu çatlak, temel birleşiminde 4 nolu çatlak oluştu. S12 kolonu ile K1 kirişinin birleşim bölgesinde 5 ve 6 nolu çatlaklar oluştu. S22 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 7 nolu çatlak oluştu.
-3	-1513	-3,60	S11 kolonunun temel birleşiminde dış yüzde 9 nolu çatlak, 25 cm yükseklikte 8 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde iç yüzde 10, 11, 12 nolu çatlaklar oluştu.
+4	+2000	+5,20	S12 kolonunun üst ucunda iç yüzde 13 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun üst ucunda iç yüzde 14 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 15 ve 16 nolu çatlaklar oluştu.
-4	-2111	-6,45	S11 kolonunun temel birleşiminde dış yüzde 17 nolu çatlak, 35 cm yükseklikte 18 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminde iç yüzde 19 nolu çatlak, 25 cm yükseklikte 20 nolu çatlak oluştu.
+5	+2500	+7,0	S11 kolonunun temel birleşiminde iç yüzde 22 nolu çatlak, 25 cm yükseklikte 8 nolu çatlak karşısında 21 nolu çatlak oluştu.
-5	-2550	-10,6	S12 kolonunun temel birleşim bölgesinde 2 nolu çatlak karşısında iç yüzde 23 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sol ucunda S21 kolonuyla birleşiminde 24 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 25, 26 ve 27 nolu çatlaklar oluştu.
+6	+3035	+9,62	S22 kolonunun alt ucunda dış yüzde 28 ve 29 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sol ucunda alt yüzde 30 ve 38 nolu çatlaklar oluştu. S11 kolonunun 35 cm yüksekliğinde 18 nolu çatlak karşısında 35 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun üst ucunda 10, 11 ve 12 nolu çatlaklar karşısında dış yüzde sırasıyla 33, 32, 34 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 31, 36, 37 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun üst ucunda 26 nolu çatlak karşısında dış yüzde 39 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun 70 cm yüksekliğinde dış yüzde 40 nolu çatlak oluştu.
-6	-3100	-14,98	S12 kolonunun üst ucunda 13 nolu çatlak karşısında 41 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sol ucunda üst yüzde 42, 43, 45, 50 nolu çatlaklar oluştu. S12 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde 6 nolu çatlak karşısında dış yüzde 44 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde 47 ve 48 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda alt yüzde 46 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun üst tarafında 40 nolu çatlak karşısında iç yüzde 49 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun alt tarafında dış yüzde 51

			nolu çatlak oluştu.
+7	+3470	+13,40	S11 kolonunun temel birleşiminde 17 nolu çatlak karşısında 53 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45º açıyla 52 nolu çatlak oluştu.
-7	-3520	-20,36	S11 kolonu ile K1 kirişinin birleşiminde 54 nolu çatlak oluştu, 10 ve 33 nolu çatlaklar ile birleşti. S12 kolonunun temel birleşiminde 55 nolu çatlak oluştu, 2 ve 23 nolu çatlak ile birleşti. S22 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde 56 nolu çatlak oluştu.
+8	+4006	+20,59	S11 kolonunun temel birleşiminde 57 nolu çatlak oluştu, 17 ve 53 nolu çatlaklar ile birleşti. S11 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 45º açıyla 58 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminden 25 cm yukarısında 59 nolu çatlak oluştu, 1 ve 20 nolu çatlaklar ile birleşti. S21 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminden 12 cm yükseklikte, 51 nolu çatlak karşısında iç yüzde 60 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2 kirişi birleşiminde 61 ve 62 nolu çatlaklar oluştu.
-8	-4015	-29,23	S12 kolonunun temel birleşim bölgesinde 45º açıyla 63 nolu çatlak oluştu, 55, 23, 2 nolu çatlaklar ile birleşti. S22 kolonunun alt ucunda 28 ve 29 nolu çatlaklar karşısında 64 ve 65 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda alt yüzde 66 ve 67 nolu çatlaklar oluştu.
+9	+4515	+36,76	S22 kolonu ile K2 kirişinin birleşiminde 68 nolu çatlak oluştu.
AKMA GERÇEKLEŞTİ. DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
-9	-4100	-36,96	S12 kolonunun üst kısmında 60º açıyla 69 nolu çatlak oluştu.
+10	+4350	+40,70	Kolon ve kirişlerdeki mevcut çatlaklar genişledi, dallandı ve uzadı. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
-10	-3900	-41,94	
+11	+4370	+45,64	
-11	-3850	-46,27	
+12	+4480	+50,17	
-12	-4000	-51,33	S22 kolonunun alt ucunda iç yüzde 70 nolu çatlak oluştu.
+13	+4620	+55,0	Kolon ve kirişlerdeki mevcut çatlaklar genişledi, dallandı ve uzadı. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
-13	-3920	-55,93	
+14	+4710	+60,0	
-14	-3850	-61,14	
+15	+4450	+65,5	
-15	-3800	-66,48	
+16	+4480	+72,35	+16. çevrimde göreli ötelenme değeri %4'e ulaştığından deneye son verildi.
-16	-	-	Negatif yönde (çekme) yükleme pistonundaki strok boyu yetersiz kaldığından göçe sınırı olarak belirlenen göreli öteleme değeri %4'e ulaşılamadı.

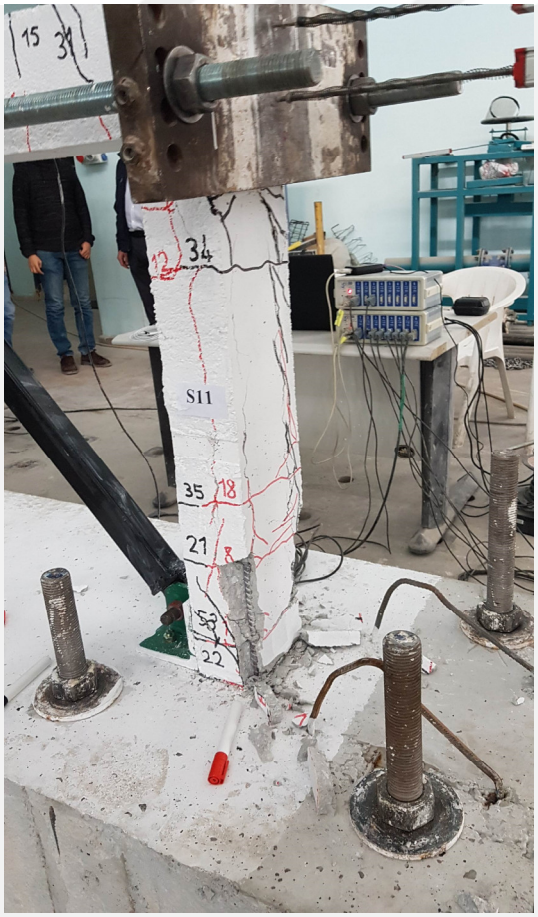
Çalışmadaki betonarme çerçevelerde kolonlar, kirişlerden hareket yönünde daha zayıf olduğundan plastik mafsallar çoğunlukla kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Tip 2 sönümleyicilerin kullanıldığı deney çerçevelerinde çatlakların dağılımı, referans ve Tip 1 sönümleyicili çerçeve numunelere göre daha dağınıktır. Referans çerçevede kiriş uçlarında herhangi bir hasar görülmemişken, Tip 2 pirinç

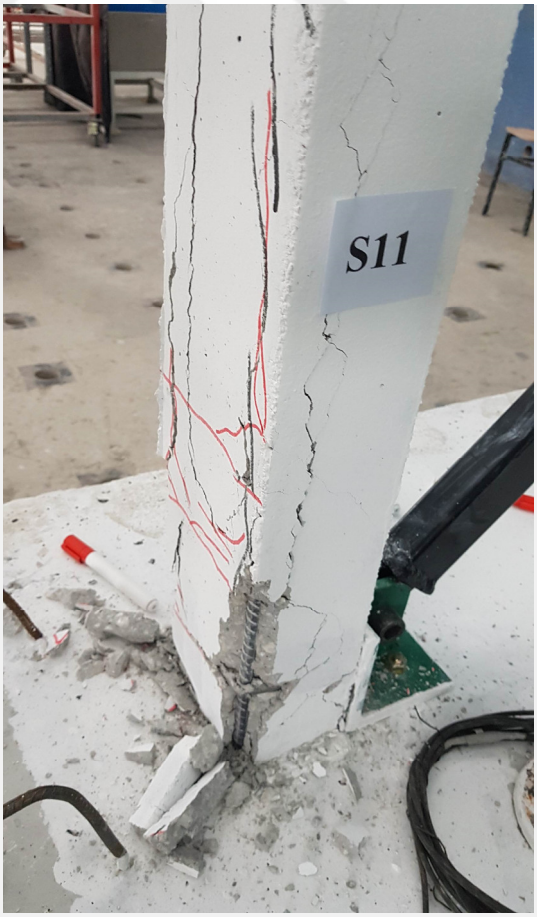
numunesinde kiriş uç bölgelerinde çatlaklar görülmüştür. Referans çerçevede çatlaklar yığılı plastik davranışa özgü yayılım gösterirken, Tip 2 pirinç numunesinde çatlak yayılımı daha geniş bir bölgede meydana gelmiştir.

İlk çevrimlerde yatay yük az ve betonarme çerçeve etkiyen yüke karşı rijit olduğundan sönümleyicilerde hareket oluşmamıştır. İlk çatlakların oluşmasıyla, sönümleyiciler de harekete geçmiştir. Toplam yatay yükün daha fazla olduğu 1. katta, Tip 2 pirinç sönümleyici daha etkin çalışmıştır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerin kolon-temel birleşimlerinde büyük kesme çatlaklarının oluşmasıyla betonarme çerçeve yumuşamış ve sönümleyicilerin çalışması kısıtlanmıştı. Genel olarak Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde chevron braket sisteminin bu açıdan daha avantajlı olduğu görülmüştür. Hasar 1. kat kolonlarının tamamına yayılmış, taşıyıcı elemanlardaki kesme çatlakları gelişmemiştir. 2. kat kolonlarında da yaygın çatlaklar gözlenmiştir. Deney sonunda 1. kat kolonlarının dış yüzünde donatılar boyunca kabuk betonu dökülmüştür. Tip 1 sönümleyicili çerçevelere göre deney sonunda hasar oldukça sınırlı kalmıştır. Tip 2 sönümleyici + chevron braket sisteminin yapısal taşıyıcılarla daha fazla etkileşime girdiği ve hasarı yaydığı görülmüştür.

Şekil 3.157'de maksimum deplasman değerinde kolon, kiriş ve birleşim bölgelerinde çatlak ve hasar durumları verilmiştir. Fotoğraflardan görülebileceği gibi genel itibariyle ötelenme ve çatlak gelişiminin büyük bir kısmı 1. kat elemanlarında yoğunlaşmıştır. Şekil 3.158'de Tip 2 pirinç çerçeve numunenin deney sonu genel görünüşü verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

S12


S11

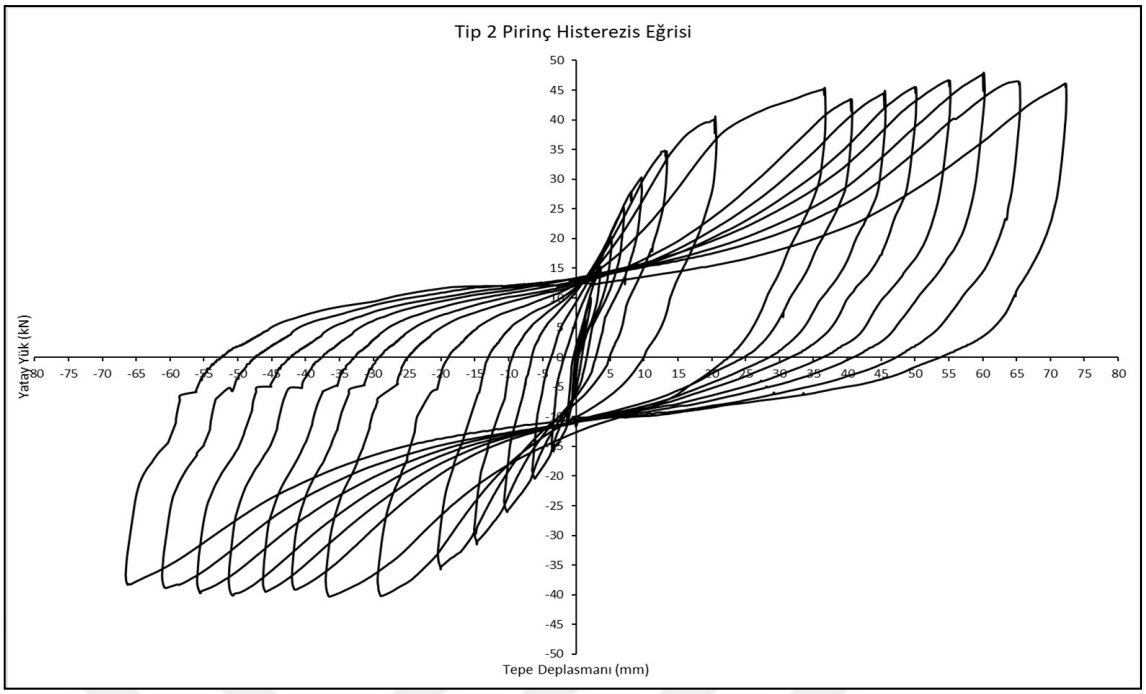

S11

Şekil 3.157. T2-PRÇ deney çerçevesinde son çevrimde oluşan çatlak ve hasarlar

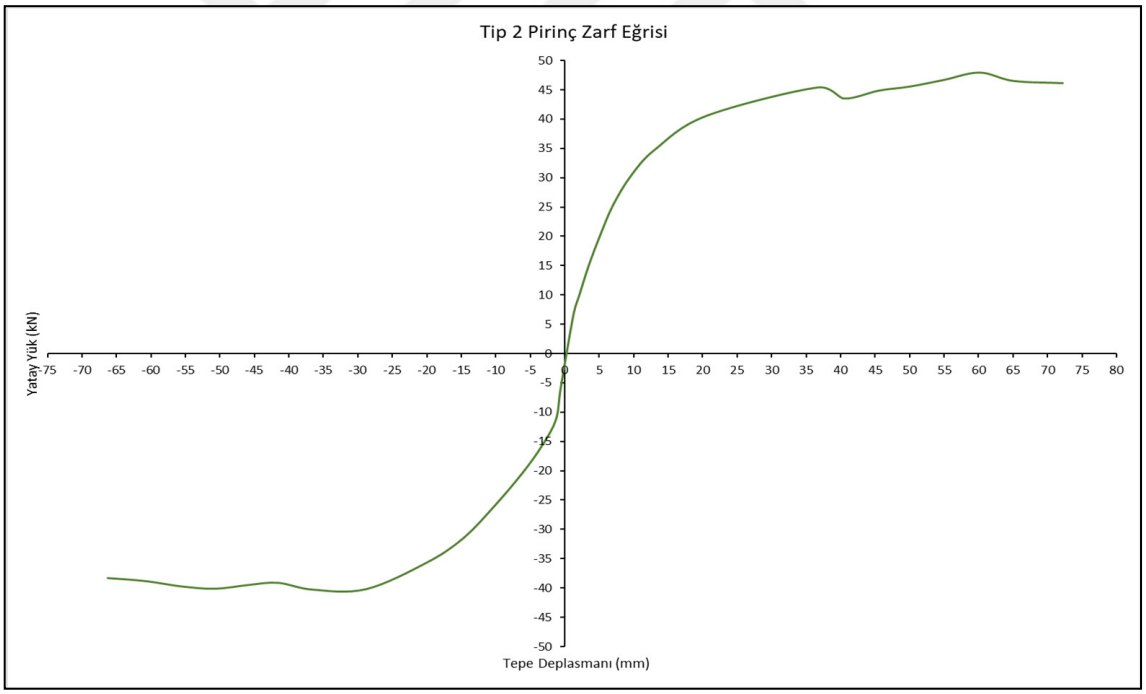
Şekil 3.158. T2-PRÇ deney çerçevesinde deney sonu görünüm

Tip 2 pirinç numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

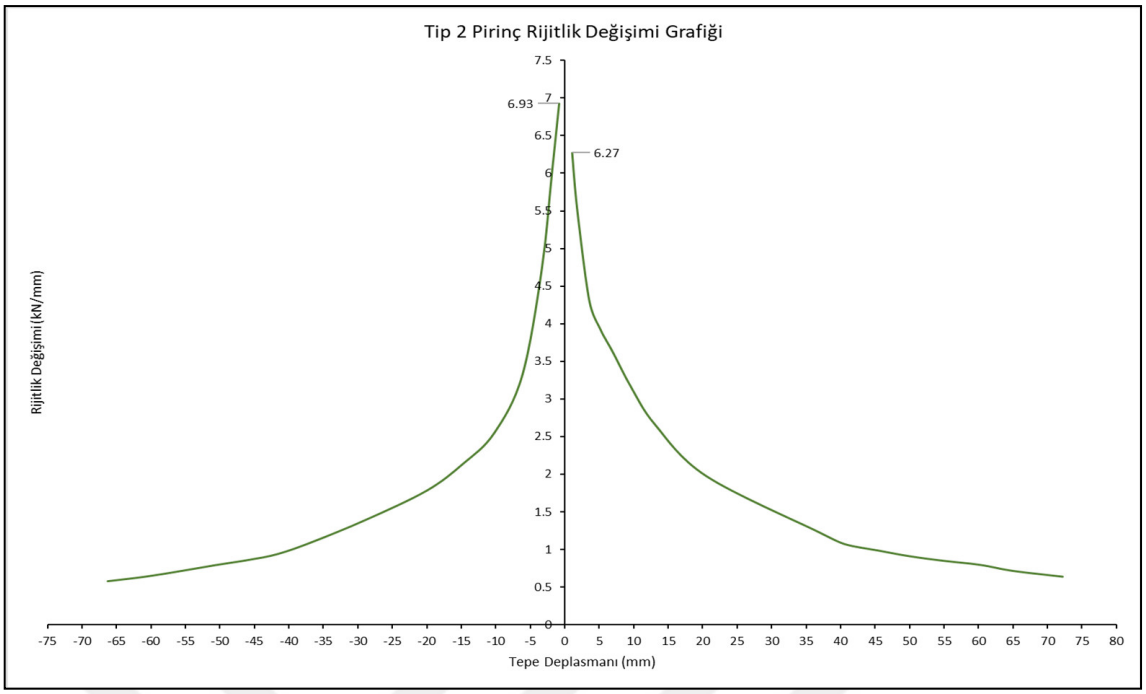
1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.159'da
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.160'da
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.161'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.162'de,
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil 3.163'de,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.164'de,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.165'de gösterilmiştir.



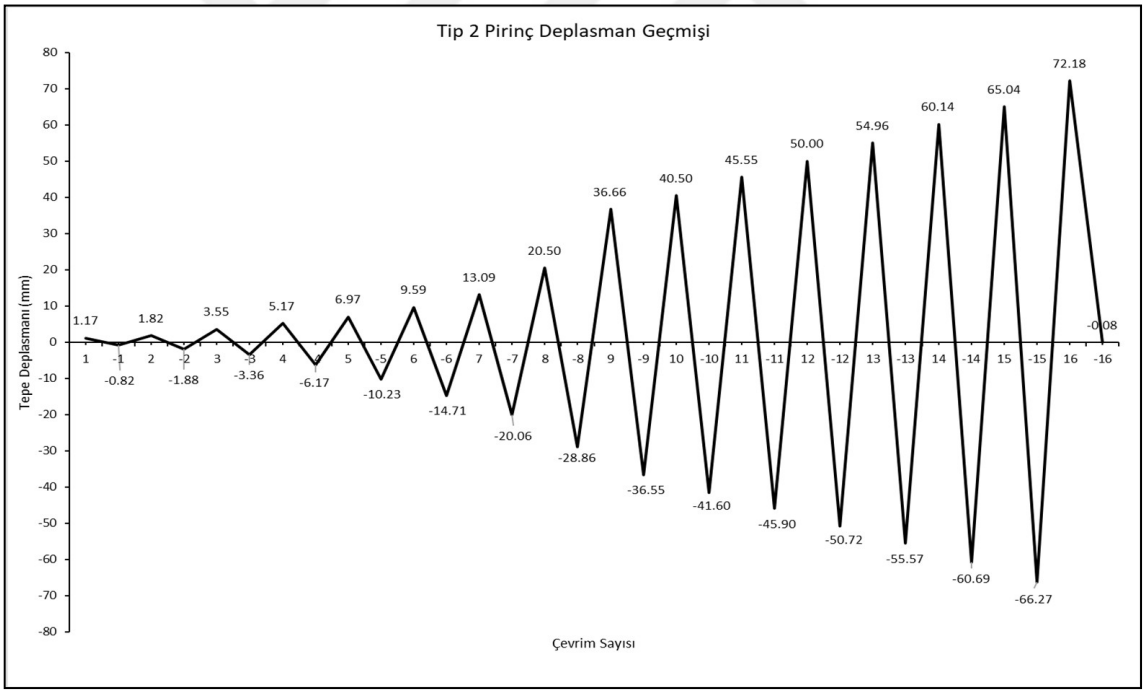
Şekil 3.159. T2-PRÇ deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



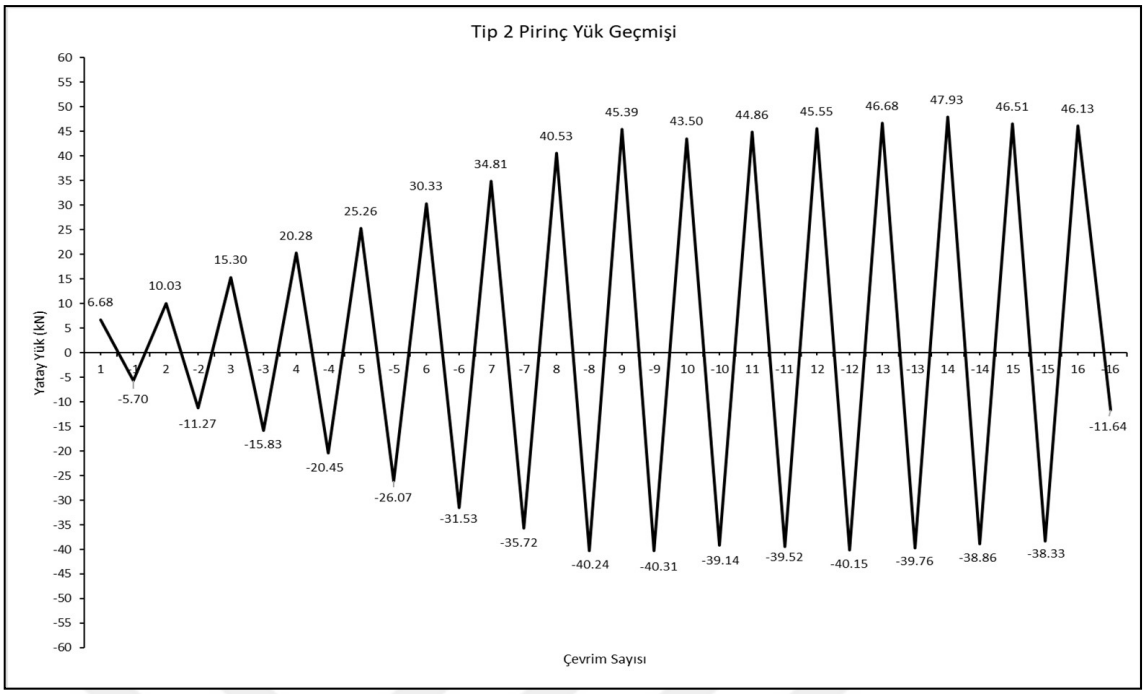
Şekil 3.160. T2-PRÇ deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı zarf eğrisi



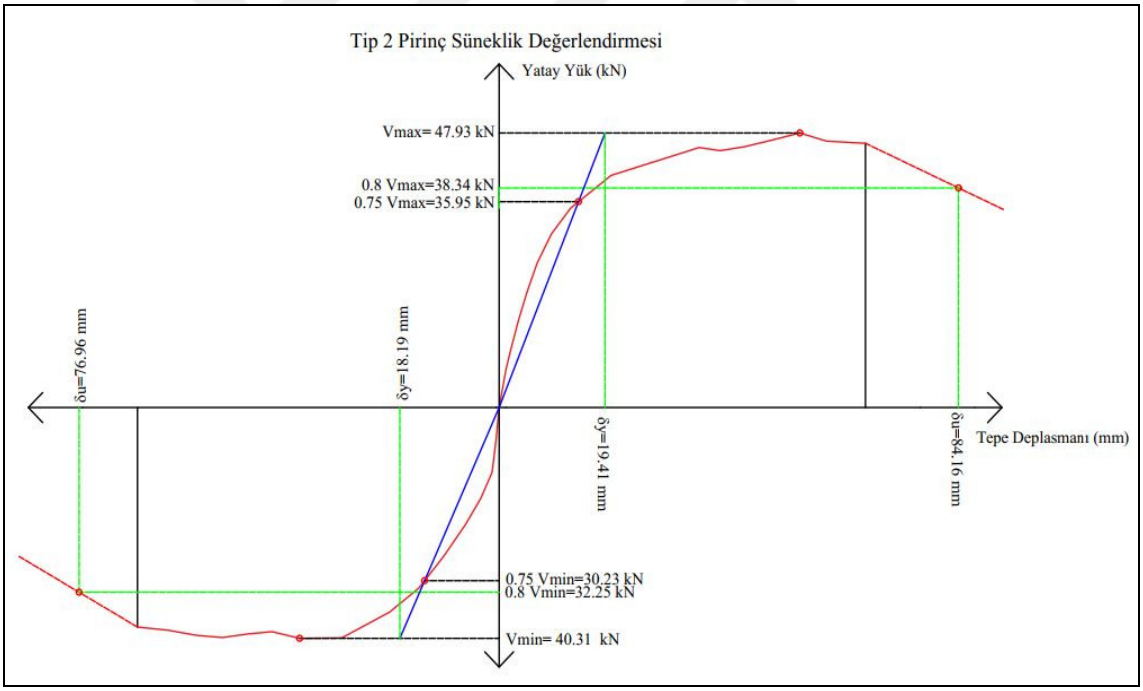
Şekil 3.161. T2-PRÇ deney çerçevesine ait rijitlik değişimi grafiği



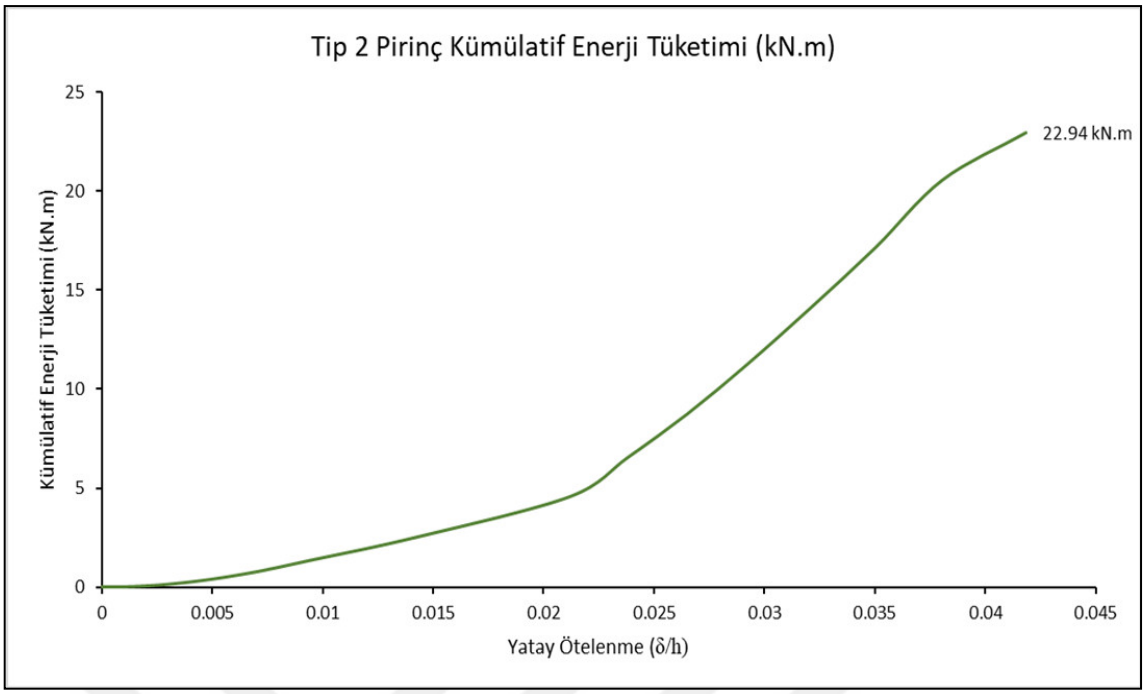
Şekil 3.162. T2-PRÇ deney çerçevesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



Şekil 3.163. T2-PRÇ deney çerçevesine ait yük geçmişi (Taban kesme kuvvetine göre)



Şekil 3.164. T2-PRÇ deney çerçevesine ait süneklik değerlendirilmesi grafiği



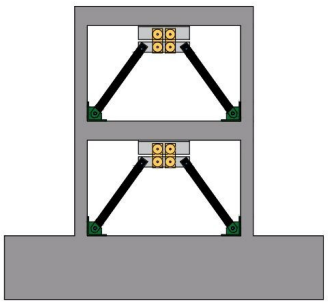
Şekil 3.165. T2-PRÇ deney çerçevesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak Tip 2 pirinç çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.165'deki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.161'de gösterilmiştir. Şekil 3.164'de süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir.

3.11.7. Deney-7 (T2-KRN)

Deney-7'de test edilen betonarme çerçeve numune, beton, donatı, boyut ve kusurlar açısından referans çerçeveyle aynı özellikleri olan, her iki katında da kurşun sürtünme pedli Tip 2 sürtünme sönümleyiciyle rehabilite edilmiş betonarme çerçevedir. Tip 2 sürtünme sönümleyici, çelik iki braket eleman ile kat çerçevesine chevron (ters V) şeklinde monte edilmektedir. Her katta aynı yönde, birer adet olacak şekilde, çerçeve deney numunesine toplamda 2 adet sönümleyici ilave edilmiştir. Bu deney numunesi ile ilgili temel özellikler Çizelge 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. T2-KRN deney çerçevesinin temel özellikleri

Deney Numunesi	**Çerçeve Görünüşü**	**Çerçeve Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**	**Sönümleyici ve Braket Tipi**	**Sönümleyicide Kullanılan Sürtünme Pedi Materyali**
Deney-7 Tip 2 Kurşun		17~18	Tip 2 Sönümleyici ve Chevron (ters V) braket	Kurşun Sürtünme Pedi (100 Nm Sıkıştırma Torku)

Bu deneyde test edilen betonarme çerçeve, referans numunede olduğu gibi düşük beton kalitesi, düz yüzeyli etriye, kolon ve kirişlerde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye bulunmaması, etriye kancalarının 90° bükülmesi gibi kusurlara sahiptir. Deneyde bu kusur ve istenmeyen durumlara sahip betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, enerji tüketimi ve hasar mekanizmaları gibi hususların tespiti amaçlanmıştır. Tip 2 kurşun (T2-KRN) numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 3.166'da verilmiştir.

Şekil 3.166. T2-KRN deney çerçevesinin deney öncesi görünümü

Deney numunesinde oluşan ilk çatlak, 3. çevrimin negatif adımında 16.80 kN yükte ve 3,29 mm tepe deplasmanında S11 kolonu temel birleşim bölgesinde görülmüştür (Şekil 3.167), (Şekil 3.168). Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.

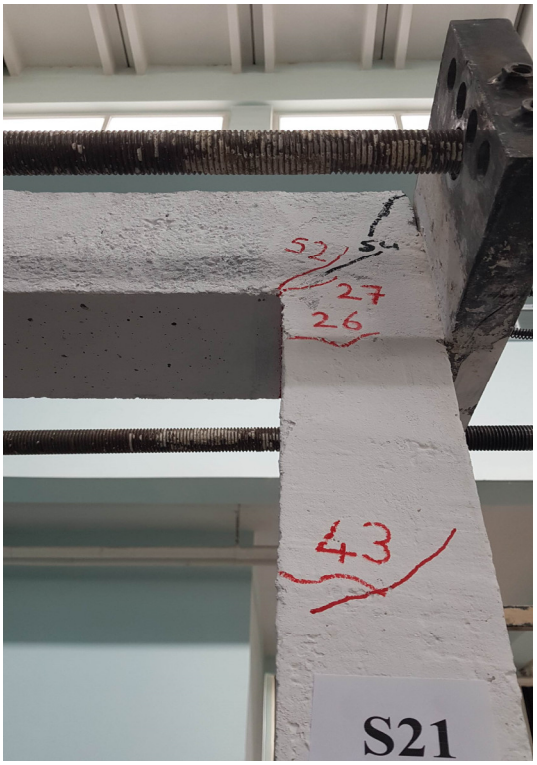
Deney çerçevesine uygulanan yükleme protokolü ise Şekil 3.176 ve Şekil 3.177'de gösterilmiştir. Yükleme geçmişi, çerçeveye uygulanan toplam yatay yük ve tepe deplasmana göre farklı grafiklerde verilmiştir. Yük ve deplasman geçmişinden de görüleceği gibi, çerçevenin akmaya ulaşmasıyla birlikte yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollüye çevrilmiştir. Yükleme protokolü referans çerçeve için deney öncesi yürütülen SAP2000 statik itme analizinde 6. çevrim olarak belirlenmişti (Şekil 3.72). Betonarme çerçeveye chevron (ters V) sönümleyici + braket elemanı eklendiğinden toplam yatay rijitlik ve dayanım bir miktar artmaktadır. Bu nedenle boş referans çerçevenin aktığı yükten daha büyük bir yükte (dolayısıyla daha ileri bir çevrimde) akmanın gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Akmanın gerçekleştiği 10. çevrimin negatif (çekme) adımından sonra yükleme, yük kontrollüden deplasman kontrollü yüklemeye çevrilmiştir.

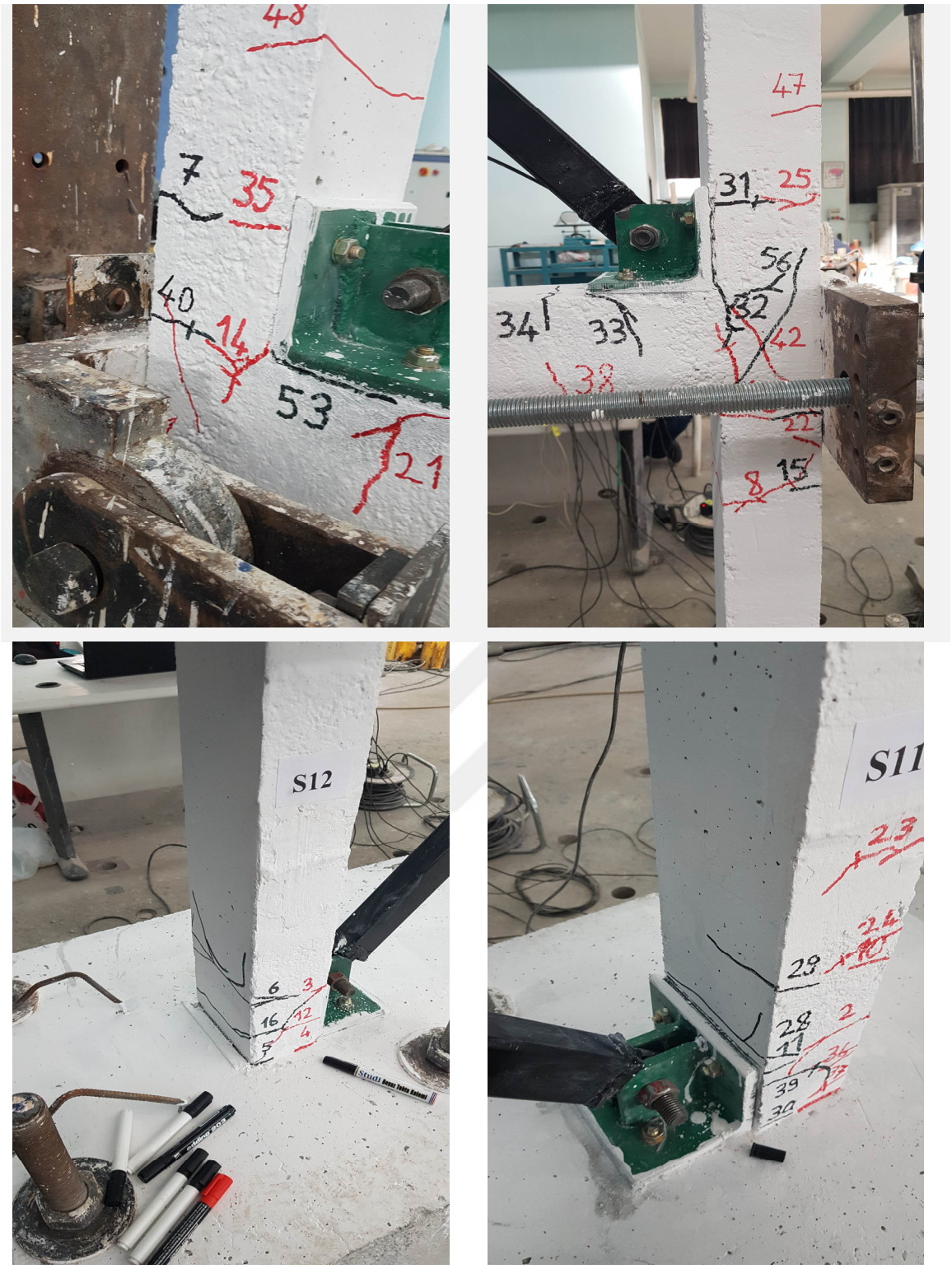
Yükleme protokolüne göre, 10. çevrimin negatif adımında sistemin akmasını sağlayan 4826 kg (48.26 kN) değerine kadar 500 kg (5kN)' lık yük kontrollü artışlar uygulanmış, bu yüke ulaşırken -37.94 mm tepe deplasman değerine kadar gidilmiş, bu değerden sonra deney sonuna kadar 5'er mm deplasman artışlarıyla, deplasman kontrollü olarak göçme sınırı kabul edilen %4 ötelenmeye yükleme sisteminin elverdiği ölçüde yaklaşılmıştır. Negatif yönde (çekmede) yükleme pistonunun strok boyu yetersiz olduğundan, deneye pozitif yönde 72.42 mm, negatif yönde 72.65 mm deplasman değerinde son verilmiştir. Tip 2 kurşun numunesinin pozitif (itme) yönündeki adımlarında 71.37 kN olan maksimum yatay yükü, deney sonunda (20. çevrim) 61.41 kN değerine düşmüştür. Negatif (çekme) yönündeki adımlarda ise 54.51 kN olan maksimum yatay yük, deney sonunda (19. çevrim) 50.66 kN değerine düşmüştür. Deney çerçevesi son çevrimde pozitif (itme) adım yönünde maksimum yük taşıma kapasitesinin %14'lük kısmını kaybetmiştir, negatif (çekme) adım yönünde ise maksimum yük taşıma kapasitesinin %7.06'sını kaybetmiştir, dolayısıyla sünek kabul edilebilir bir davranış sergilemiştir.

Şekil 3.167. T2-KRN deney çerçevesinde oluşan ilk çatlaklar

Şekil 3.168. T2-KRN deney çerçevesinde ilk çatlaklardan sonra görünüm

Akma çevrimine yakın çevrimlerde (9, 10, 11 nolu çevrimler) özellikle kolon - temel birleşim bölgesinde ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde 45º açıyla kesme çatlakları oluşmuştur. Kolon-temel birleşim bölgesine bağlanan 1. kat bağlantı köşebentleri, bu bölgede daha önce oluşan çatlakların 45º'li çatlaklar ile birleşmesiyle kolondan ayrılmaya başlamıştır (Şekil 3.169), (Şekil 3.170).





Şekil 3.169. T2-KRN deney çerçevesinde akma sırasında oluşan çatlaklar

Şekil 3.170. T2-KRN deney çerçevesinde akma sonrası görünüm

Akma çevriminden sonra beklenenin aksine çerçevede yük düşüşü yaşanmamış, maksimum yükün elde edildiği 16. çevrimin pozitif adımına kadar gittikçe azalan bir yatay yük artışı gözlemlenmiştir. Negatif yönde ise 17. çevrimde maksimum yüke ulaşılmıştır. Negatif yöndeki maksimum yük, pozitif yöndeki maksimum yükten %23.6 daha azdır. Akma çevrimini takip eden diğer çevrimlerde, özellikle kirişlerde ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde çatlak yoğunluğu artmış, mevcut çatlaklar ise gelişmeye devam etmiştir. Deneydeki maksimum deplasman 19'uncu pozitif çevrimde 72.42 mm, bu deplasmandaki yatay yük ise 61.41 kN olarak ölçülmüştür. Deney boyunca her çevrimde meydana gelen çatlak ve hasarlara ait bilgiler Çizelge 3.19'da verilmiştir. Çizelgede her yükleme çevrimi (itme pozitif (+), çekme negatif (-) işaretli yükleme adımları olarak), ölçülen maksimum deplasman, maksimum yatay yük ve çevrim adımı sonrası yapılan muayenede görülen çatlak ve hasarlara ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.19. T2-KRN deney çerçevesine ait çatlak ve hasarlara ait bilgiler

Deney: Tip 2 Kurşun (T2-KRN)			
Çevrim No	**Yük**	**Deplasman**	**Açıklama**
+1	+511	+1,04	İlk üç çevrimde çatlak oluşumu gözlenmedi. Yükleme olarak kuvvet kontrollü yükleme protokolü izlendi. Akmaya kadar her çevrimde pozitif ve negatif yönlerde 500 kg artışlarla yatay yük büyütüldü.
-1	-664	-1,40	
+2	+1049	+2,32	
-2	-1195	-2,67	
+3	+1530	+3,42	

-3	-1680	-3,29	S11 kolonunun temel birleşiminde 1 nolu çatlak, 20 cm yükseklikte dış yüzde 2 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun temel birleşiminde iç yüzde 3 nolu çatlak, 20 cm yükseklikte 4 nolu çatlak oluştu.
+4	+2000	+5,12	S12 kolonunda 3 ve 4 nolu çatlaklar karşısında 5 ve 6 nolu çatlaklar oluştu. S22 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminden 10 cm yükseklikte dış yüzde 7 nolu çatlak oluştu.
-4	-2000	-4,19	S11 kolonunun K1 kirişi ile birleşiminde 8 ve 9 nolu çatlaklar oluştu. S11 kolonunun temel birleşiminden 25 cm yükseklikte dış yüzde 10 nolu çatlak oluştu.
+5	+2550	+6,79	S11 kolonunun temel birleşiminden 12 cm yükseklikte 11 nolu çatlak oluştu.
-5	-2505	-6,41	S12 kolonunun alt ucunda 12 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 13 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K1 ile birleşiminde 14 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun K1 kirişi ile birleşimindeki 9 nolu çatlak dallandı.
+6	+3050	+8,51	S11 kolonunun üst ucunda 8 nolu çatlak karşısında 15 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun alt ucunda 12 nolu çatlak karşısında 16 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun üst ucunda 13 nolu çatlak karşısında 17 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 18 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kolonuyla birleşiminde 19 ve 20 nolu çatlaklar oluştu.
-6	-3000	-9,41	K1 kirişinin sol ucunda bağlantı köşebenti dibinde 21 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde dış yüzde 22 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunu orta bölgesinde, dış yüzde 23 ve 24 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminden 10 cm yukarıda dış yüzde 25 nolu çatlak oluştu ve dallandı. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 26 ve 27 nolu çatlaklar oluştu. 14 nolu çatlak dallandı.
+7	+3520	+10,57	S11 kolonunun alt ucunda1, 2 ve 10 nolu çatlaklar karşısında sırasıyla 30, 28 ve 29 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 31 ve 32 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 33 ve 34 nolu çatlaklar oluştu.
-7	-3580	-14,43	S22 kolonunun alt ucunda 7 nolu çatlak karşısında 35 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sol ucunda mesnet yüzünden 25 cm uzaklıkta üst yüzde 36 nolu çatlak oluştu. S11 kolonunun temel birleşim bölgesinde dış yüzde 37 nolu çatlak oluştu. K1 kirişinin sağ ucunda 34 nolu çatlak karşısında alt yüzde 38 nolu çatlak oluştu.
+8	+4027	+13,59	S11 kolonunun temel birleşim bölgesinde 36 nolu çatlak karşısında 39 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde dış yüzde 40 nolu çatlak orta bölgesinde iç yüzde 41 nolu çatlak oluştu.
-8	-4005	-20,67	S11 kolonunun K1 kirişiyle birleşim bölgesinde 42 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun orta bölgesinde iç yüzde 43 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun orta bölgesinde dış yüzde 41 nolu çatlak karşısında 44 nolu çatlak oluştu. S22 kolonunun K2 kirişi ile birleşiminde dış yüzde 45 ve 46 nolu çatlaklar oluştu. S21 kolonunun K1 kirişi birleşim bölgesinden 25 cm yukarısında 47 nolu çatlak oluştu. Diğer muhtelif çatlaklarda uzama ve dallanma meydana geldi.

+9	+4547	+16,55	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar uzadı ve dallandı. S12 kolonunun temel birleşimindeki 5, 12 ve 16 nolu çatlaklar 45º'li bir çatlak üzerinde birleşti.
-9	-4490	-28,41	S22 kolonunun orta bölgesinde iç yüzde 48 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun K1 kirişiyle birleşiminde 45º'li 51 nolu çatlak oluştu. S12 kolonunun üst ucunda 50 nolu çatlak oluştu ve 13, 17 nolu çatlaklar ile birleşti. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 52 nolu çatlak oluştu.
+10	+5000	+20,70	K1 kirişinin sol ucuna bağlı köşebent altında 53 nolu çatlak oluştu. S21 kolonunun K2 kirişiyle birleşiminde 45º açı ile 54 nolu çatlak oluştu. Mevcut çatlaklar uzadı ve genişledi.
AKMA GERÇEKLEŞTİ. DEPLASMAN KONTROLLÜ YÜKLEMEYE GEÇİLDİ.			
-10	-4700	-38,25	Mevcut çatlaklar uzadı ve genişledi.
+11	+5070	+25,30	S12 kolonuyla K1 kirişi birleşiminde 45º'li açıyla 55 nolu çatlak oluştu.
-11	-4550	-41,25	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar genişledi.
+12	+5300	+30,57	S21 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde 56 ve 57 nolu çatlaklar oluştu. K1 kirişinin sol ucunda alt yüzde 58 ve 59 nolu çatlaklar oluştu. S22 kolonunun üst ucunda iç yüzde 60 nolu çatlak oluştu. Mevcut çatlaklar gelişmeye devam etti.
-12	-4879	-46,80	Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. S12 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde alt köşede 18 nolu çatlak etrafında basınç ezilmesi görüldü.
+13	+5500	+35,63	K1 kirişinin sağ ucunda üst yüzde 61 nolu çatlak oluştu.
-13	-4700	-46,52	Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. K2 kirişi sol ucunda S22 kolonuyla birleşim yerinde alt köşede 46 ve 20 nolu çatlak üzerinde basınç ezilmesi görüldü.
+14	+6050	+40,60	S12 kolonunun dış yüzünde boyuna donatı boyunca 62 nolu çatlaklar oluştu.
-14	-4800	-52,16	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi. Mevcut çatlaklar genişledi ve uzadı. 18 nolu çatlak etrafında basınç ezilmesi gelişmeye devam etti.
+15	+6400	+45,56	S12 kolonunun üst ucunda 63 nolu çatlak oluştu.
-15	-4650	-51,51	Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
+16	+6700	+50,46	S21 kolonu ile K2 kirişi birleşiminde daha önce 45º açı ile oluşan 54 nolu çatlak 3 mm genişledi. S22 kolonunun alt kısmında K1 kirişi birleşim bölgesinden 20 cm yükseklikte 48 nolu çatlak karşısında dış yüzde 64 nolu çatlak oluştu. Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı.
-16	-4800	-56,20	S12 kolonu ile K1 kirişi birleşiminde 66 ve 67 nolu çatlaklar oluştu. Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı.
+17	+7000	+55,80	S12 kolonunun dış yüzünde boyuna donatı boyunca 68 ve 69 nolu çatlaklar oluştu. Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı.
-17	-5000	-61,60	Mevcut çatlaklar genişledi ve dallandı. Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
+18	+6380	+60,28	
-18	-4650	-66,73	S12 kolonunun dış yüzünde boyuna donatı boyunca 70 nolu çatlaklar oluştu. Daha önce S12 kolonunun temel birleşimindeki 5, 12 ve 16 nolu çatlaklar 45º'li bir çatlak üzerinde birleşmişti. Bu çatlağın gelişmesiyle genişliği 4 mm

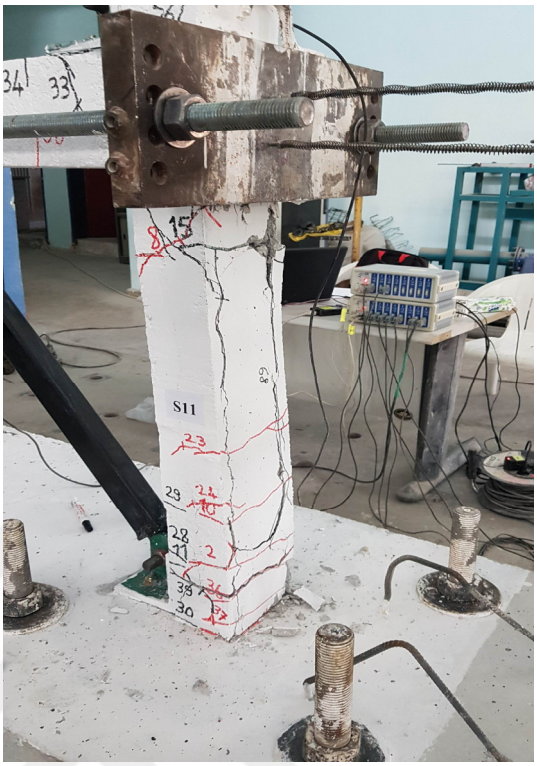
			ye ulaştı. S12 kolonunun üst ucundaki 18 nolu çatlak gelişti, plastik mafsal oluşumu gözlendi.
+19	+6500	+65,50	S11 kolonunun temel birleşimindeki 39 nolu çatlak genişledi. 1. kat kolonlarının boyuna donatılarındaki gerilmelerin artmasıyla beton ile aderans kaybı oluştu. Donatıların üstündeki dış kabuk döküldü.
-19	-5000	-73,30	19. çevrimde göreli ötelenme değeri %4'e ulaştığından deneye son verildi.
+20	+6100	+72,68	

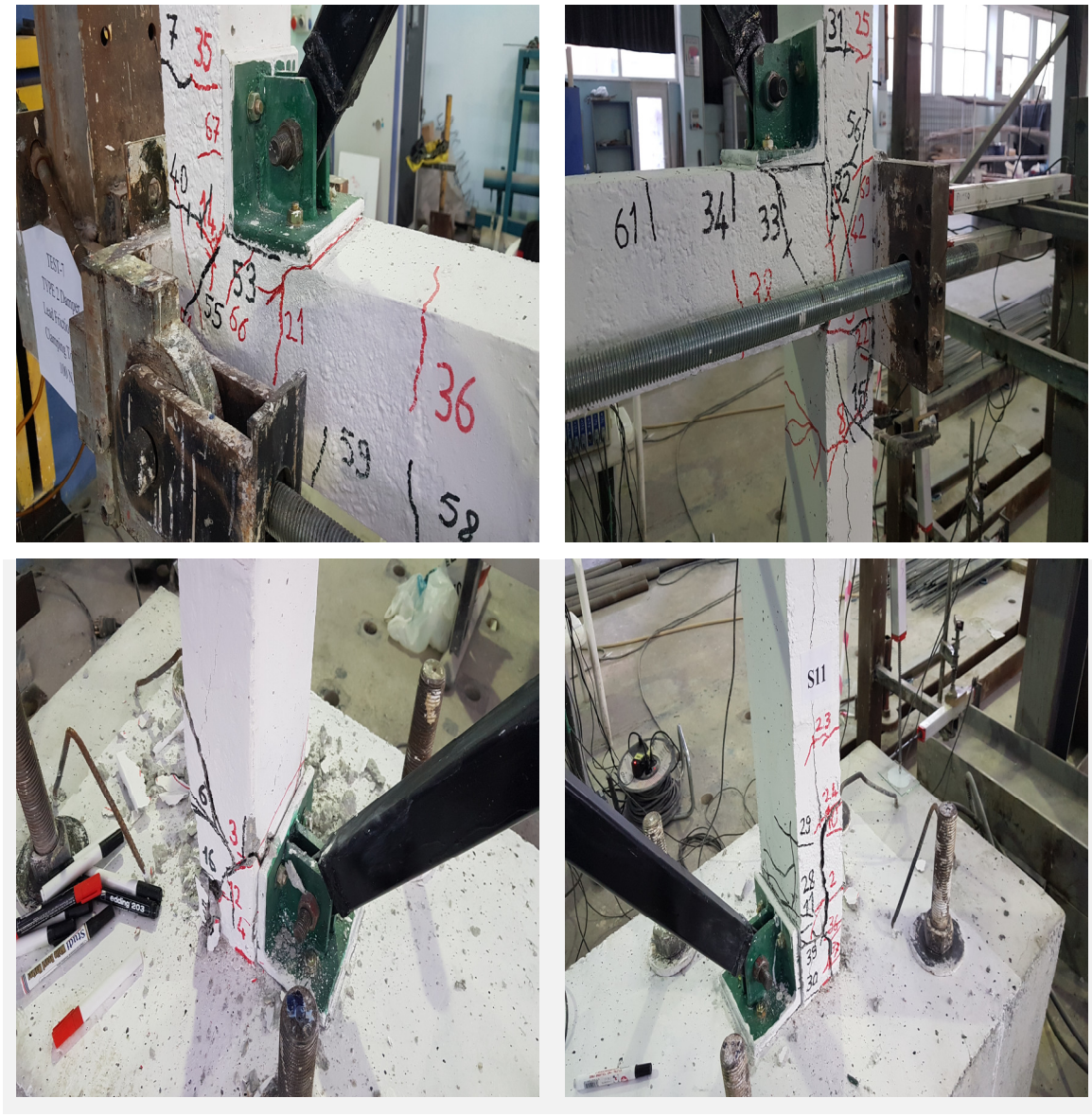
Çalışmadaki betonarme çerçevelerde kolonlar, kirişlerden hareket yönünde daha zayıf olduğundan plastik mafsallar çoğunlukla kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Tip 2 sönümleyicilerin kullanıldığı deney çerçevelerinde çatlakların dağılımı, referans ve Tip 1 sönümleyicili çerçeve numunelere göre daha dağınıktır. Referans çerçevede kiriş uçlarında herhangi bir hasar görülmemişken, Tip 2 kurşun numunesinde kiriş uç bölgelerinde çatlaklar görülmüştür. Referans çerçevede çatlaklar yığılı plastik davranışa özgü yayılım gösterirken, Tip 2 kurşun numunesinde çatlak yayılımı daha geniş bir bölgede meydana gelmiştir.

İlk çevrimlerde yatay yük az ve betonarme çerçeve etkiyen yüke karşı rijit olduğundan sönümleyicilerde hareket oluşmamıştır. İlk çatlakların oluşmasıyla, sönümleyiciler de harekete geçmiştir. Toplam yatay yükün daha fazla olduğu 1. katta, Tip 2 kurşun sönümleyici daha etkin çalışmıştır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerin kolon-temel birleşimlerinde büyük kesme çatlaklarının oluşmasıyla betonarme çerçeve yumuşamış ve sönümleyicilerin çalışması kısıtlanmıştı. Genel olarak Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde chevron braket sisteminin bu açıdan daha avantajlı olduğu görülmüştür. Hasar ve çatlaklar 1. kat kolonlarının tamamına yayılmış, deney sonuna kadar büyük kesme çatlağı gelişmemiştir. 2. kat kolonlarında da yaygın çatlaklar gözlenmiştir. Deney sonunda S12 kolonunun dış yüzünde donatılar boyunca kabuk betonu dökülmüş ve S12 kolonunun temel birleşiminde plastik mafsal oluştuğundan, bu bölgedeki bağlantı köşebentinin ankrajları kısmen betondan sıyrılmıştır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelere göre deney sonunda hasar oldukça sınırlı kalmıştır. Tip 2 sönümleyici + chevron braket sisteminin yapısal taşıyıcılarla daha fazla etkileşime girdiği ve hasarı yaydığı görülmüştür.

Şekil 3.171'de maksimum deplasman değerinde kolon, kiriş ve birleşim bölgelerinde çatlak ve hasar durumları verilmiştir. Fotoğraflardan görülebileceği gibi genel itibariyle ötelenme ve çatlak gelişiminin büyük bir kısmı 1. kat elemanlarında yoğunlaşmıştır. Şekil 3.172'de Tip 2 kurşun çerçeve numunenin deney sonu genel

görünüşü verilmiştir. Negatif (çekme) adımlarında oluşan çatlaklar kırmızı renkli, pozitif (itme) adımlarında oluşan çatlaklar siyah renkli çizgilerle gösterilmiştir.





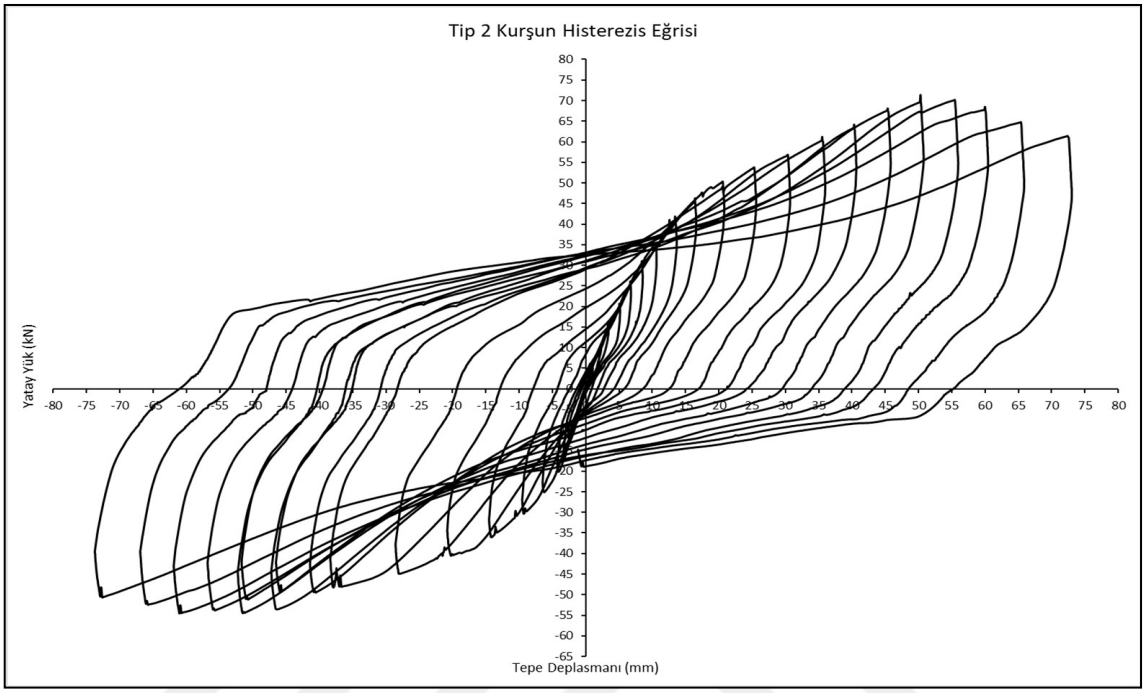
Şekil 3.171. T2-KRN deney çerçevesinde deney sonunda oluşan çatlak ve hasarlar

Şekil 3.172. T2-KRN deney çerçevesinde deney sonunda ön ve arka görünüş

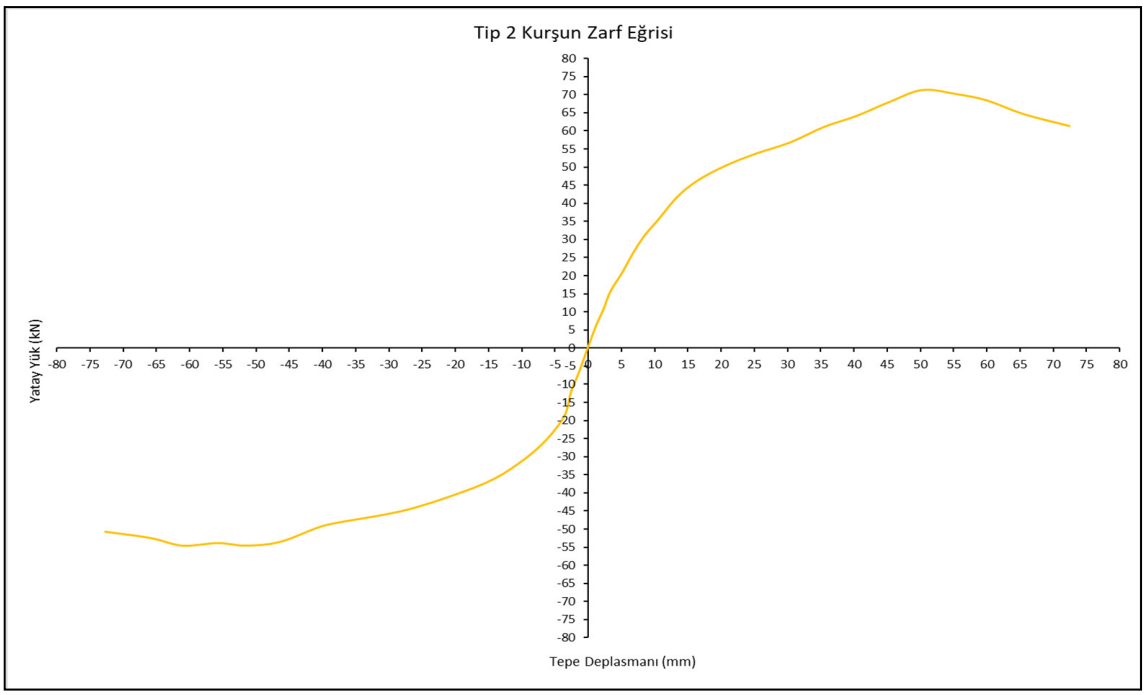
Tip 2 kurşun numune için yapılan deney sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek sırasıyla aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

1. Toplam Yatay Yük – Tepe Deplasmanı Grafiği (Histerezis Eğrisi) Şekil 3.173'de
2. Toplam Yatay Yük– Tepe Deplasmanı Grafiği (Zarf Eğrisi) Şekil 3.174'de
3. Numunenin Rijitlik Değişimi Grafiği Şekil 3.175'de,
4. Numunenin Deplasman Geçmişi Grafiği Şekil 3.176'da,

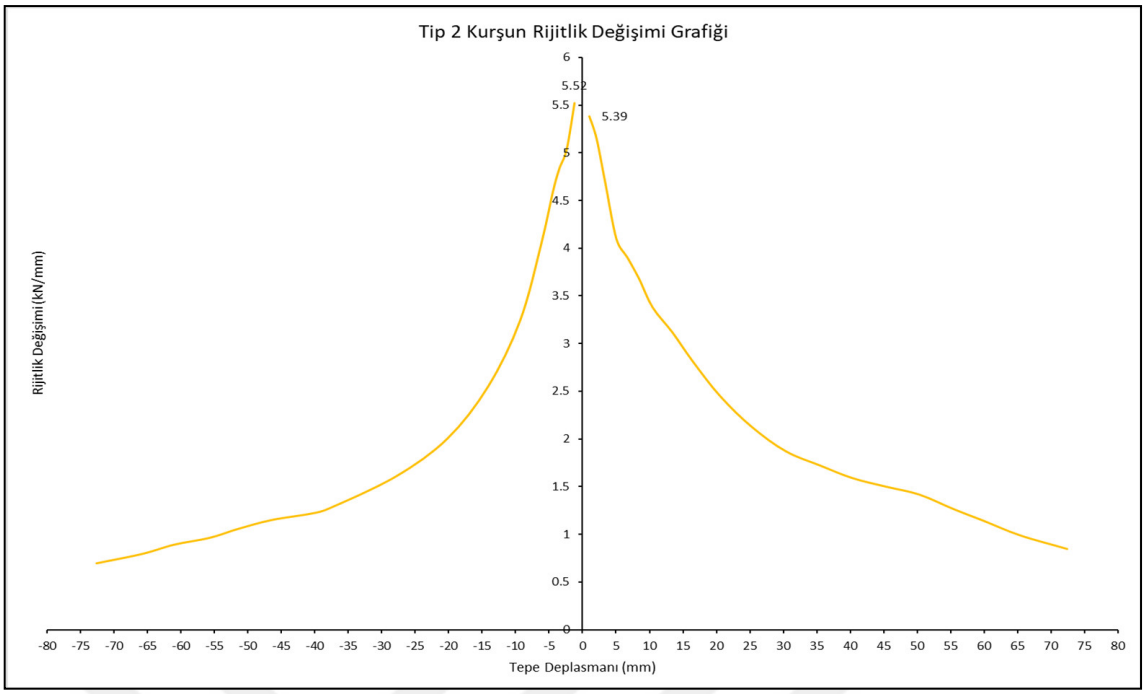
5. Numunenin Yük Geçmişi Grafiği Şekil 3.177'de,
6. Numunenin Süneklik Değerlendirmesi Grafiği Şekil 3.178'de,
7. Numunenin Kümülatif Enerji Tüketim Grafiği Şekil 3.179'da gösterilmiştir.



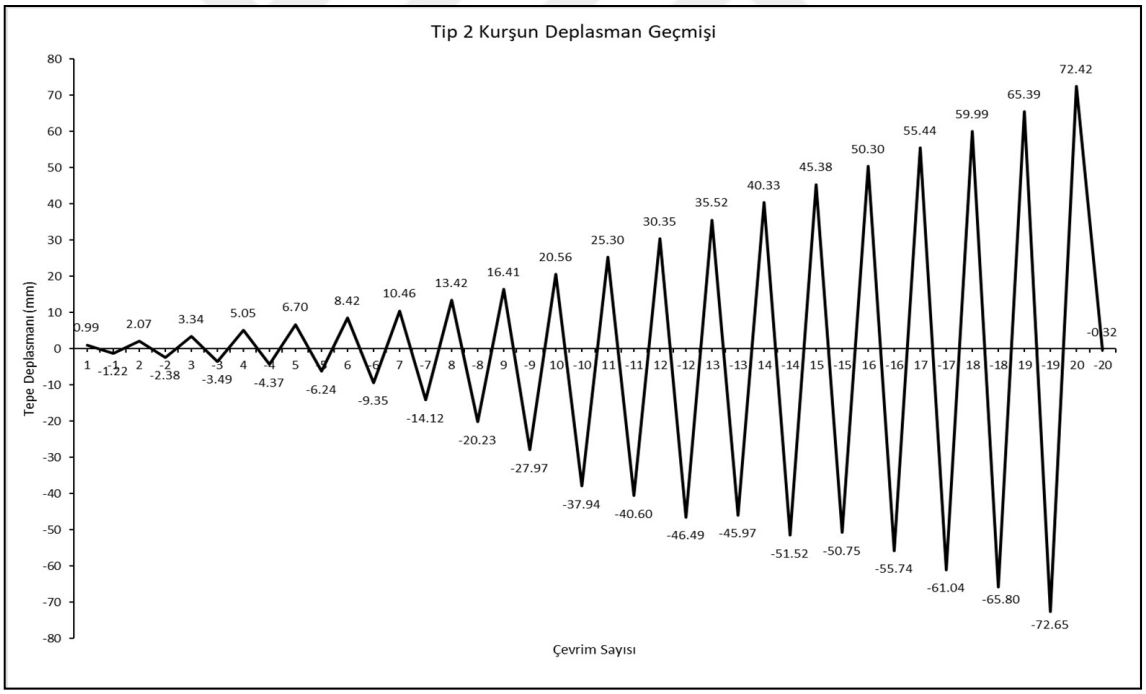
Şekil 3.173. T2-KRN deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



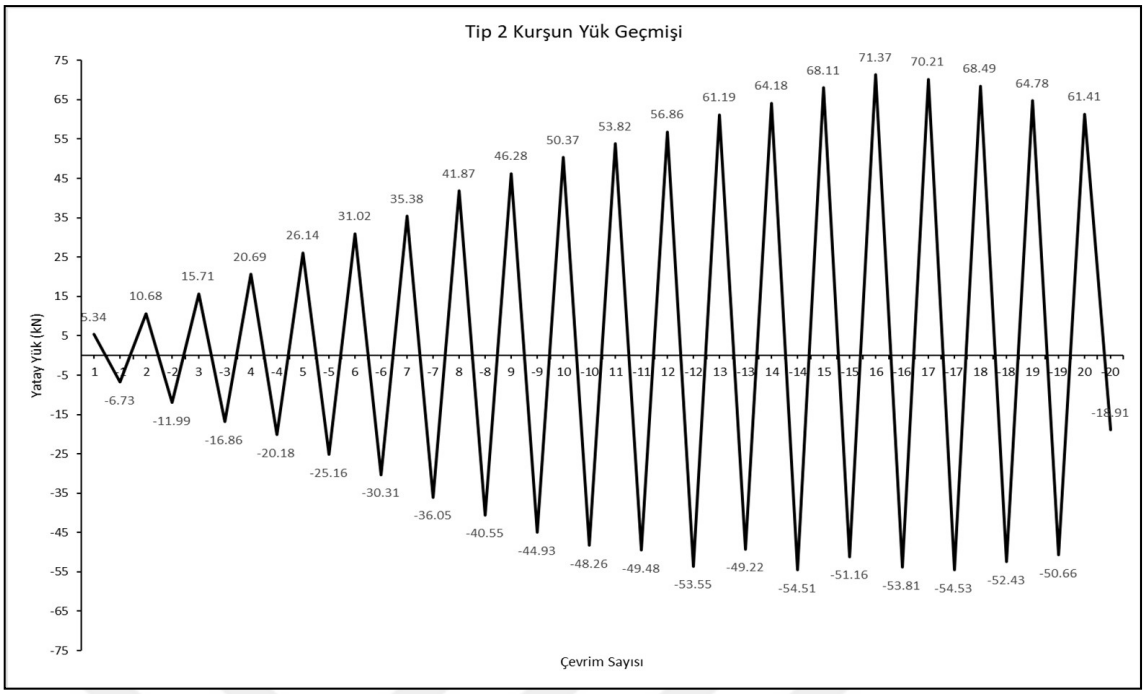
Şekil 3.174. T2-KRN deney çerçevesinde tepe deplasmanına bağlı histerezis eğrisi



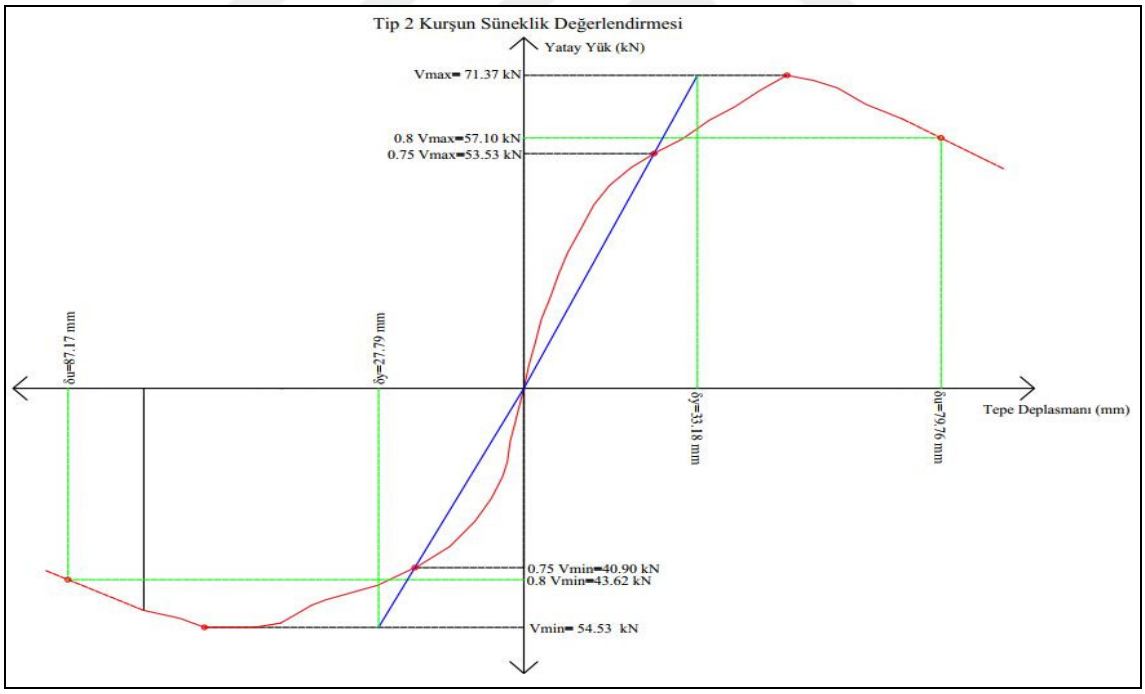
Şekil 3.175. T2-KRN deney çerçevesine ait rijitlik değişimi grafiği



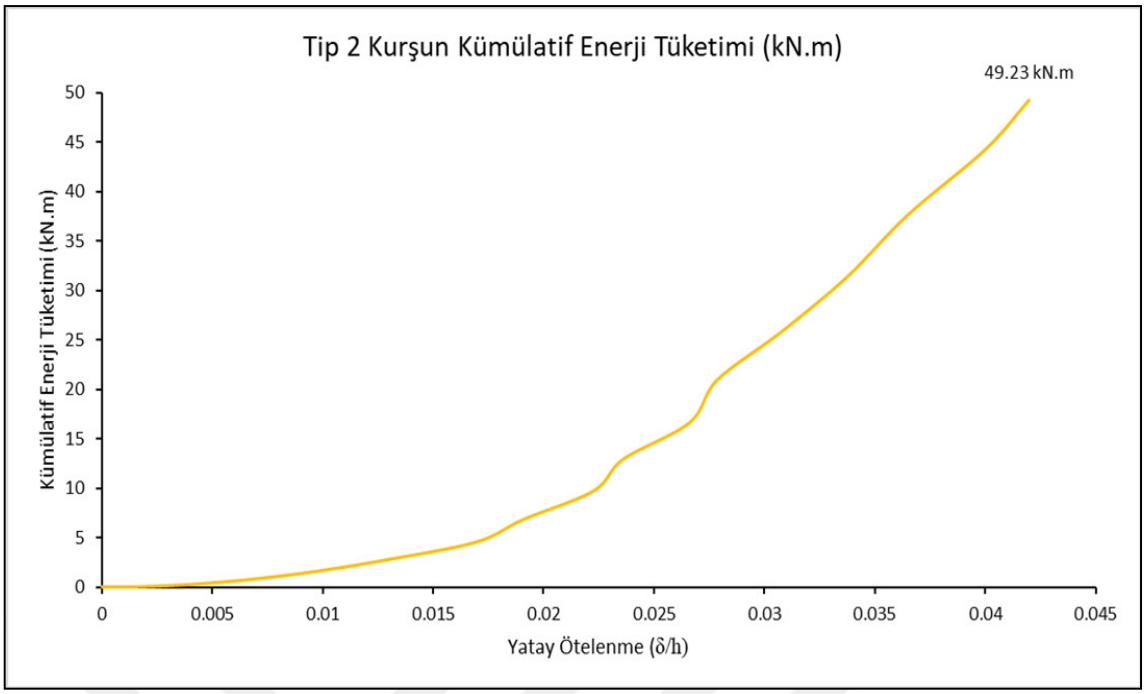
Şekil 3.176. T2-KRN deney çerçevesine ait deplasman geçmişi (Tepe deplasmanına göre)



Şekil 3.177. T2-KRN deney çerçevesine ait yük geçmişi (Taban kesme kuvvetine göre)



Şekil 3.178. T2-KRN deney çerçevesine ait süneklik değerlendirilmesi grafiği



Şekil 3.179. T2-KRN deney çerçevesine ait kümülatif enerji tüketimi – 2. kat ötelenme grafiği

Bütün deney boyunca tüm çevrimlerde Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı histerezis eğrileri içerisinde kalan alanlar toplanarak Tip 1 karbonfiber çerçeve numunesinin kümülatif enerji tüketimi grafiği Şekil 3.179'daki gibi çizilmiştir. Ayrıca deneydeki her bir çevrimin pozitif ve negatif adımlarındaki maksimum yüklerin, bu yüklere ait tepe deplasman değerlerine bölünmesiyle her çevrim için bulunan rijitlikler ile rijitlik değişim grafiği çizilerek Şekil 3.175'de gösterilmiştir. Şekil 3.178'de süneklik oranının bulunduğu süneklik değerlendirmesi grafiği gösterilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde deneyleri yapılarak ayrıntılı sonuçları grafikler halinde sunulduğu 7 adet deney birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, deprem davranışı zayıf, 2 katlı tek açıklıklı betonarme bir çerçeve numune, 2 farklı sönümleyici tipi ve 3 farklı sürtünme pedi kombinasyonuyla üretilen 6 adet sönümleyici ile rehabilite edilerek deneyleri yapılmıştır. Referans numune olarak sönümleyicisiz, yalın bir çerçeve denenmiş, sönümleyicili numunelerden elde edilen sonuçlar bu referans numune ile bireysel ve grup olarak karşılaştırılmıştır. Böylece Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicili betonarme çerçeveler hem referans numune ile hem de kendi aralarında kıyaslanarak davranış farklılıkları ortaya konmuştur.

Sönümleyicili çerçevelerde özellikle kümülatif enerji tüketimi ve rijitlik değişimi bakımından farklılıkların belirlenmesi önemlidir. Sönümleyicilerin, betonarme çerçevelerde yatay rijitliği fazla artırmadan (yatay rijitliğin çok artması daha büyük deprem ivmelerini ve deprem kuvvetlerini çekmektedir) enerji tüketimini artırabilmesi beklenen bir durumdur.

Karşılaştırma amaçlı oluşturulan gruplar aşağıdaki gibidir;

a) Referans numune ile Tip 1 Karbonfiber numunesinin karşılaştırılması

b) Referans numune ile Tip 1 Kurşun numunesinin karşılaştırılması

c) Referans numune ile Tip 1 Pirinç numunesinin karşılaştırılması

d) Referans numune ile Tip 2 Karbonfiber numunesinin karşılaştırılması

e) Referans numune ile Tip 2 Pirinç numunesinin karşılaştırılması

f) Referans numune ile Tip 2 Kurşun numunesinin karşılaştırılması

Bu bölümde, karşılaştırma amaçlı verilecek grafikler aşağıdaki sırayla şunlardır;

a) Toplam yatay yük – Tepe deplasmanı dayanım zarfı

b) Deney numunelerine uygulanan deplasman geçmişi

c) Deney numunelerine uygulanan yükleme geçmişi

d) Toplam yatay yük – Tepe deplasmanına bağlı rijitlik değişim grafiği

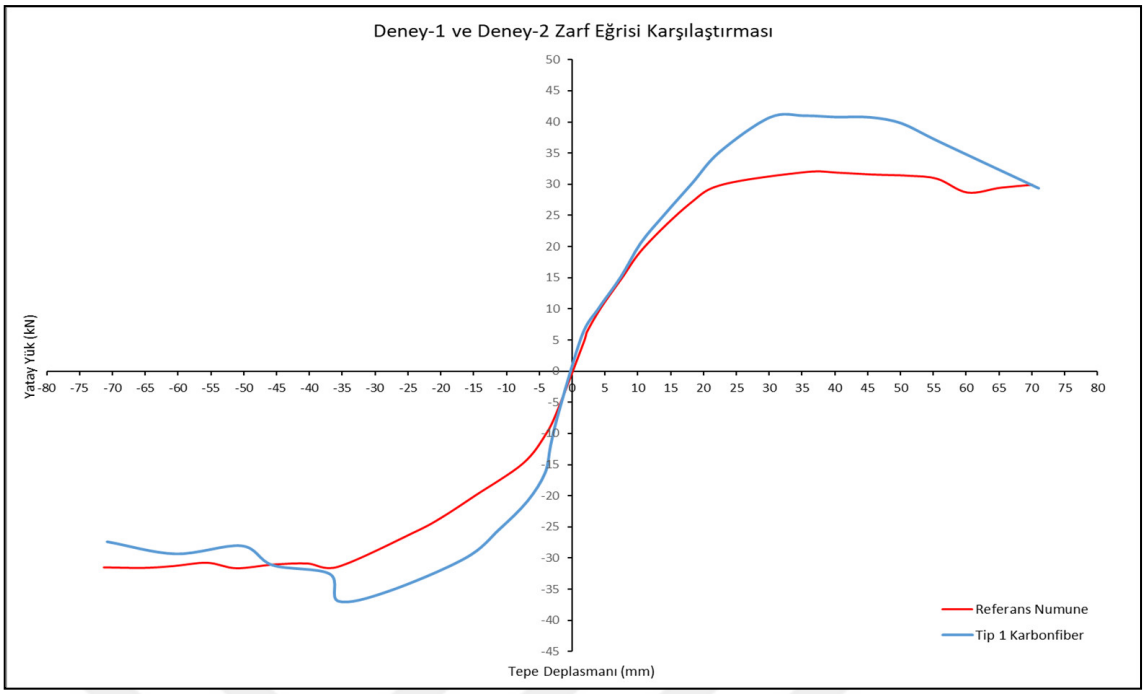
e) Kümülatif toplam tüketilen enerji – ötelenme oranı grafiği

4.1. Referans Numune (RN) ile Tip 1 Karbonfiber (T1-KBF) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-2)

Bu bölümde ilk olarak, Deney-1 referans deney çerçevesi ile Deney-2 Tip 1 karbonfiber sönümleyicili deney çerçevesinin sonuçlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır. Deney-1 ve Deney-2 numunelerinin her ikisinde de deney başlangıcından akma değerine kadar ±500 kg (5 kN) yük artışı uygulanmıştır. Akma değerinden sonra ise, yük kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek ±5 mm artış ile % 4' lük tepe ötelenmesine karşılık gelen 72 mm tepe deplasmanına kadar yüklemelere devam edilmiştir.

Deney-1 ve Deney-2 karşılaştırmalı deplasman ve yük geçmişleri, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de yük ve deplasman değerlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. T1-KBF numunesinde çevrim sayısı RN ile aynı kalmasına rağmen, her çevrim adımında deplasmanların küçülürken, yüklerin büyüdüğü görülmektedir.

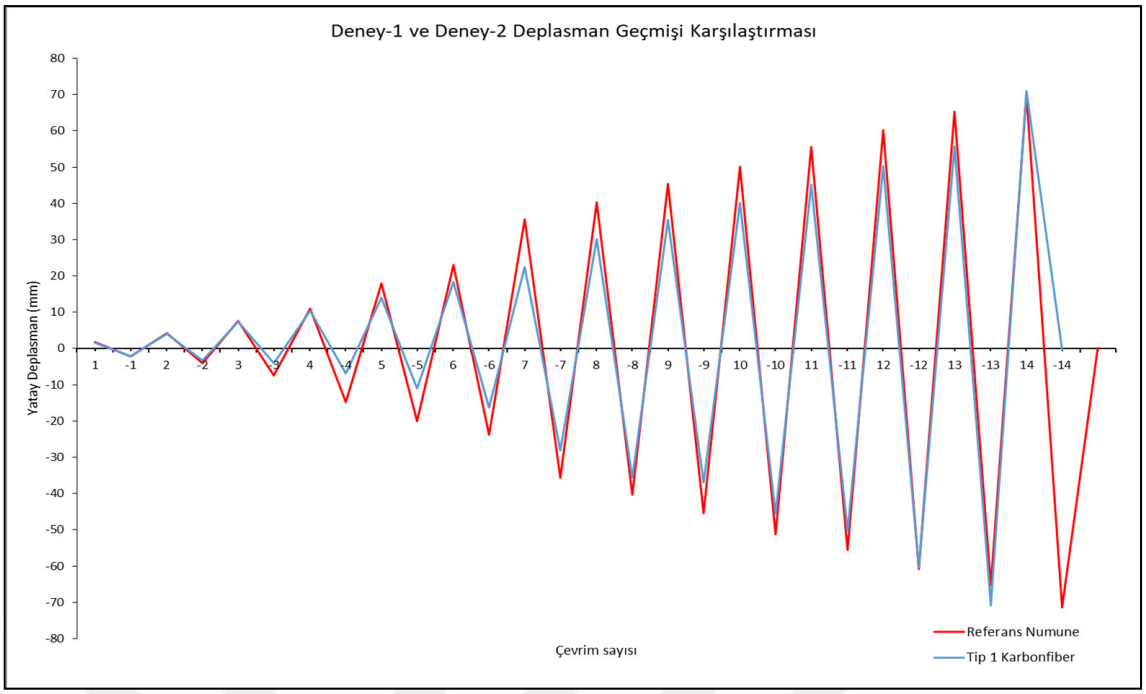
Deney-1 ve Deney-2 deney numunelerinin yatay yük-tepe deplasmanı zarf eğrileri karşılaştırma grafiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir. T1-KBF numunesinin pozitif çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yükün 40.69 kN olduğu görülmektedir. RN numunesi ise pozitif çevrimlerde maksimum 32 kN yatay yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T1-KBF numunesi pozitif çevrimler yönünde RN numunesinden % 27.15 daha fazla dayanım kazanmıştır. Negatif çevrimlerde ise T1-KBF numunesi 36.89 kN maksimum yatay yüke ulaşırken, RN numunesi aynı yönde 31.45 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T1-KBF numunesi negatif çevrimler yönünde RN numunesinden %17.29 daha fazla yük taşımıştır. T1-KBF numunesinde negatif çevrimde, pozitif çevrimden daha düşük dayanım elde edilmesinin sebebi, diyagonal sönümleyici + braket elemanının bağlandığı köşebent bağlantı elemanının kolondan ayrılmaya başlamasıdır. Ötelenmelerin ilerlemesiyle çerçevedeki kolon temel birleşim bölgelerinde plastik mafsallar gelişmektedir. Yaklaşık %2 tepe ötelenmesine karşılık gelen -35 mm deplasman değerinde kolon diplerinde plastik mafsal çatlakları genişlemektedir. Aynı bölgede köşebenti bağlantı elemanını kolona bağlayan M10 ankraj bulonları negatif çevrimlerde diyagonal Tip 1 sönümleyici + braket elemanında oluşan çekmenin etkisiyle betondan bir miktar sıyrılmaktadır. Bu çevrimden sonraki her negatif yön adımında plastik mafsalların gelişmesiyle ankraj bulonları kolondan daha fazla ayrılarak dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Şekil 4.1.'deki zarf eğrisine bakıldığında negatif çevrim yönünde bu ayrılmadan dolayı artan bir dayanım düşüşü ve zarf eğrisinde dalgalanma göze çarpmaktadır.



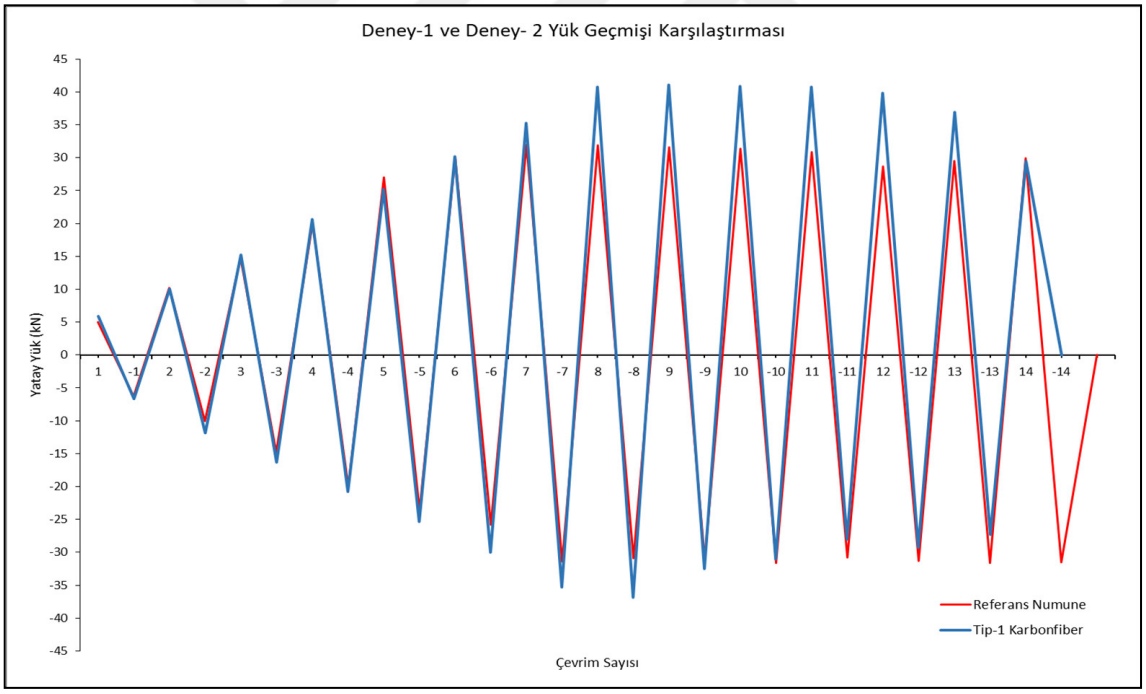
Şekil 4.1. Deney-1 ve Deney-2 numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması

Deney-1 ve Deney-2 deney numunelerine ait rijitlik değişimi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4'de verilen toplam yatay yük – tepe deplasmanı için rijitlik değişimi karşılaştırma grafiğinden görüldüğü üzere, RN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 2.87 kN/mm, negatif çevrim yönünde 2.82 kN/mm iken, T1-KBF numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 3.91 kN/mm ve negatif çevrim yönünde 4.13 kN/mm'dir. İlerleyen çevrimlerle birlikte rijitliklerin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.4'de verilen rijitlik değişim grafiğine göre T1-KBF deney numunesi RN deney numunesine göre pozitif çevrim yönünde % 36.24 başlangıç rijitliği artışı sağlarken, negatif çevrim yönünde % 46.45 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir. T1-KBF deney numunesinin negatif çevrim yönünde -35 mm deplasmanda ani rijitlik azalması görülmektedir. Şekil 4.1'deki zarf eğrileri karşılaştırmasında da görüldüğü gibi diyagonal Tip 1 sönümleyici + braket elemanında oluşan çekmenin etkisiyle betondan sıyrılma nedeniyle dayanım kaybı ve rijitlik düşüşü gözlenmiştir.

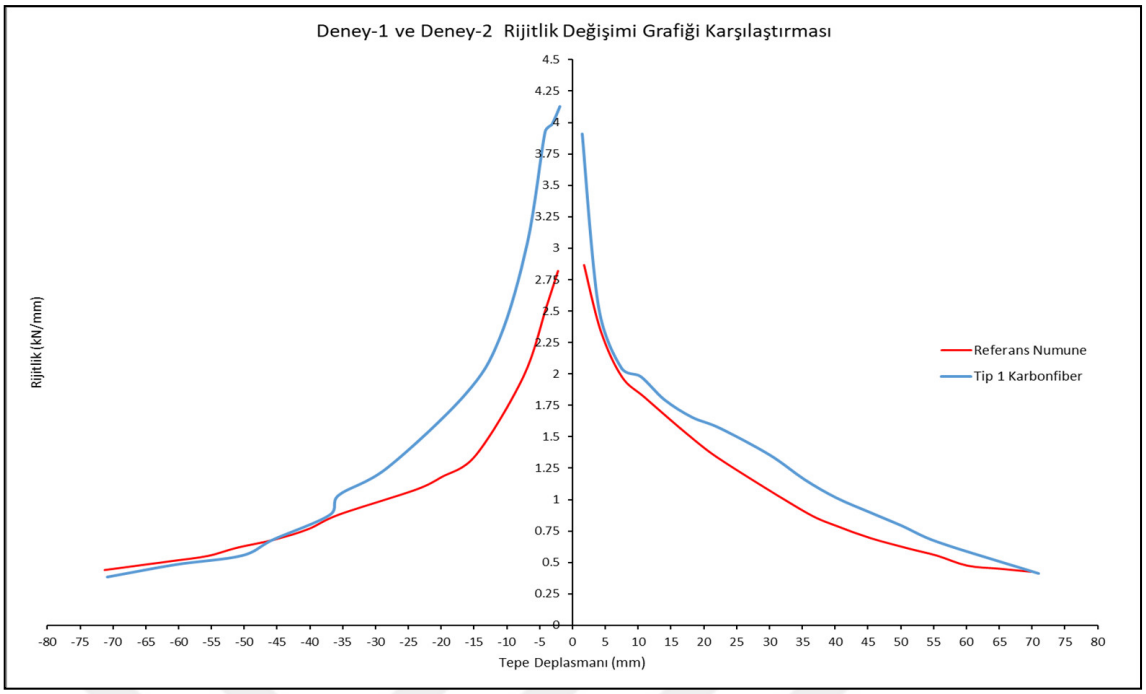
Deney-1 ve Deney-2 karşılaştırmalı enerji tüketimi grafiği, Şekil 4.5'de verilmiştir. RN çerçeve numunesi deney boyunca 8.49 kN.m enerji tüketmişken, T1-KBF çerçeve numunesi ise deney boyunca 15.34 kN.m enerji tüketmiştir. Bu verilerden hareketle T1-KBF numunesinin RN numunesinden %80.68 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



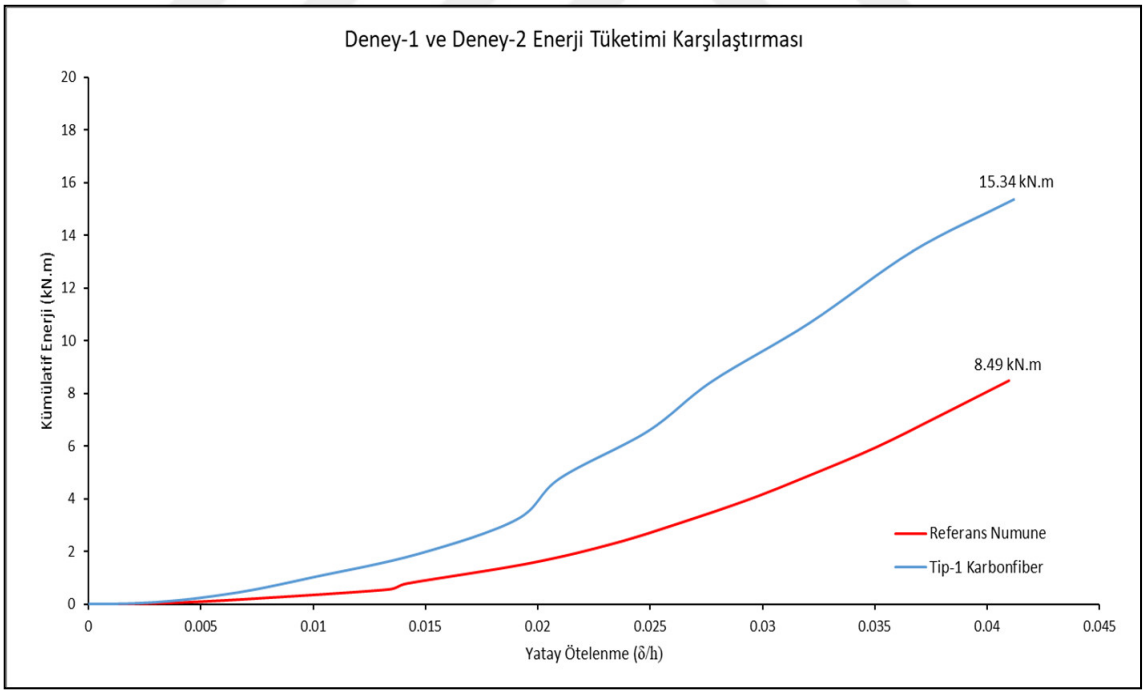
Şekil 4.2. Deney-1 ve Deney-2 numunelerinin deplasman geçmişi karşılaştırması (Yatay deplasmana göre)



Şekil 4.3. Deney-1 ve Deney-2 numunelerinin yük geçmişi karşılaştırması (Yatay yüke göre)



Şekil 4.4. Deney-1 ve Deney-2 numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük-Tepe deplasmanına göre)



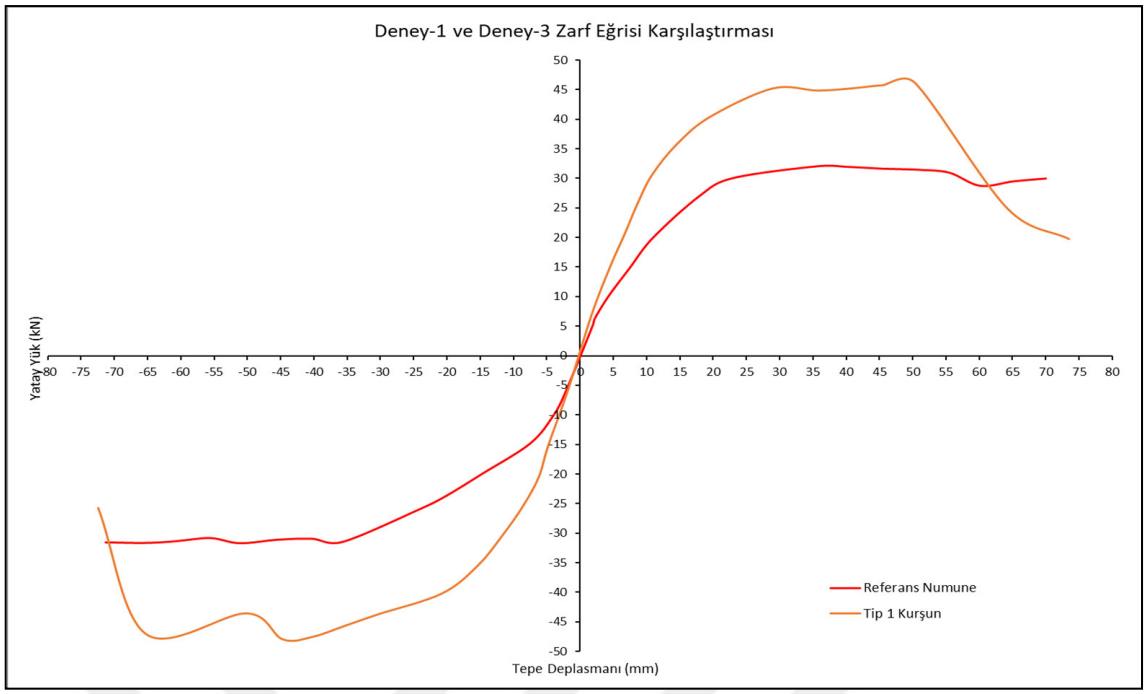
Şekil 4.5. Deney-1 ve Deney-2 numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.2. Referans Numune (RN) ile Tip 1 Kurşun (T1-KRN) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-3)

Bu bölümde ikinci olarak, Deney-1 referans deney çerçevesi ile Deney-3 Tip 1 kurşun sönümleyicili deney çerçevesinin sonuçlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır. Deney-1 ve Deney-3 numunelerinin her ikisinde de deney başlangıcından akma değerine kadar ±500 kg (5 kN) yük artışı uygulanmıştır. Akma değerinden sonra ise, yük kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek ±5 mm artış ile % 4' lük tepe ötelenmesine karşılık gelen 72 mm tepe deplasmanına kadar yüklemelere devam edilmiştir.

Deney-1 ve Deney-3 karşılaştırmalı deplasman ve yük geçmişleri, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de yük ve deplasman değerlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. T1-KRN numunesinde çevrim sayısı RN ile aynı kalmasına rağmen, her çevrim adımında deplasmanların küçülürken, yüklerin büyüdüğü görülmektedir.

Deney-1 ve Deney-3 deney numunelerinin yatay yük-tepe deplasmanı zarf eğrileri karşılaştırma grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir. T1-KRN numunesinin pozitif çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yükün 46.13 kN olduğu görülmektedir. RN numunesi ise pozitif çevrimlerde maksimum 32 kN yatay yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T1-KRN numunesi pozitif çevrimler yönünde RN numunesinden % 44.16 daha fazla dayanım kazanmıştır. Negatif çevrimlerde ise T1-KRN numunesi 47.97 kN maksimum yatay yüke ulaşırken, RN numunesi aynı yönde 31.45 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T1-KRN numunesi negatif çevrimler yönünde RN numunesinden % 52.53 daha fazla yük taşımıştır. T1-KRN numunesinde negatif ve pozitif çevrimlerde yakın maksimum dayanım elde edilmiştir. 1. kattaki sönümleyici mekanizma ile betonarme çerçeve etkileşiminden dolayı S11 ve S12 kolon diplerindeki plastik mafsal bölgeleri aşırı hasar görmüştür. Bu nedenle pozitif ve negatif yönde 50 mm tepe deplasmanlarından sonra dayanım hızlı bir şekilde düşmüştür.

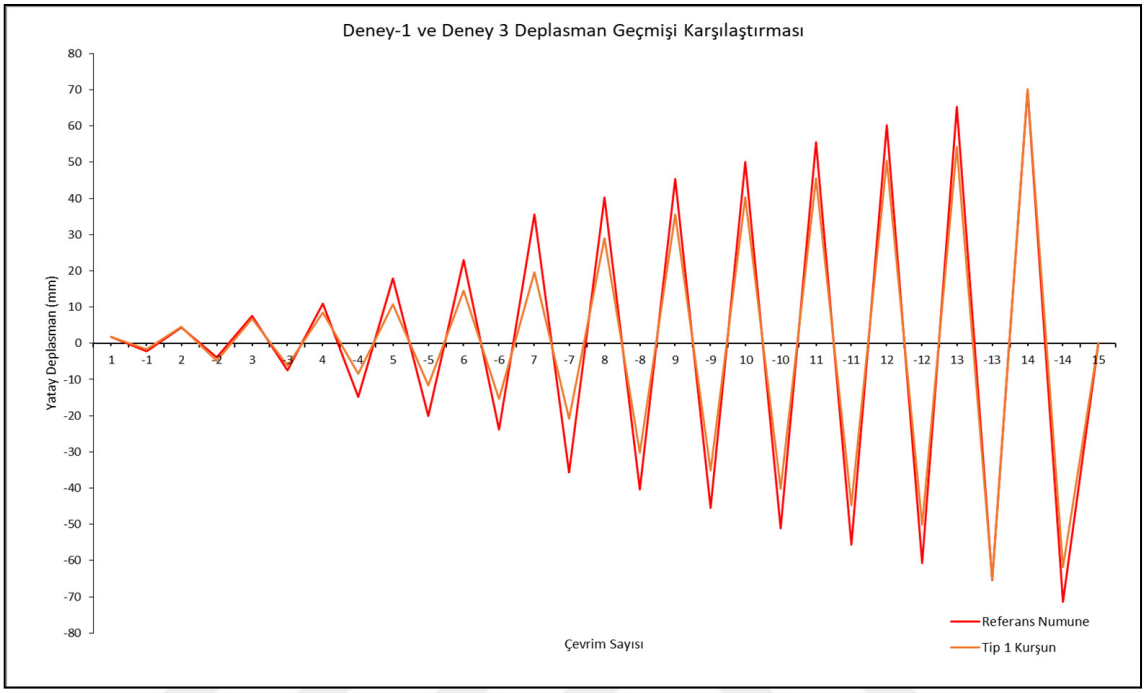


Şekil 4.6. Deney-1 ve Deney-3 numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması

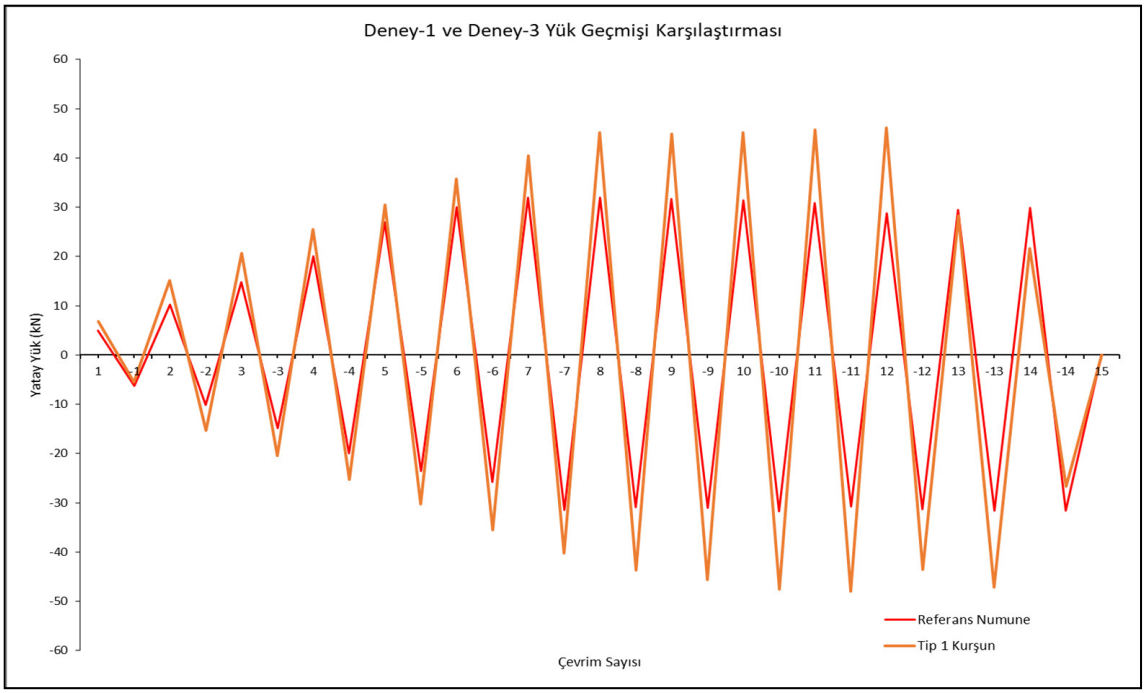
Deney-1 ve Deney-3 deney numunelerine ait rijitlik değişimi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9'da verilen toplam yatay yük – tepe deplasmanı için rijitlik değişimi karşılaştırma grafiğinden görüldüğü üzere, RN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 2.87 kN/mm, negatif çevrim yönünde 2.82 kN/mm iken, T1-KRN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 3.98 kN/mm ve negatif çevrim yönünde 3.79 kN/mm'dir. İlerleyen çevrimlerle birlikte rijitliklerin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.9'da verilen rijitlik değişim grafiğine göre T1-KRN deney numunesi RN deney numunesine göre pozitif çevrim yönünde % 39.01 başlangıç rijitliği artışı sağlarken, negatif çevrim yönünde % 34.44 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir. T1-KRN deney numunesinin pozitif çevrim yönünde +50-55 mm deplasmanlarda ani rijitlik azalması görülmektedir. Şekil 4.6'daki zarf eğrileri karşılaştırmasında da görüldüğü gibi diyagonal Tip 1 sönümleyici + braket elemanında oluşan çekmenin etkisiyle ankraj bulonları kolondaki betondan sıyrılmış, böylece sönümleyici mekanizma diyagonal elemanda çekme oluşturan yükleme yönünde (T1-KRN numunesi için pozitif yönde) etkisiz hale gelmiştir. Basınç yönünde ise belirli bir deplasmandan sonra diyagonal eleman sıkışarak çerçevenin yatay yük taşımasına yardımcı olmuştur.

Deney-1 ve Deney-3 karşılaştırmalı enerji tüketimi grafiği, Şekil 4.10'da verilmiştir. RN çerçeve numunesi deney boyunca 8.49 kN.m enerji tüketmişken, T1-

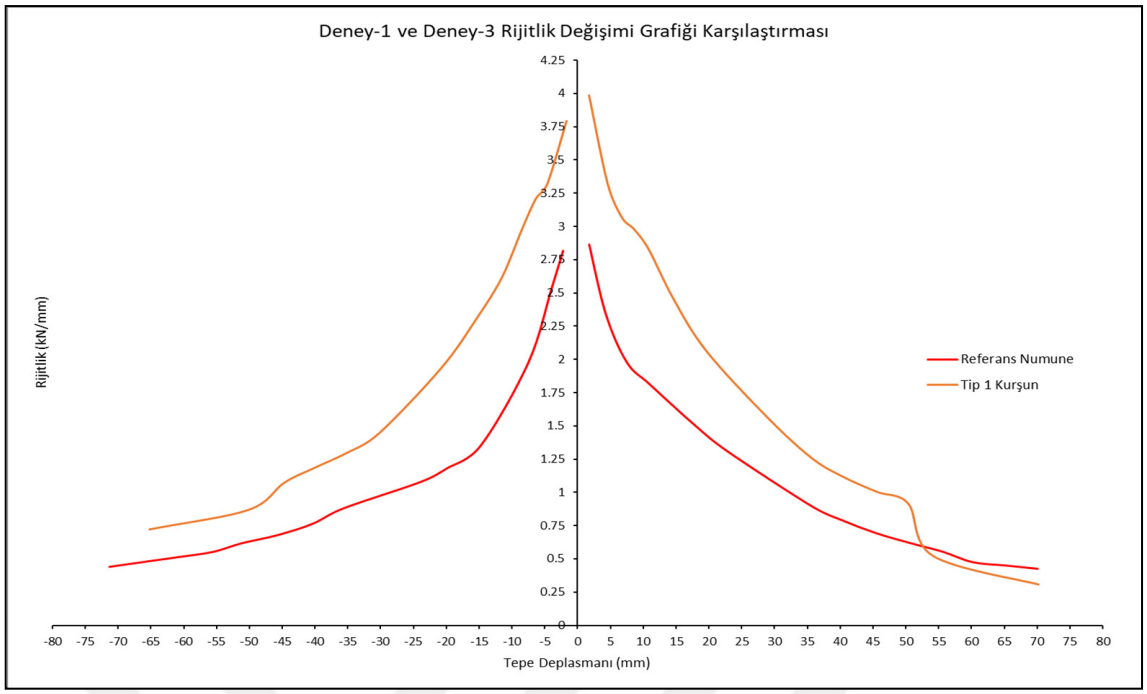
KRN çerçeve numunesi ise deney boyunca 19.04 kN.m enerji tüketmiştir. Bu verilerden hareketle T1-KRN numunesinin RN numunesinden %124.26 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



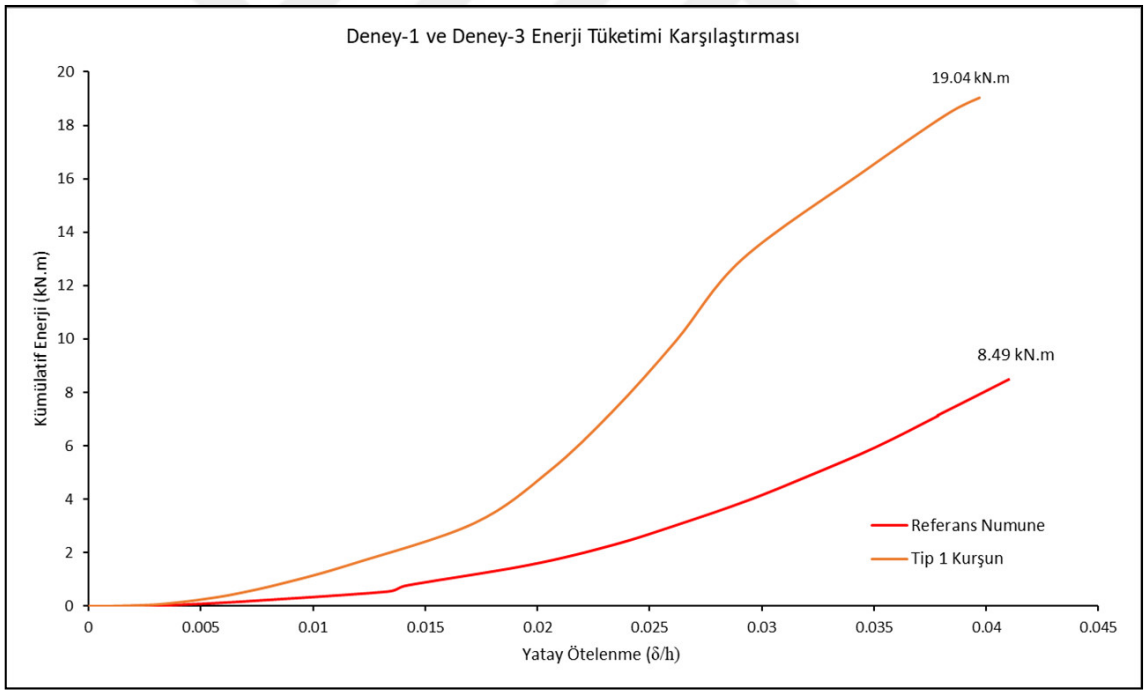
Şekil 4.7. Deney-1 ve Deney-3 numunelerinin deplasman geçmişi karşılaştırması (Yatay deplasmana göre)



Şekil 4.8. Deney-1 ve Deney-3 numunelerinin yük geçmişi karşılaştırması (Yatay yüke göre)



Şekil 4.9. Deney-1 ve Deney-3 numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük-Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.10. Deney-1 ve Deney-3 numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.3. Referans Numune (RN) ile Tip 1 Pirinç (T1-PRÇ) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-4)

Bu bölümde üçüncü olarak, Deney-1 referans deney çerçevesi ile Deney-4 Tip 1 pirinç sönümleyicili deney çerçevesinin sonuçlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır. Deney-1 ve Deney-4 numunelerinin her ikisinde de deney başlangıcından akma değerine kadar ±500

kg (5 kN) yük artışı uygulanmıştır. Akma değerinden sonra ise, yük kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek ±5 mm artış ile % 4' lük tepe ötelenmesine karşılık gelen 72 mm tepe deplasmanına kadar yüklemelere devam edilmiştir.

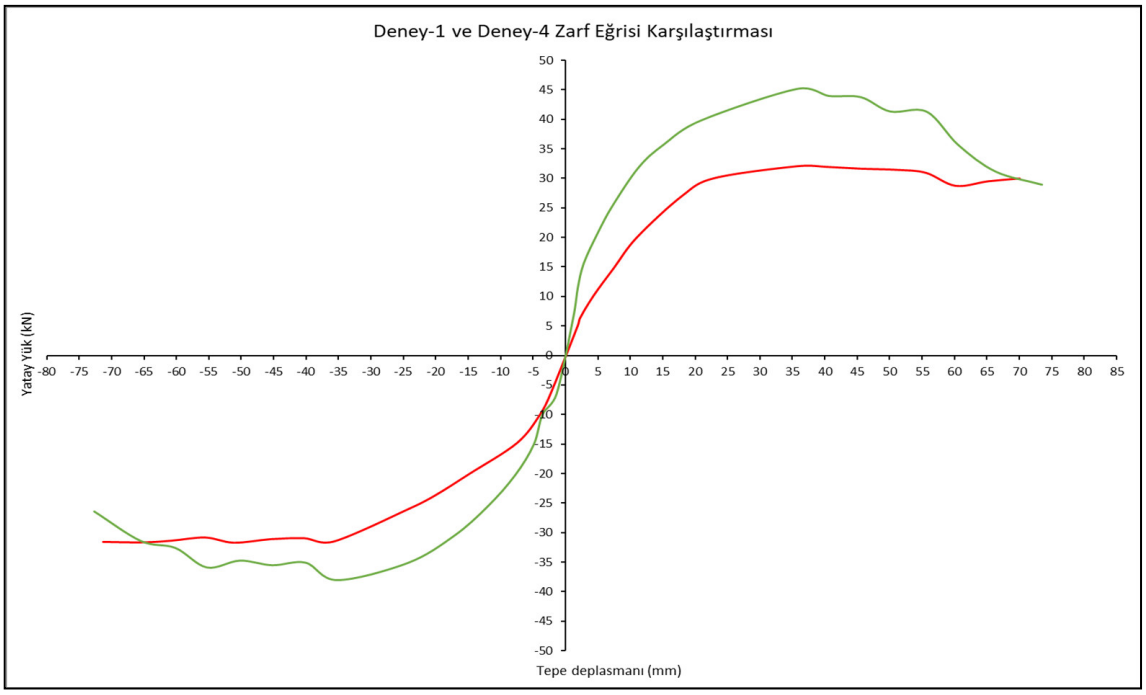
Deney-1 ve Deney-4 karşılaştırmalı deplasman ve yük geçmişleri, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de yük ve deplasman değerlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. T1-PRÇ numunesinde çevrim sayısı RN den iki çevrim fazladır. Ayrıca her çevrim adımında deplasmanlar küçülürken, yüklerin büyüdüğü görülmektedir.

Deney-1 ve Deney-4 deney numunelerinin yatay yük-tepe deplasmanı zarf eğrileri karşılaştırma grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir. T1-PRÇ numunesinin pozitif çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yükün 45.13 kN olduğu görülmektedir. RN numunesi ise pozitif çevrimlerde maksimum 32 kN yatay yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T1-PRÇ numunesi pozitif çevrimler yönünde RN numunesinden %41 daha fazla dayanım kazanmıştır. Negatif çevrimlerde ise T1-PRÇ numunesi 38.06 kN maksimum yatay yüke ulaşırken, RN numunesi aynı yönde 31.45 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T1-PRÇ numunesi negatif çevrimler yönünde RN numunesinden % 21.02 daha fazla yük taşımıştır. T1-PRÇ numunesinde negatif ve pozitif çevrimlerde %18.57 lik maksimum dayanım farkı oluşmuştur. 1. kattaki sönümleyici mekanizma ile betonarme çerçeve etkileşiminden dolayı S11 ve S12 kolonlarında plastik mafsal bölgeleri ilerleyen çevrimlerde aşırı hasar görmüştür. Numune çerçevedeki hasar önceki Tip 1 sönümleyicili numunelere göre daha yaygındır. Özellikle kolon dış yüzlerinde ana donatılar boyunca çatlaklar oluşmuş ve son çevrimlerde kabuk betonu dökülmüştür. Kolon iç yüzlerinde bağlantı köşebentlerinin bulunduğu köşelerde çatlaklar daha fazla yoğunlaşırken, diğer kolon kiriş birleşimi iç köşelerinde basınç ezilmeleri görülmüştür. Kolon-temel birleşimlerinde kesme çatlağı diğer numunelere göre daha geç (%3 ötelenmeden sonra) geliştiğinden pozitif ve negatif yönde dayanımda ani düşüşler gözlenmemiştir.

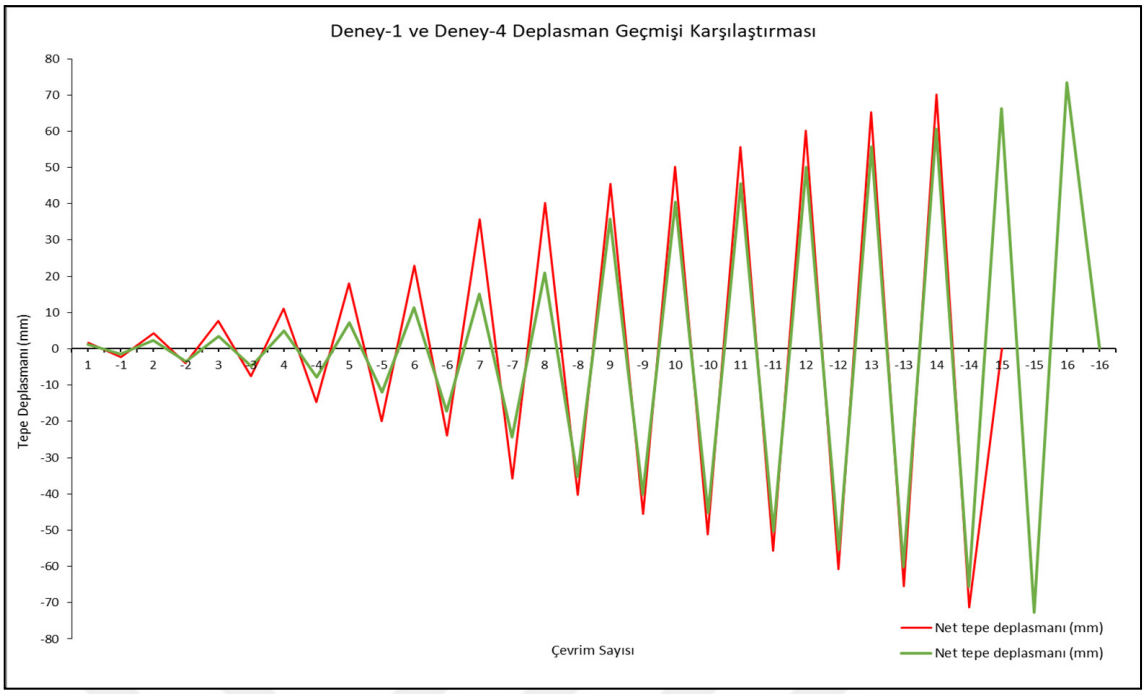
Deney-1 ve Deney-4 deney numunelerine ait rijitlik değişimi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.14'de verilmiştir. Şekil 4.14'de verilen toplam yatay yük – tepe deplasmanı için rijitlik değişimi karşılaştırma grafiğinden görüldüğü üzere, RN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 2.87 kN/mm, negatif çevrim yönünde 2.82 kN/mm iken, T1-PRÇ numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 5.30 kN/mm ve negatif çevrim yönünde 4.77 kN/mm'dir. İlerleyen çevrimlerle birlikte rijitliklerin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.14'de verilen rijitlik değişim

grafiğine göre T1-PRÇ deney numunesi RN deney numunesine göre pozitif çevrim yönünde % 84.67 başlangıç rijitliği artışı sağlarken, negatif çevrim yönünde % 69.15 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir.

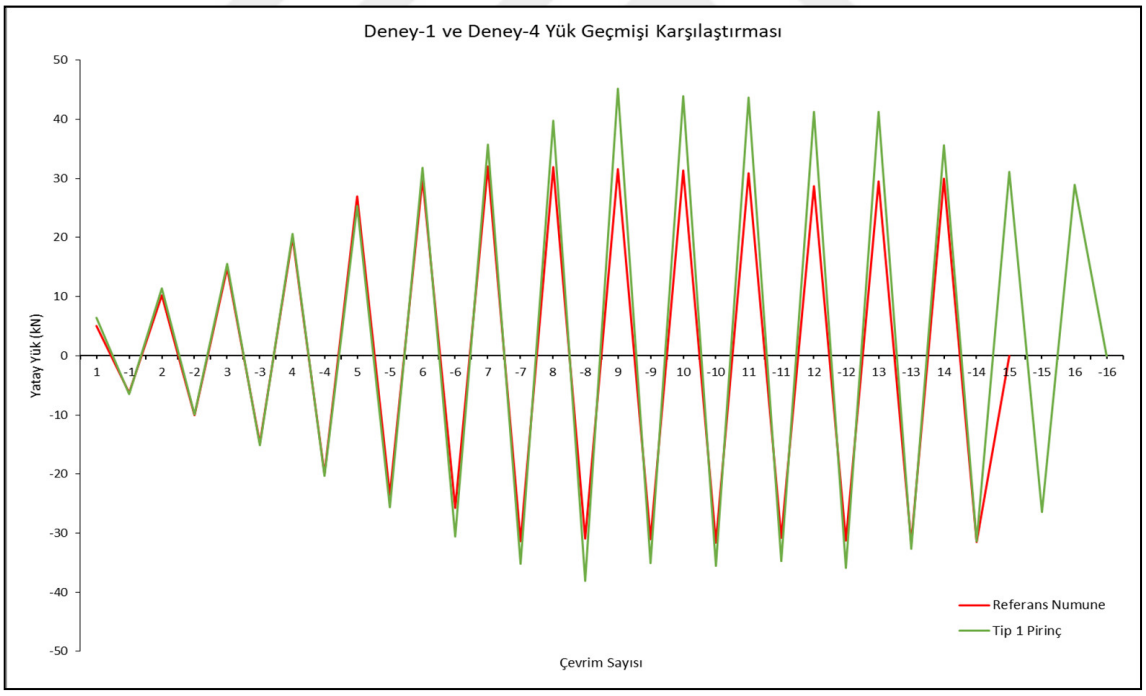
Deney-1 ve Deney-4 karşılaştırmalı enerji tüketimi grafiği, Şekil 4.15'de verilmiştir. RN çerçeve numunesi deney boyunca 8.49 kN.m enerji tüketmişken, T1-PRÇ çerçeve numunesi ise deney boyunca 19.65 kN.m enerji tüketmiştir. Bu verilerden hareketle T1-PRÇ numunesinin RN numunesinden %131.45 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



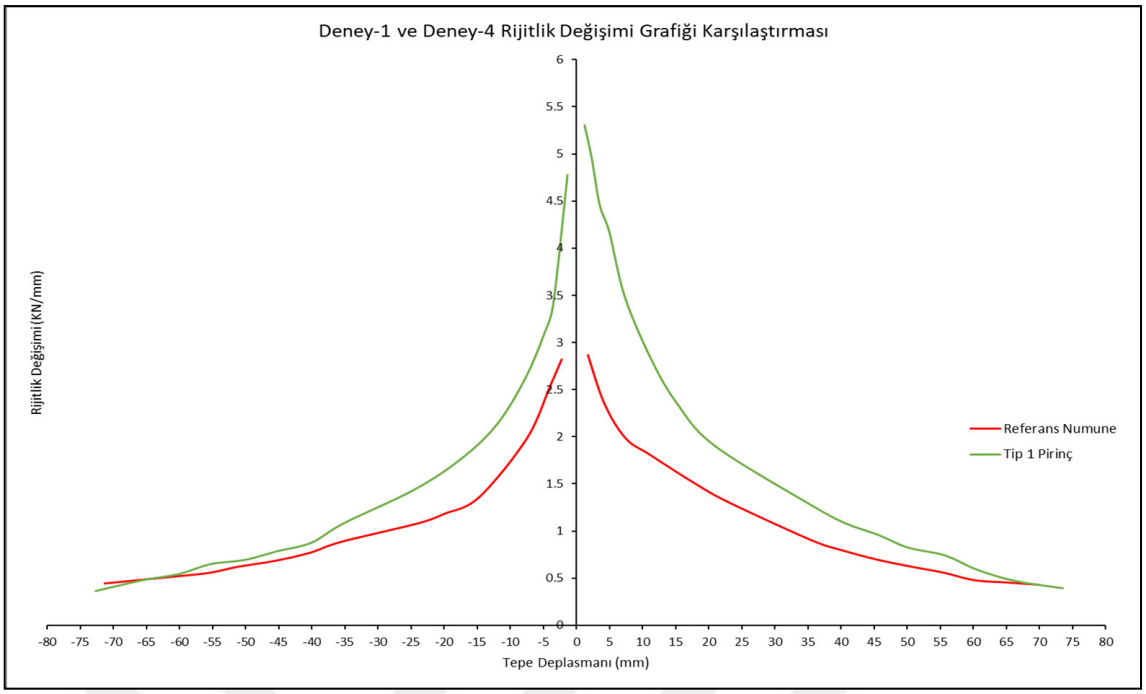
Şekil 4.11. Deney-1 ve Deney-4 numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



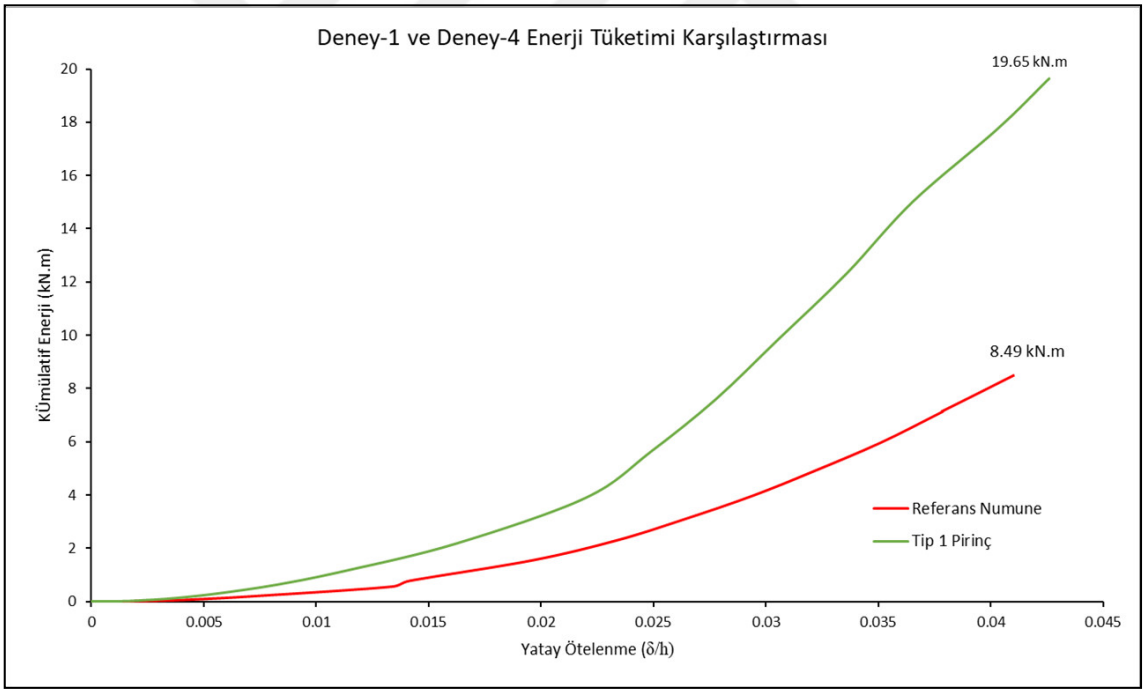
Şekil 4.12. Deney-1 ve Deney-4 numunelerinin deplasman geçmişi karşılaştırması (Yatay deplasmana göre)



Şekil 4.13. Deney-1 ve Deney-4 numunelerinin yük geçmişi karşılaştırması (Yatay yüke göre)



Şekil 4.14. Deney-1 ve Deney-4 numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük- Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.15. Deney-1 ve Deney-4 numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

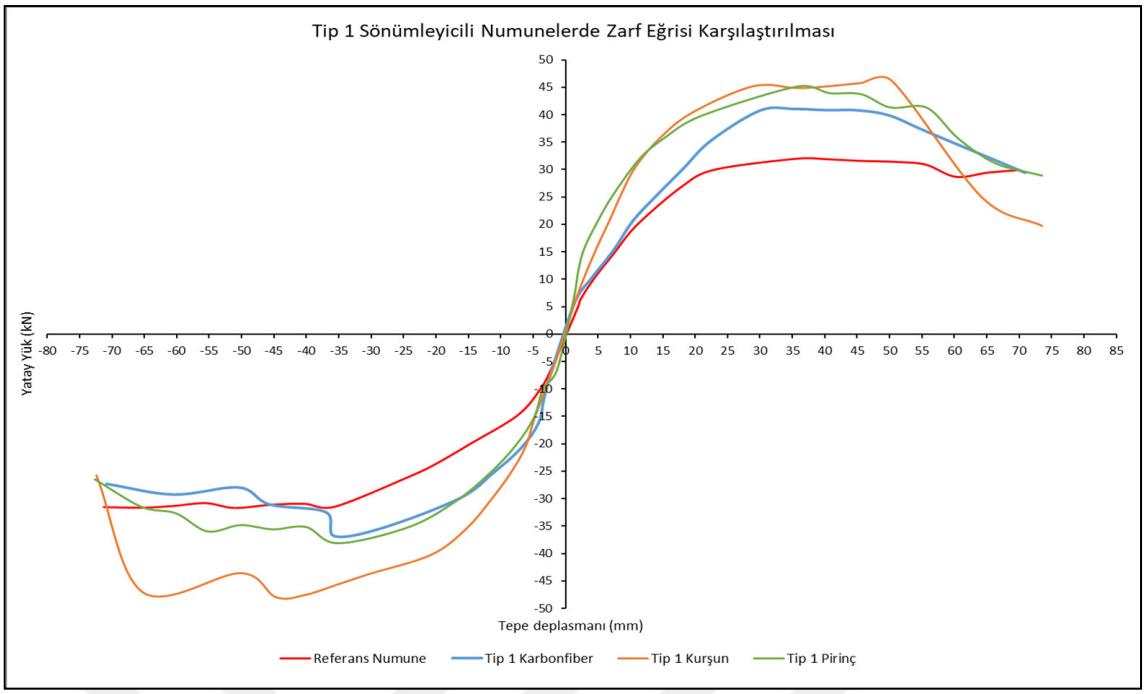
4.4. Tip 1 Sönümleyicili Numunelerin Karşılaştırılması

Bu başlık altında karbonfiber, kurşun ve pirinç sürtünme pedleriyle üretilmiş Tip 1 sönümleyicilerin monte edildiği betonarme çerçeve deney numuneleri zarf eğrileri, enerji tüketim grafikleri ve rijitlik değişimi açısından değerlendirilmiştir.

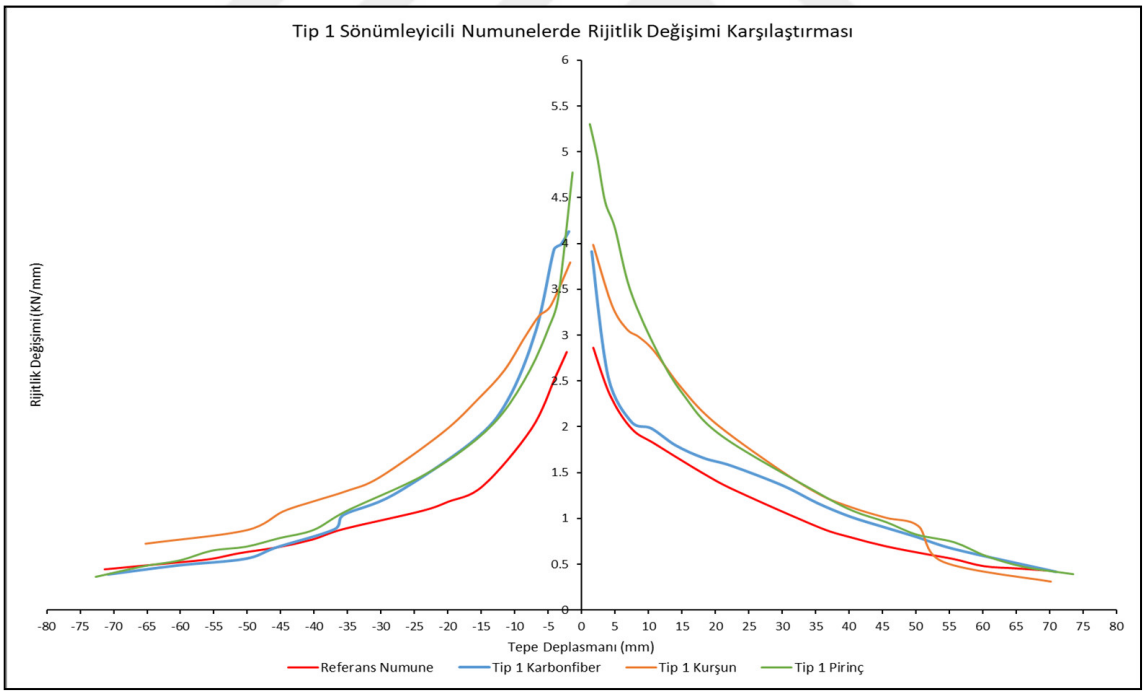
Zarf eğrilerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 1 sönümleyicili numunelerde maksimum dayanım açısından T1-KRN > T1-PRÇ > T1-KBF > RN sıralaması olduğu görülmektedir. Göçme sınırına doğru sönümleyici bağlantılarının zayıflaması nedeniyle sönümleyici etkinliği azaldığından zarf eğrileri RN numunesine yakın değerlere düşmüştür. Özellikle 1. kat bağlantı köşebentlerinin çerçeve betonundan sıyrılmasıyla ve sönümleyici-çerçeve etkileşiminden meydana gelen hasarlar nedeniyle deney sonlarına doğru pozitif çevrimlerde T1-KRN, negatif çevrimlerde T1-KBF numunelerinin dayanımı RN eğrisinin altına düşmüştür.

Rijitlik değişimlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 1 sönümleyicili numunelerde başlangıç rijitliği açısından T1-PRÇ > T1-KBF > T1-KRN > RN sıralaması olduğu görülmektedir. Göçme sınırına doğru sönümleyici bağlantılarının zayıflaması nedeniyle sönümleyici etkinliği azaldığından rijitlik değişimi eğrileri RN numunesine yakın değerlere düşmüştür. Özellikle 1. kat bağlantı köşebentlerinin çerçeve betonundan sıyrılmasıyla ve sönümleyici-çerçeve etkileşiminden meydana gelen hasarlar nedeniyle deney sonlarına doğru pozitif çevrimlerde T1-KRN, negatif çevrimlerde T1-KBF numunelerinin rijitliği RN eğrisinin altına düşmüştür.

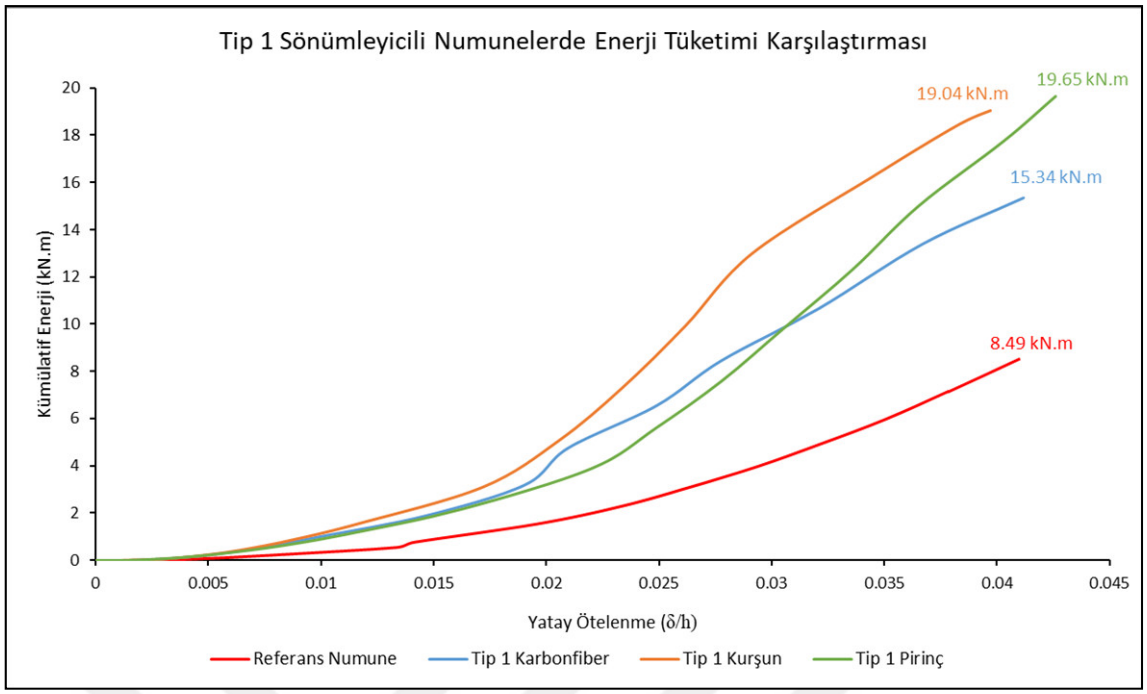
Enerji tüketimlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 1 sönümleyicili numunelerde enerji tüketimi açısından T1-PRÇ > T1-KRN > T1-KBF > RN sıralaması olduğu görülmektedir. T1-KRN numunesinde kolon-temel birleşimlerinde erken oluşan (itme yönü 55 mm tepe deplasmanında) kesme hasarları ve dolayısıyla 1. kat kolon-temel birleşimindeki bağlantı köşebentinin çerçeve betonundan sıyrılması nedeniyle 1. kattaki sönümleyici devre dışı kalmıştır. Sonuçta %4'lük ötelenmeye ulaşılamamış, T1-KRN enerji tüketimi beklenenden daha düşük çıkmıştır. Bu durum aşağıda verilen üç karşılaştırma grafiğinde, itme yönündeki 55 mm tepe deplasmanında görülen ani eğim değişikliklerinden de fark edilebilmektedir.



Şekil. 4.16. Tip 1 sönümleyicili numunelerin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



Şekil 4.17. Tip 1 sönümleyicili numunelerin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük-Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.18. Tip 1 sönümleyicili numunelerin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.5. Referans Numune (RN) ile Tip 2 Karbonfiber (T2-KBF) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-5)

Bu başlık altında Deney-1 referans deney çerçevesi ile Deney-5 Tip 2 karbonfiber sönümleyicili deney çerçevesinin sonuçlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır. Deney-1 ve Deney-5 numunelerinin her ikisinde de deney başlangıcından akma değerine kadar ±500 kg (5 kN) yük artışı uygulanmıştır. Akma değerinden sonra ise, yük kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek ±5 mm artış ile % 4' lük tepe ötelenmesine karşılık gelen 72 mm tepe deplasmanına kadar yüklemelere devam edilmiştir.

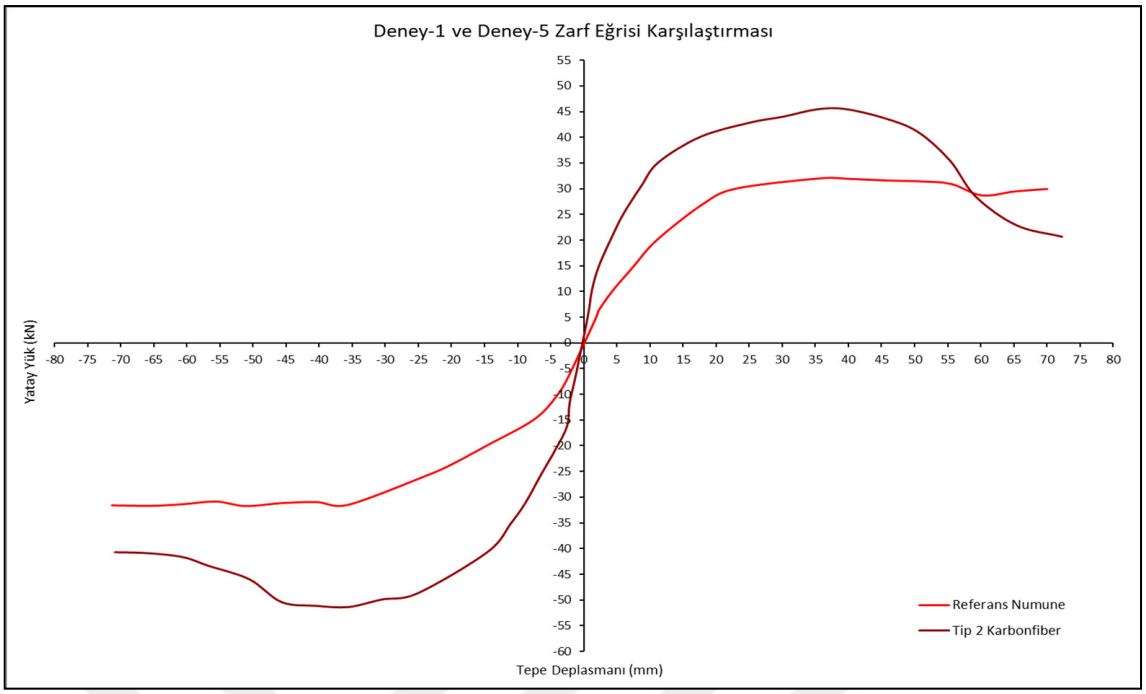
Deney-1 ve Deney-5 karşılaştırmalı deplasman ve yük geçmişleri, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de yük ve deplasman değerlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. T2-KBF numunesinde çevrim sayısı RN den beş çevrim fazladır. Ayrıca her çevrim adımında deplasmanlar küçülürken, yüklerin büyüdüğü görülmektedir.

Deney-1 ve Deney-5 deney numunelerinin yatay yük-tepe deplasmanı zarf eğrileri karşılaştırma grafiği Şekil 4.19'da gösterilmiştir. T2-KBF numunesinin pozitif çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yükün 45.53 kN olduğu görülmektedir. RN numunesi ise pozitif çevrimlerde maksimum 32 kN yatay yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T2-KBF numunesi pozitif çevrimler yönünde RN numunesinden %42.28 daha fazla dayanım kazanmıştır. Negatif çevrimlerde ise T2-KBF numunesi 51.37 kN

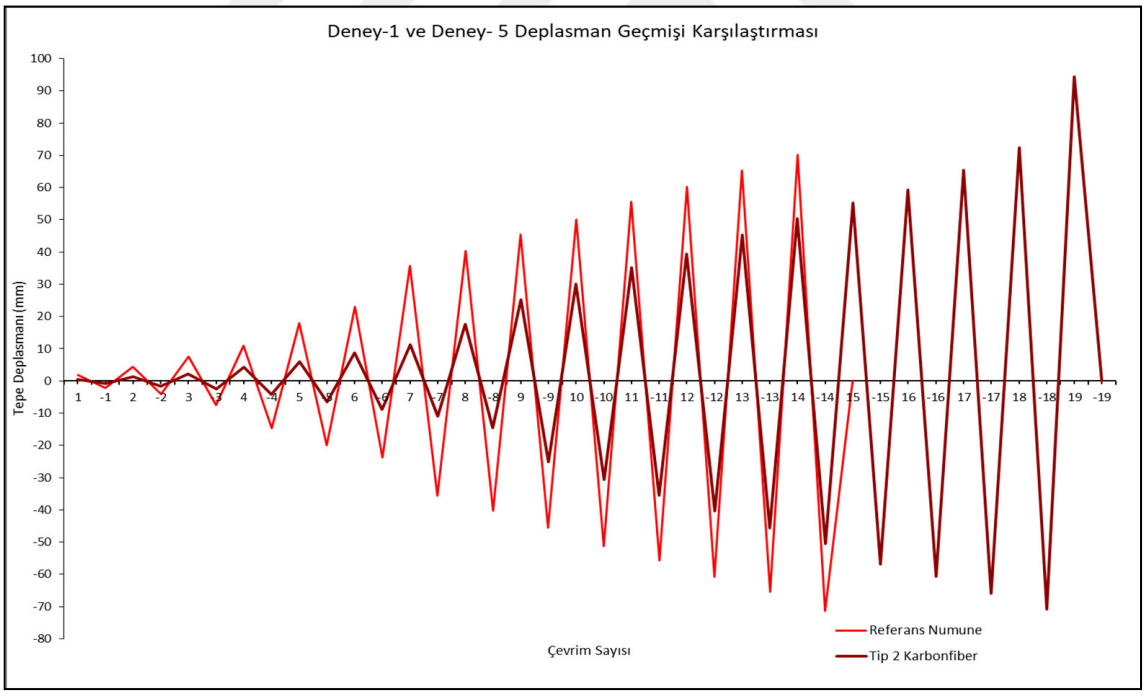
maksimum yatay yüke ulaşırken, RN numunesi aynı yönde 31.45 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T2-KBF numunesi negatif çevrimler yönünde RN numunesinden %63.34 daha fazla yük taşımıştır. T2-KBF numunesinde negatif ve pozitif çevrimlerde - %12.83 lük maksimum dayanım farkı oluşmuştur. Numune çerçevedeki hasar önceki Tip 1 sönümleyicili numunelere göre daha yaygındır. Özellikle kolon dış yüzlerinde ana donatılar boyunca çatlaklar oluşmuş ve son çevrimlerde kabuk betonu dökülmüştür. S12 kolonunun temel birleşiminde oluşan kesme çatlağı ilerleyen çevrimlerde gelişerek bağlantı köşebentinin betondan ayrılmasına neden olmuştur. S12 kolonunun iç yüzünde donatılar boyunca çatlaklar oluşmuş ve deneyin sonlarına doğru kabuk betonu dökülmüştür. Kolon iç yüzlerinde, bağlantı köşebentlerinin bulunduğu köşelerde çatlaklar daha fazla yoğunlaşırken, diğer kolon kiriş birleşimi iç köşelerinde basınç ezilmeleri görülmüştür. 14. çevrimden sonra çerçeve numunenin 1. katında yumuşak kat oluştuğundan deplasmanların büyük kısmı 1. katta meydana gelmiştir. Deney sonuna doğru 1. kat kolon uçlarında büyük hasarlar meydana geldiğinden kat mekanizması durumu gözlemlenmiştir. Her iki kolonda da donatı boyunca oluşan çatlaklar gelişerek kabuk betonunun dökülmesine neden olmuştur.

Deney-1 ve Deney-5 deney numunelerine ait rijitlik değişimi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekil 4.22'de verilen toplam yatay yük – tepe deplasmanı için rijitlik değişimi karşılaştırma grafiğinden görüldüğü üzere, RN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 2.87 kN/mm, negatif çevrim yönünde 2.82 kN/mm iken, T2-KBF numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 8.61 kN/mm ve negatif çevrim yönünde 8.74 kN/mm'dir. İlerleyen çevrimlerle birlikte rijitliklerin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.22'de verilen rijitlik değişim grafiğine göre T2-KBF deney numunesi RN deney numunesine göre pozitif çevrim yönünde % 200 başlangıç rijitliği artışı sağlarken, negatif çevrim yönünde % 209.93 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir.

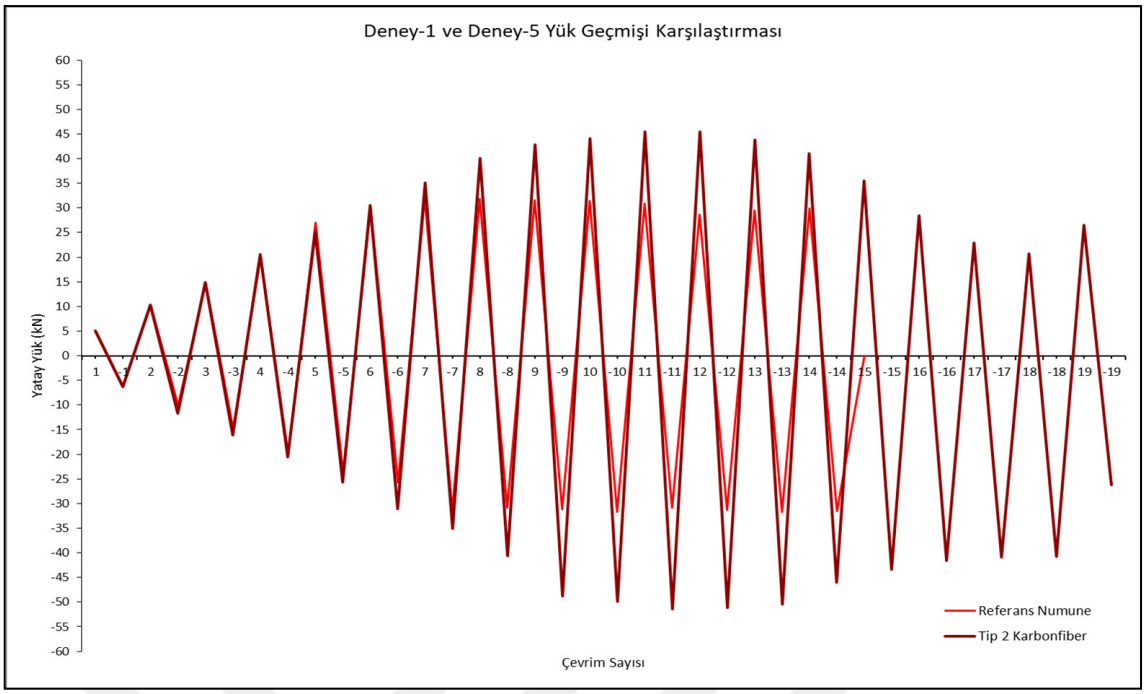
Deney-1 ve Deney-5 karşılaştırmalı enerji tüketimi grafiği, Şekil 4.23'de verilmiştir. RN çerçeve numunesi deney boyunca 8.49 kN.m enerji tüketmişken, T2-KBF çerçeve numunesi ise deney boyunca 32.72 kN.m enerji tüketmiştir. Bu verilerden hareketle T2-KBF numunesinin RN numunesinden %285.39 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



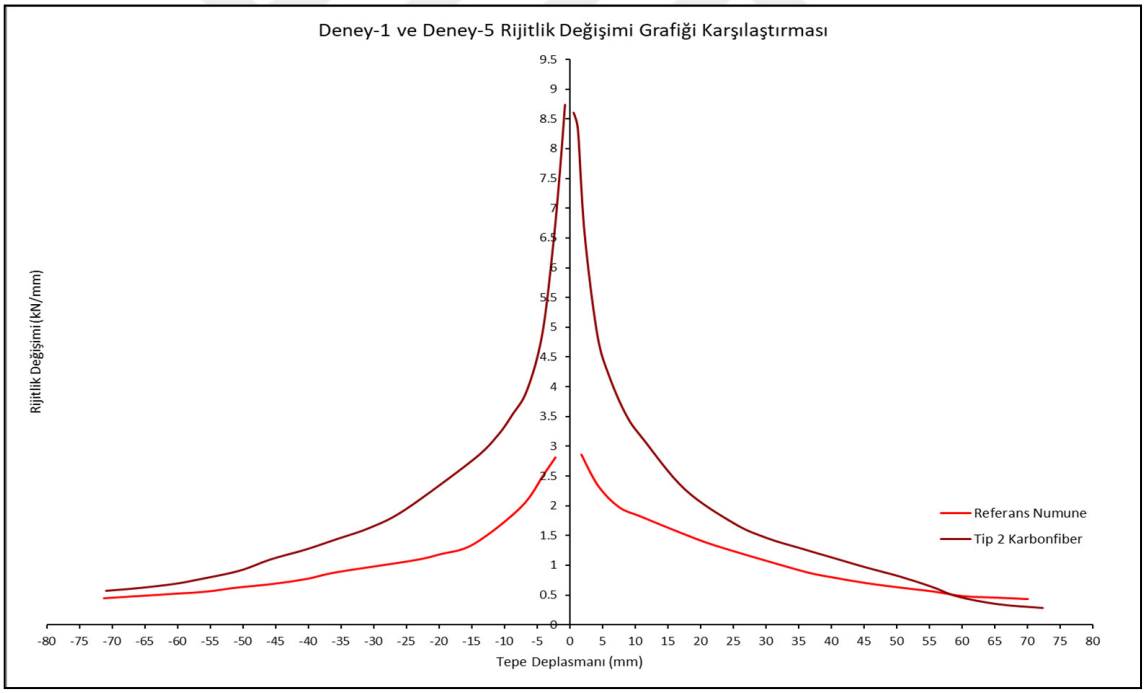
Şekil 4.19. Deney-1 ve Deney-5 numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



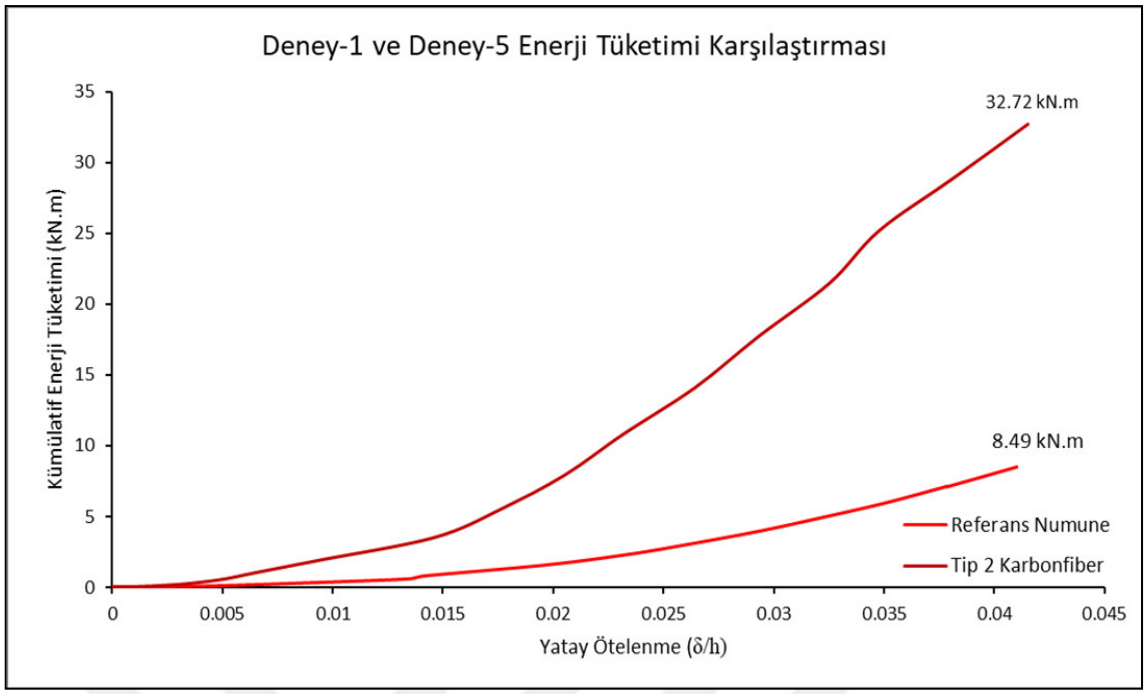
Şekil 4.20. Deney-1 ve Deney-5 numunelerinin deplasman geçmişi karşılaştırması (Yatay deplasmana göre)



Şekil 4.21. Deney-1 ve Deney-5 numunelerinin yük geçmişi karşılaştırması (Yatay yüke göre)



Şekil 4.22. Deney-1 ve Deney-5 numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük- Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.23. Deney-1 ve Deney-5 numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.6. Referans Numune (RN) ile Tip 2 Pirinç (T2-PRÇ) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-6)

Bu başlık altında Deney-1 referans deney çerçevesi ile Deney-6 Tip 2 pirinç sönümleyicili deney çerçevesinin sonuçlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır. Deney-1 ve Deney-6 numunelerinin her ikisinde de deney başlangıcından akma değerine kadar ±500 kg (5 kN) yük artışı uygulanmıştır. Akma değerinden sonra ise, yük kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek ±5 mm artış ile % 4' lük tepe ötelenmesine karşılık gelen 72 mm tepe deplasmanına kadar yüklemelere devam edilmiştir.

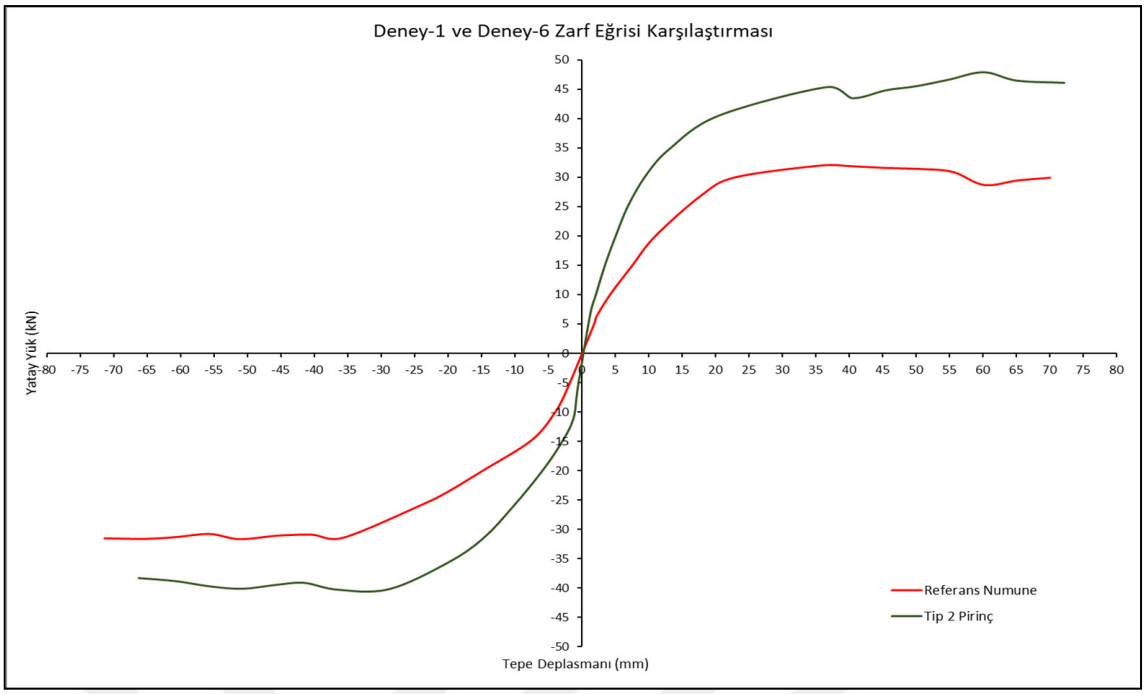
Deney-1 ve Deney-6 karşılaştırmalı deplasman ve yük geçmişleri, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da yük ve deplasman değerlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. T2-PRÇ numunesinde çevrim sayısı RN den iki çevrim fazladır. Ayrıca her çevrim adımında RN'ye kıyasla deplasmanlar küçülürken, yüklerin büyüdüğü görülmektedir.

Deney-1 ve Deney-6 deney numunelerinin yatay yük-tepe deplasmanı zarf eğrileri karşılaştırma grafiği Şekil 4.24'de gösterilmiştir. T2-PRÇ numunesinin pozitif çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yükün 47.93 kN olduğu görülmektedir. RN numunesi ise pozitif çevrimlerde maksimum 32 kN yatay yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T2-PRÇ numunesi pozitif çevrimler yönünde RN numunesinden %49.78 daha fazla dayanım kazanmıştır. Negatif çevrimlerde ise T2-PRÇ numunesi 40.31 kN

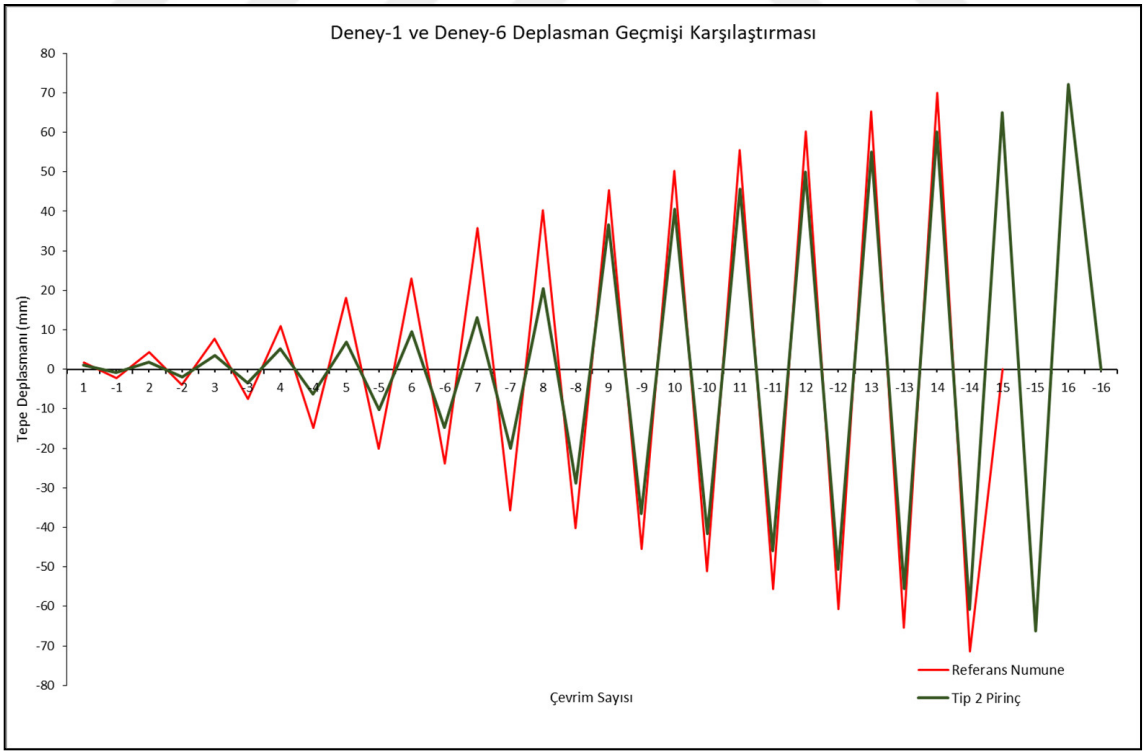
maksimum yatay yüke ulaşırken, RN numunesi aynı yönde 31.45 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T2-PRÇ numunesi negatif çevrimler yönünde RN numunesinden %28.17 daha fazla yük taşımıştır. T2-PRÇ numunesinde negatif ve pozitif çevrimlerde %18.90'lık maksimum dayanım farkı oluşmuştur. Numune çerçevedeki hasar önceki Tip 1 sönümleyicili numunelere göre daha yaygındır. Özellikle kolon dış yüzlerinde ana donatılar boyunca çatlaklar oluşmuş ve son çevrimlerde kabuk betonu dökülmüştür. Kolon iç yüzlerinde, bağlantı köşebentlerinin bulunduğu köşelerde çatlaklar daha fazla yoğunlaşırken, diğer kolon kiriş birleşimi iç köşelerinde basınç ezilmeleri görülmüştür.

Deney-1 ve Deney-6 deney numunelerine ait rijitlik değişimi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.27'de verilen toplam yatay yük – tepe deplasmanı için rijitlik değişimi karşılaştırma grafiğinden görüldüğü üzere, RN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 2.87 kN/mm, negatif çevrim yönünde 2.82 kN/mm iken, T2-PRÇ numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 6.27 kN/mm ve negatif çevrim yönünde 6.93 kN/mm'dir. İlerleyen çevrimlerle birlikte rijitliklerin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.27'de verilen rijitlik değişim grafiğine göre T2-PRÇ deney numunesi RN deney numunesine göre pozitif çevrim yönünde %118.46 başlangıç rijitliği artışı sağlarken, negatif çevrim yönünde %145.74 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir.

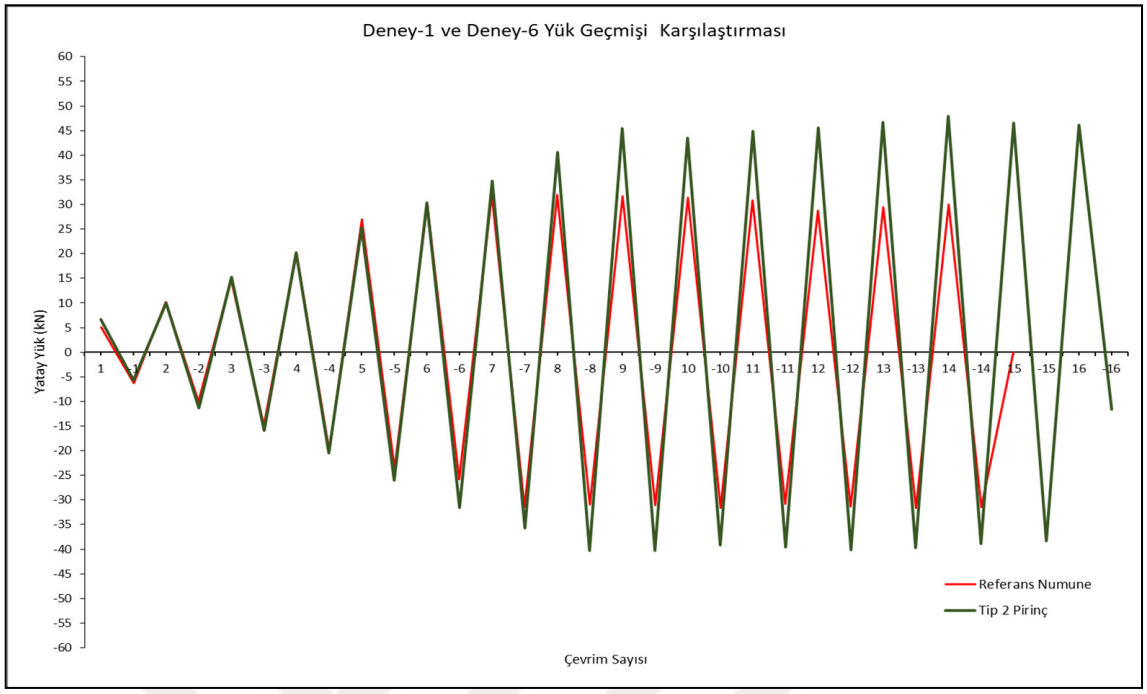
Deney-1 ve Deney-6 karşılaştırmalı enerji tüketimi grafiği, Şekil 4.28'de verilmiştir. RN çerçeve numunesi deney boyunca 8.49 kN.m enerji tüketmişken, T2-PRÇ çerçeve numunesi ise deney boyunca 22.94 kN.m enerji tüketmiştir. Bu verilerden hareketle T2-PRÇ numunesinin RN numunesinden %170.20 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



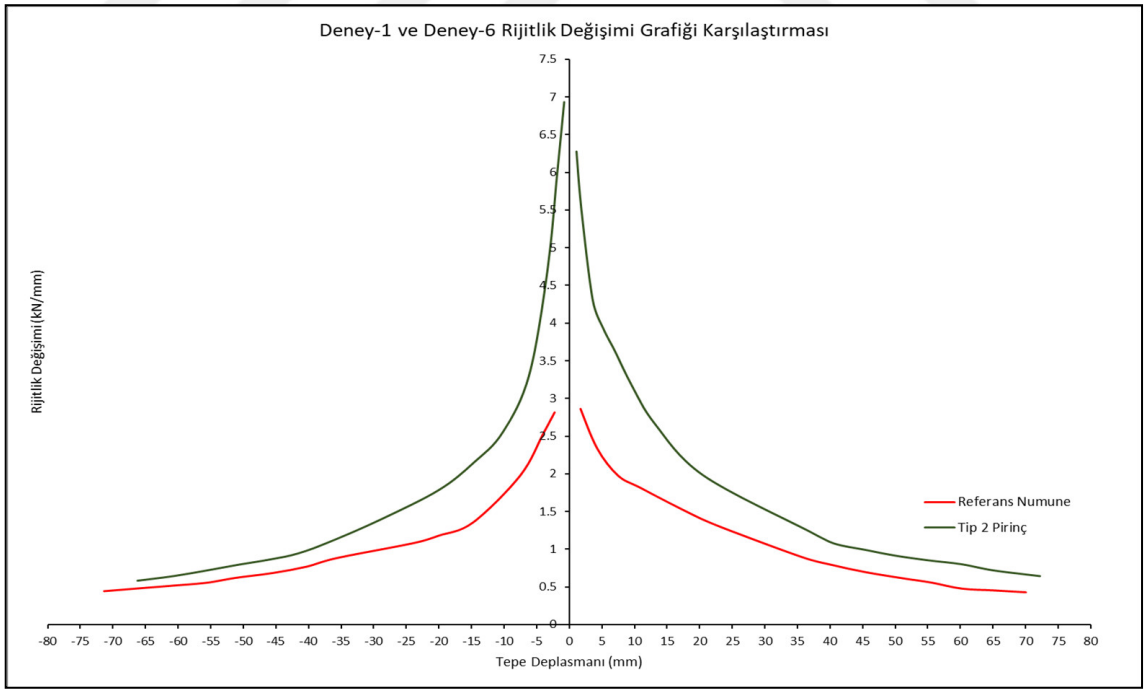
Şekil 4.24. Deney-1 ve Deney-6 numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



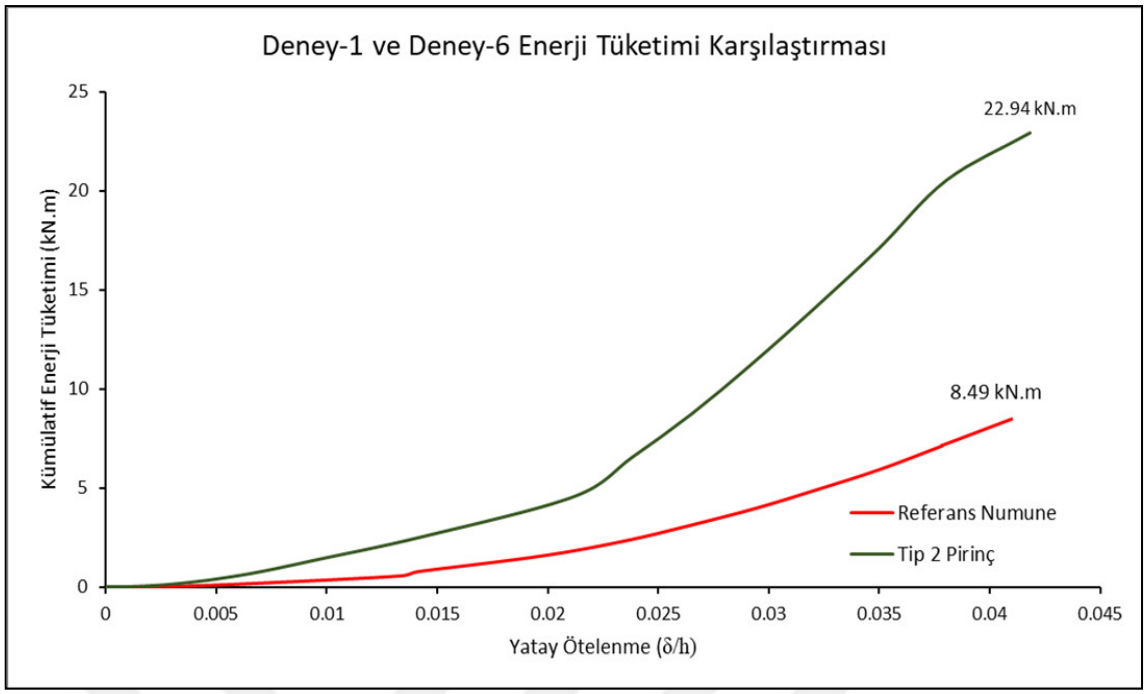
Şekil 4.25. Deney-1 ve Deney-6 numunelerinin deplasman geçmişi karşılaştırması (Yatay deplasmana göre)



Şekil 4.26. Deney-1 ve Deney-6 numunelerinin yük geçmişi karşılaştırması (Yatay yüke göre)



Şekil 4.27. Deney-1 ve Deney-6 numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük- Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.28. Deney-1 ve Deney-6 numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.7. Referans Numune (RN) ile Tip 2 Kurşun (T2-KRN) numunesinin karşılaştırılması (Deney-1 ve Deney-7)

Bu başlık altında Deney-1 referans deney çerçevesi ile Deney-7 Tip 2 kurşun sönümleyicili deney çerçevesinin sonuçlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır. Deney-1 ve Deney-7 numunelerinin her ikisinde de deney başlangıcından akma değerine kadar ±500 kg (5 kN) yük artışı uygulanmıştır. Akma değerinden sonra ise, yük kontrollü yüklemeden deplasman kontrollü yüklemeye geçilerek ±5 mm artış ile %4' lük tepe ötelenmesine karşılık gelen 72 mm tepe deplasmanına kadar yüklemelere devam edilmiştir.

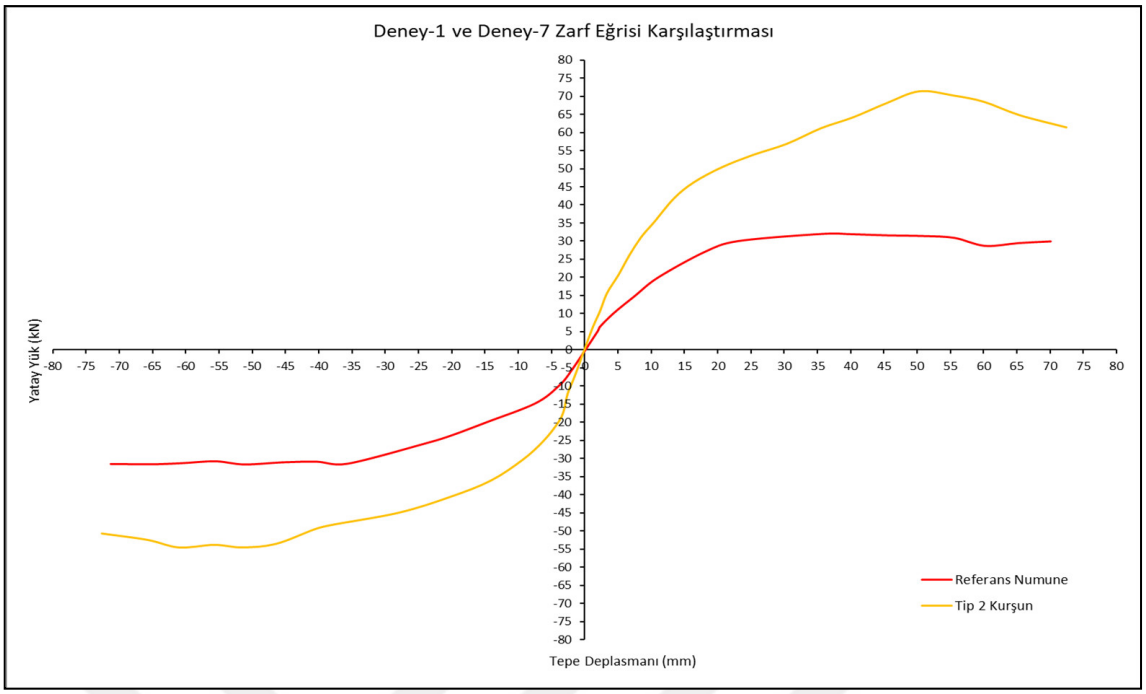
Deney-1 ve Deney-7 karşılaştırmalı deplasman ve yük geçmişleri, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de yük ve deplasman değerlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. T2-KRN numunesinde çevrim sayısı RN den iki çevrim fazladır. Ayrıca her çevrim adımında RN'ye kıyasla deplasmanlar küçülürken, yüklerin büyüdüğü görülmektedir.

Deney-1 ve Deney-7 deney numunelerinin yatay yük-tepe deplasmanı zarf eğrileri karşılaştırma grafiği Şekil 4.29'da gösterilmiştir. T2-KRN numunesinin pozitif çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yükün 71.37 kN olduğu görülmektedir. RN numunesi ise pozitif çevrimlerde maksimum 32 kN yatay yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T2-KRN numunesi pozitif çevrimler yönünde RN numunesinden %123.03 daha fazla dayanım kazanmıştır. Negatif çevrimlerde ise T2-KRN numunesi

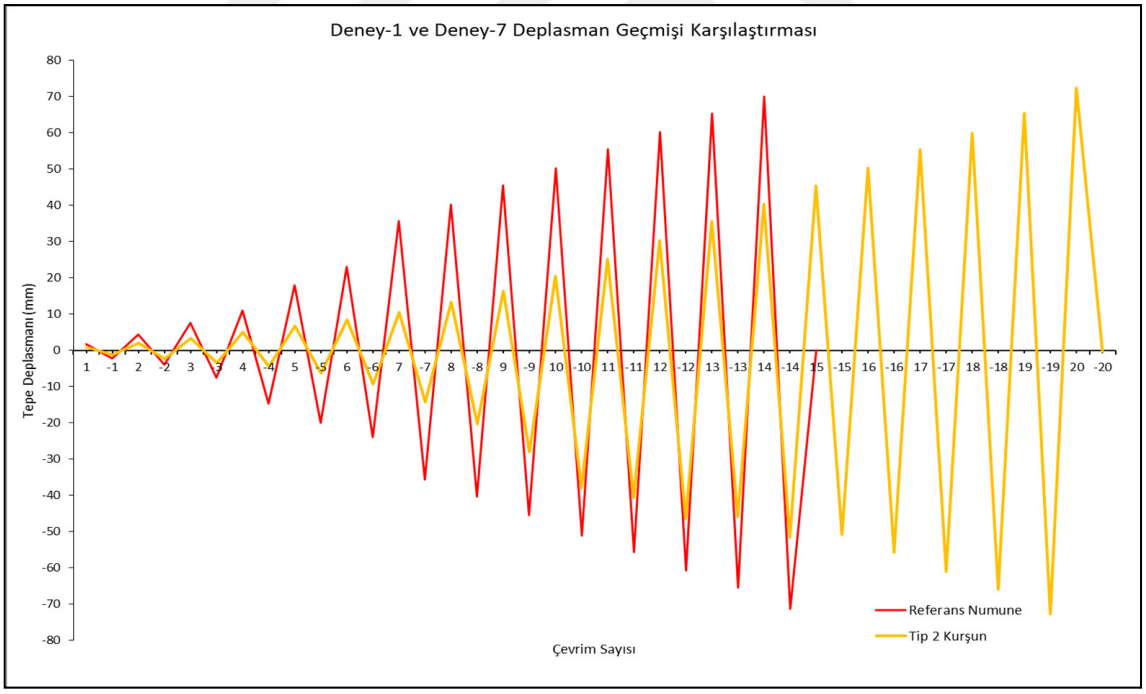
54.53 kN maksimum yatay yüke ulaşırken, RN numunesi aynı yönde 31.45 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre T2-KRN numunesi negatif çevrimler yönünde RN numunesinden %73.39 daha fazla yük taşımıştır. T2-KRN numunesinde negatif ve pozitif çevrimlerde %30.88'lık maksimum dayanım farkı oluşmuştur. Numune çerçevedeki hasar önceki Tip 1 sönümleyicili numunelere göre daha yaygındır. Özellikle kolon dış yüzlerinde ana donatılar boyunca çatlaklar oluşmuş ve son çevrimlerde kabuk betonu dökülmüştür. Kolon iç yüzlerinde, bağlantı köşebentlerinin bulunduğu köşelerde çatlaklar daha fazla yoğunlaşırken, diğer kolon kiriş birleşimi iç köşelerinde basınç ezilmeleri görülmüştür.

Deney-1 ve Deney-7 deney numunelerine ait rijitlik değişimi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.32'de verilmiştir. Şekil 4.32'de verilen toplam yatay yük – tepe deplasmanı için rijitlik değişimi karşılaştırma grafiğinden görüldüğü üzere, RN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 2.87 kN/mm, negatif çevrim yönünde 2.82 kN/mm iken, T2-KRN numunesinde başlangıç rijitliği pozitif çevrim yönünde 5.39 kN/mm ve negatif çevrim yönünde 5.5 kN/mm'dir. İlerleyen çevrimlerle birlikte rijitliklerin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.32'de verilen rijitlik değişim grafiğine göre T2-KRN deney numunesi RN deney numunesine göre pozitif çevrim yönünde %87.80 başlangıç rijitliği artışı sağlarken, negatif çevrim yönünde %95.04 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir.

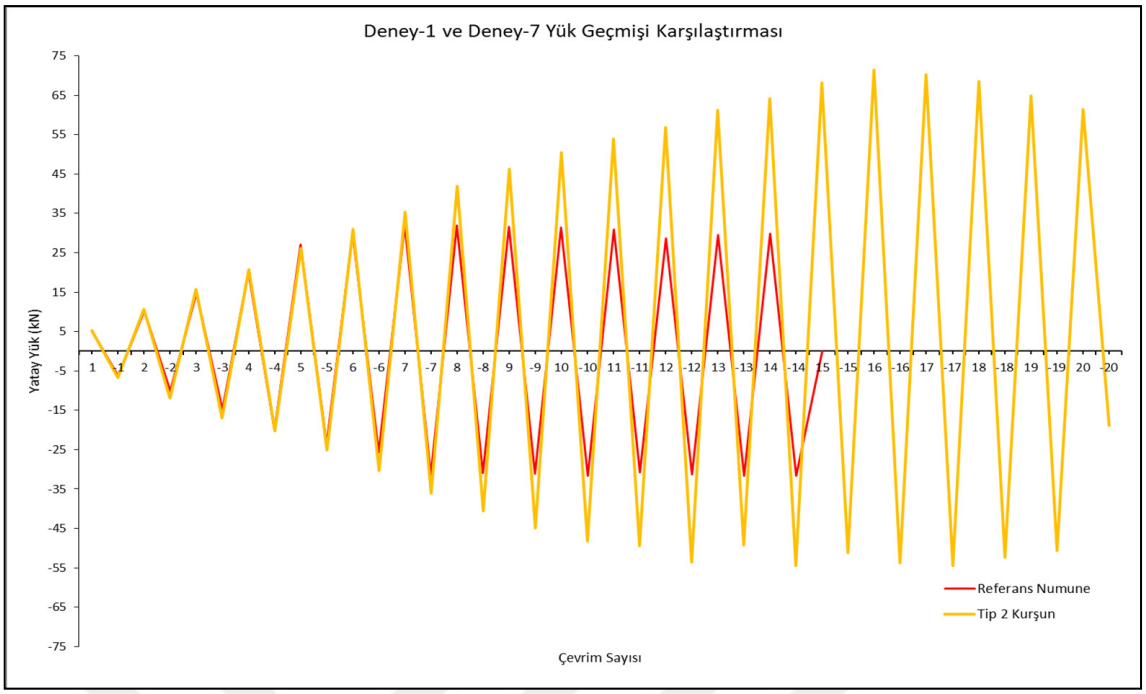
Deney-1 ve Deney-7 karşılaştırmalı enerji tüketimi grafiği, Şekil 4.33'de verilmiştir. RN çerçeve numunesi deney boyunca 8.49 kN.m enerji tüketmişken, T2-KRN çerçeve numunesi ise deney boyunca 49.23 kN.m enerji tüketmiştir. Bu verilerden hareketle T2-KRN numunesinin RN numunesinden %479.86 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



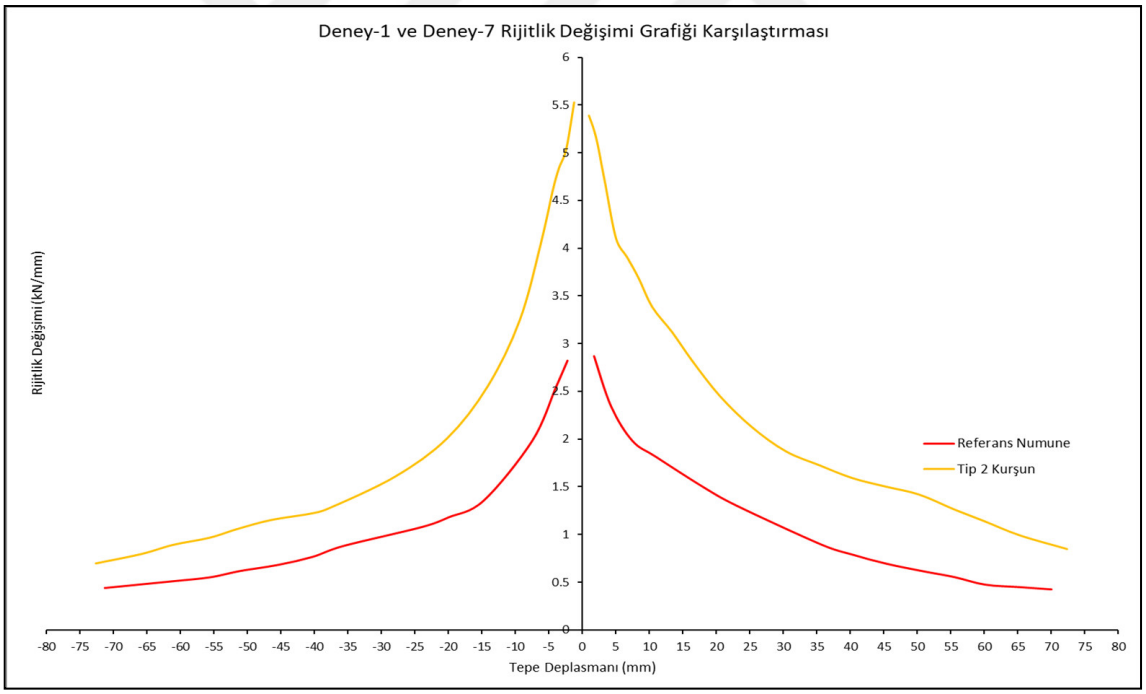
Şekil 4.29. Deney-1 ve Deney-7 numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



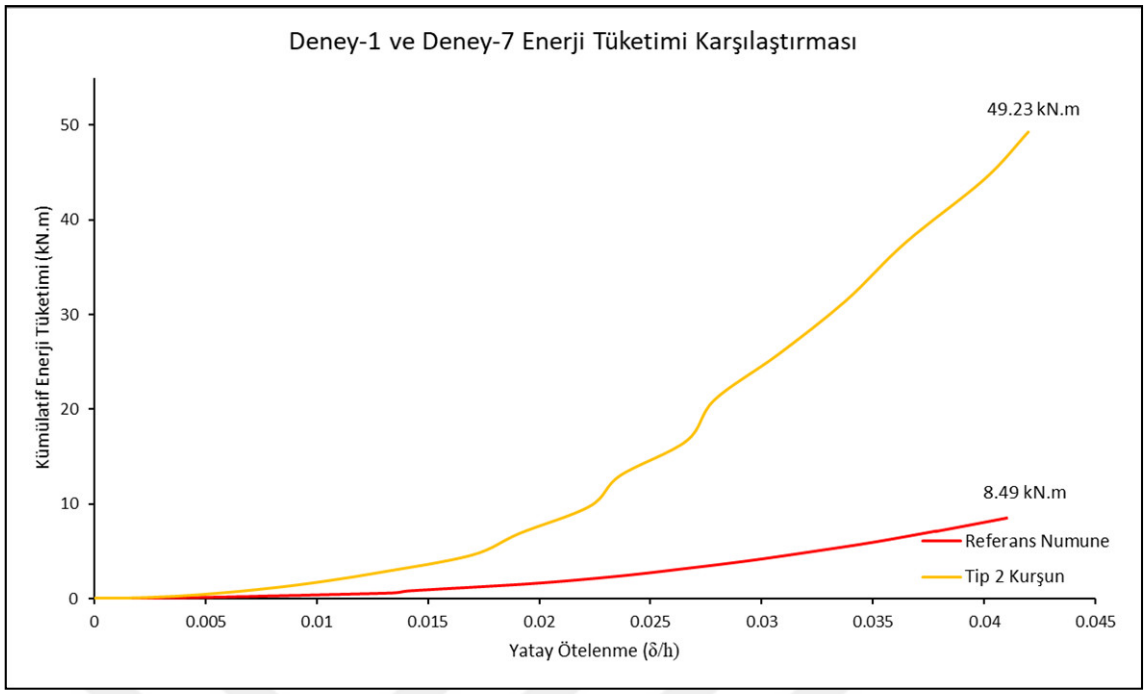
Şekil 4.30. Deney-1 ve Deney-7 numunelerinin deplasman geçmişi karşılaştırması (Yatay deplasmana göre)



Şekil 4.31. Deney-1 ve Deney-7 numunelerinin yük geçmişi karşılaştırması (Yatay yüke göre)



Şekil 4.32. Deney-1 ve Deney-7 numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük- Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.33. Deney-1 ve Deney-7 numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.8. Tip 2 Sönümleyicili Numunelerin Karşılaştırılması

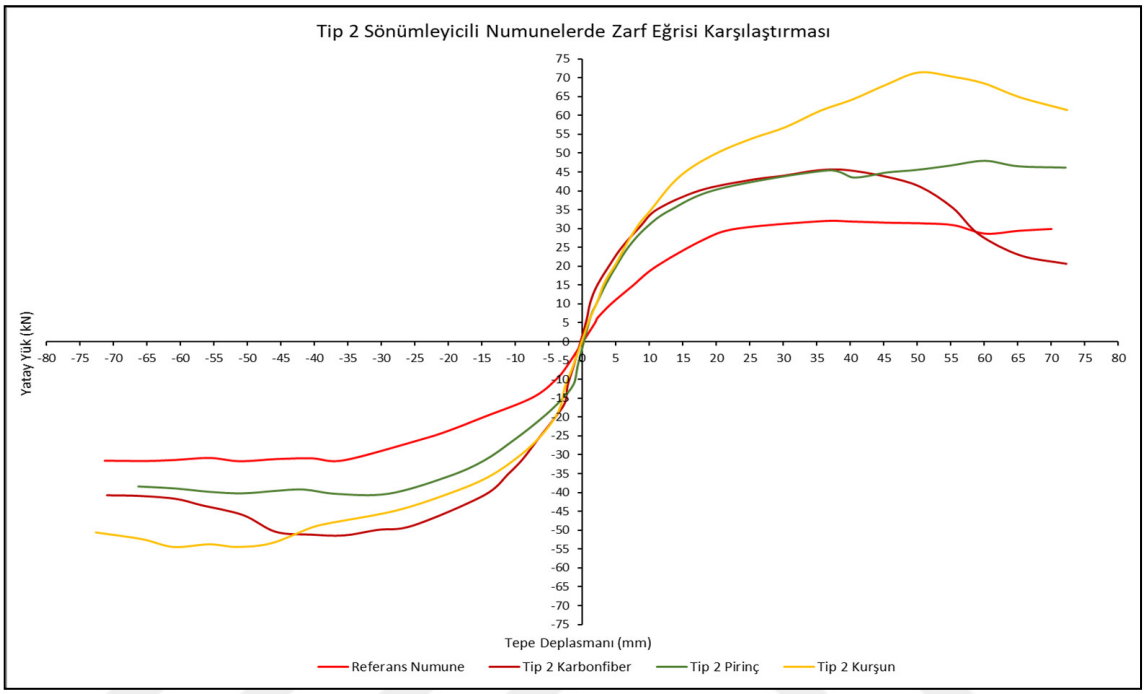
Bu başlık altında karbonfiber, kurşun ve pirinç sürtünme pedleriyle üretilmiş Tip 2 sönümleyicilerin monte edildiği betonarme çerçeve deney numuneleri zarf eğrileri, enerji tüketim grafikleri ve rijitlik değişimi açısından değerlendirilmiştir.

Zarf eğrilerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.34'de verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numunelerde maksimum dayanım açısından itme yönünde T2-KRN > T2-PRÇ > T2-KBF > RN sıralaması olduğu görülmektedir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numunelerde maksimum dayanım açısından çekme yönünde ise T2-KRN > T2-KBF > T2-PRÇ > RN sıralaması olduğu görülmektedir. T2-KBF çerçeve numunesinde 1. kat bağlantı köşebentlerinin çerçeve betonundan sıyrılmasıyla ve sönümleyici-çerçeve etkileşiminden meydana gelen hasarlar nedeniyle deney sonlarına doğru pozitif çevrimlerde numunenin dayanımı RN eğrisinin altına düşmüştür.

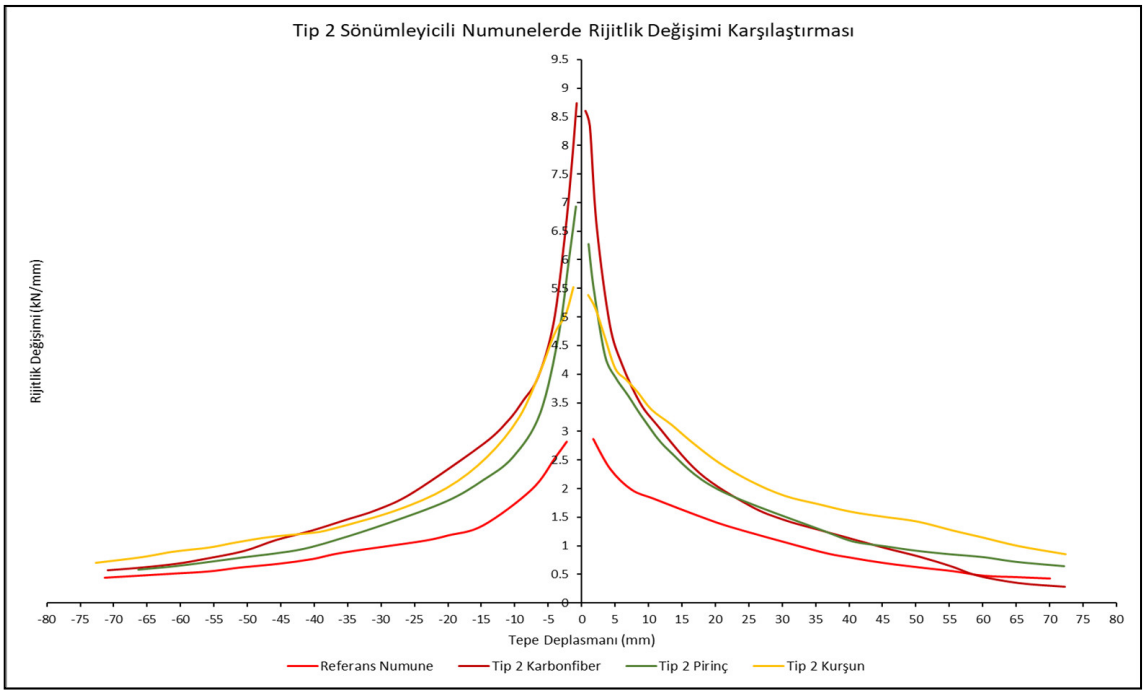
Rijitlik değişimlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.35'de verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numunelerde başlangıç rijitliği açısından T2-KBF > T2-PRÇ > T2-KRN > RN sıralaması olduğu görülmektedir. Göçme sınırına doğru sönümleyici bağlantılarının zayıflaması nedeniyle sönümleyici etkinliği azaldığından rijitlik değişimi eğrileri RN numunesine yakın değerlere düşmüştür. Özellikle 1. kat bağlantı köşebentlerinin çerçeve betonundan sıyrılmasıyla ve sönümleyici-çerçeve

etkileşiminden meydana gelen büyük hasarlar nedeniyle deney sonlarına doğru pozitif çevrimlerde T2-KBF numunelerinin rijitliği RN eğrisinin altına düşmüştür.

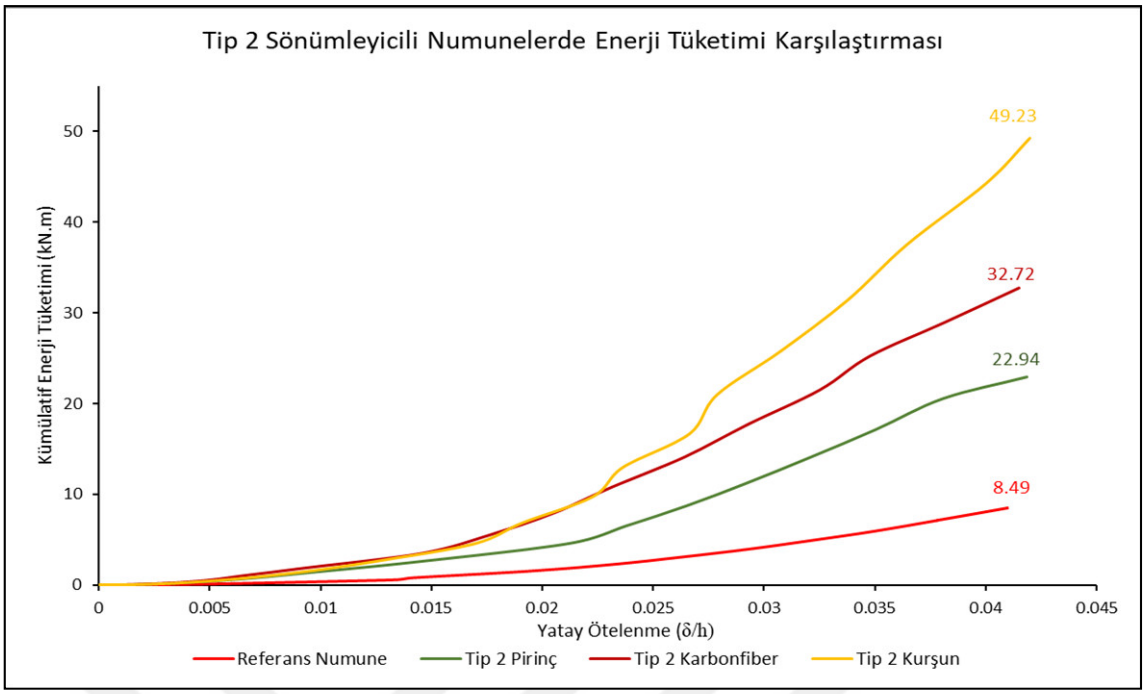
Enerji tüketimlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numunelerde enerji tüketimi açısından T2-KRN> T2-KBF > T2-PRÇ > RN sıralaması olduğu görülmektedir.



Şekil 4.34. Tip 2 sönümleyicili numunelerin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



Şekil 4.35. Tip 2 sönümleyicili numunelerin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük-Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.36. Tip 2 sönümleyicili numunelerin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

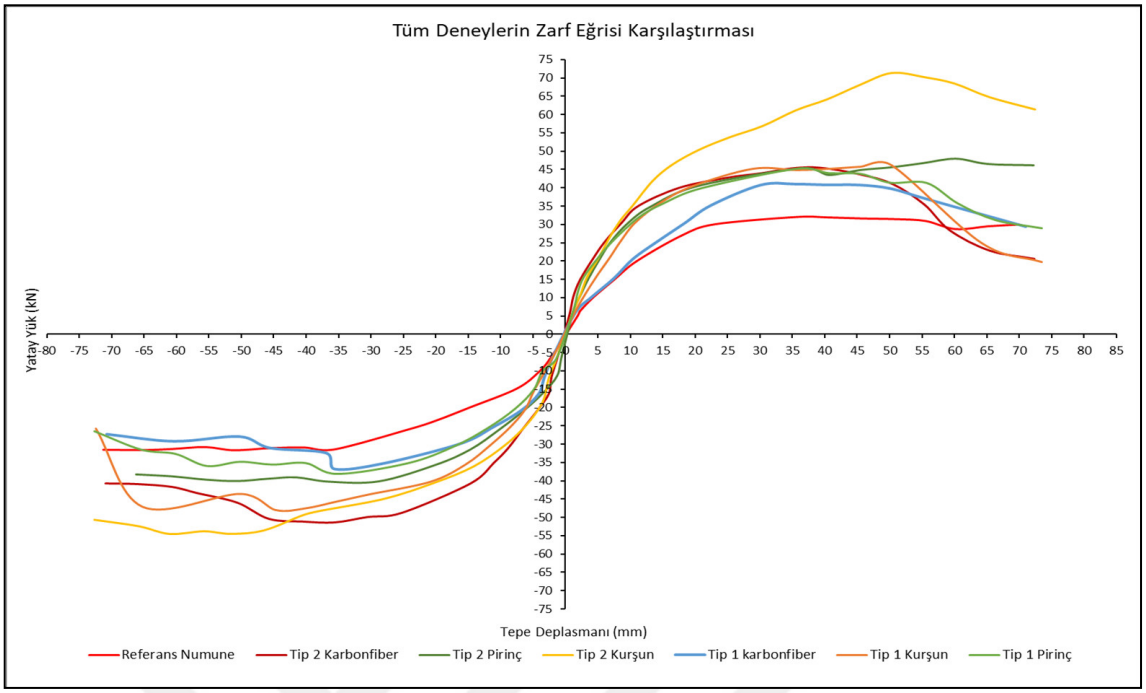
4.9. Tüm Betonarme Çerçeve Numunelerin Karşılaştırılması

Bu başlık altında karbonfiber, kurşun ve pirinç sürtünme pedleriyle üretilmiş Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerin monte edildiği betonarme çerçeve deney numuneleri zarf eğrileri, enerji tüketim grafikleri ve rijitlik değişimi açısından değerlendirilmiştir.

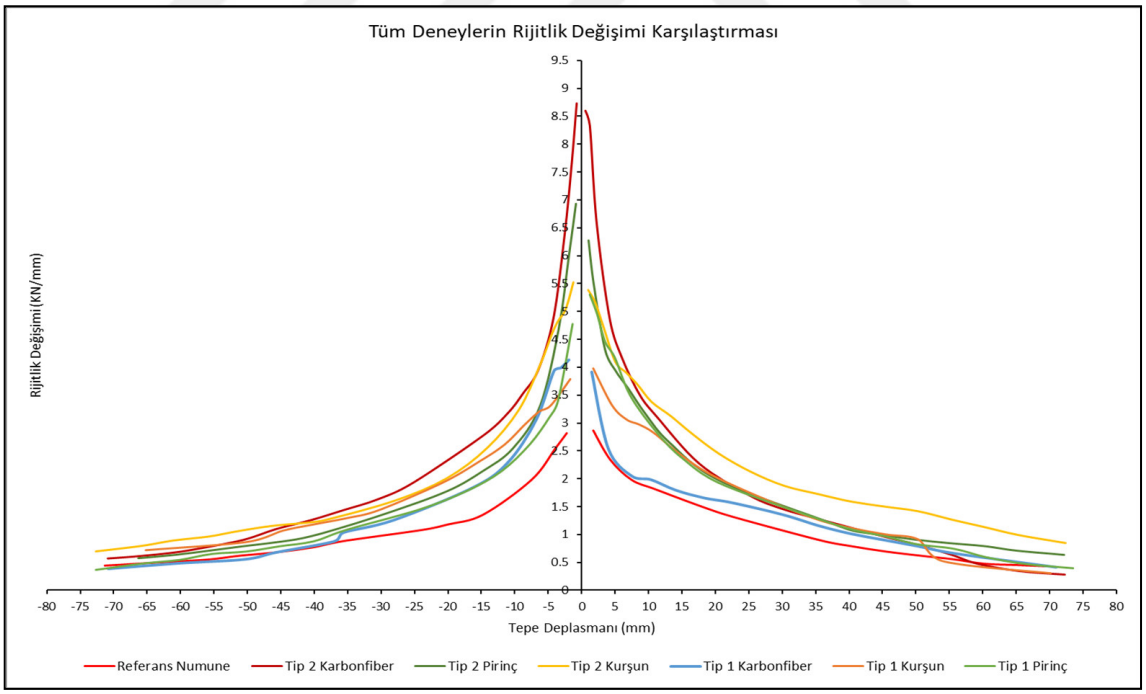
Tüm deneylere ait zarf eğrilerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.37'de verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numuneler genel olarak Tip 1 sönümleyicili numunelerden daha yüksek maksimum dayanımlara sahiptir. Zarf eğrileri sürtünme pedi malzemelerine göre değerlendirildiğinde ise kurşun sürtünme pedlerinin daha yüksek dayanım sağladığı söylenebilir.

Rijitlik değişimlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.38'de verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numuneler genel olarak Tip 1 sönümleyicili numunelerden daha yüksek başlangıç rijitliklerine sahip olduğu görülmektedir. Göçme sınırına doğru sönümleyici bağlantılarının zayıflaması nedeniyle sönümleyici etkinliği azaldığından rijitlik değişimi eğrileri RN numunesine yakın değerlere düşmüştür.

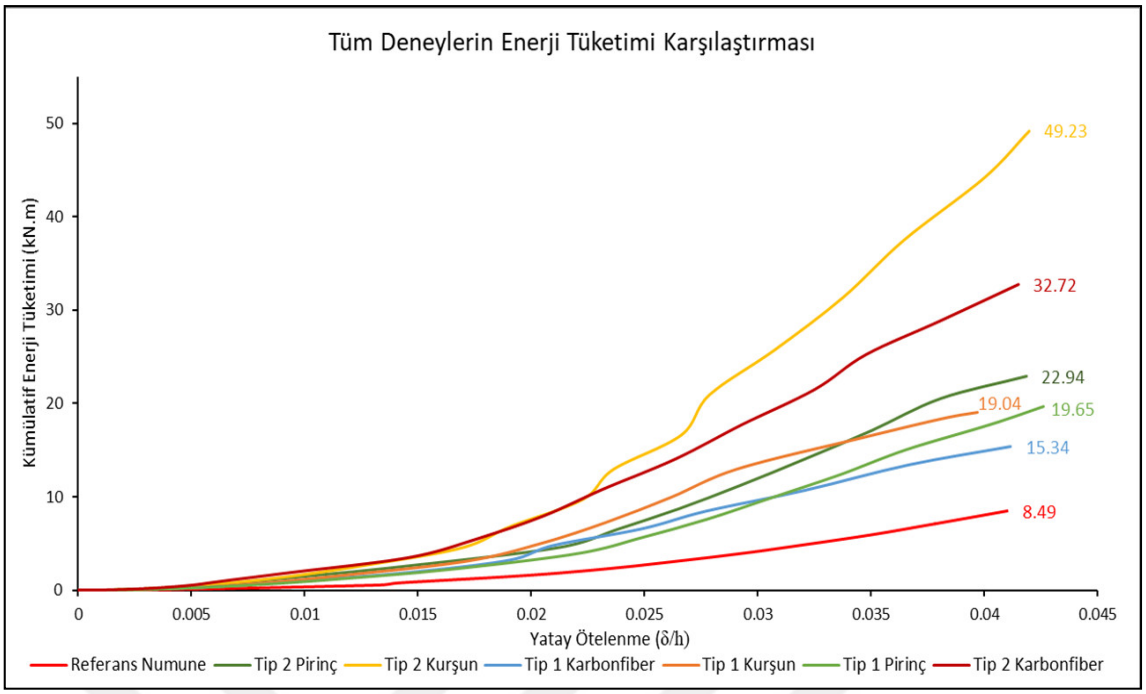
Enerji tüketimlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.39'da verilmiştir. Bu grafiğe göre Tip 2 sönümleyicili numuneler, enerji tüketimi açısından Tip 1 sönümleyicili numunelere belirgin bir üstünlük sağlamıştır. Kümülatif enerji tüketimleri sürtünme pedi malzemelerine göre değerlendirildiğinde ise yine kurşun sürtünme pedlerinin daha yüksek dayanım sağladığı söylenebilir.



Şekil 4.37. Tüm deney numunelerinin toplam yatay yük – tepe deplasman dayanım zarf eğrisi karşılaştırması



Şekil 4.38. Tüm deney numunelerinin rijitlik değişimi grafiği karşılaştırması (Toplam yatay yük- Tepe deplasmanına göre)



Şekil 4.39 Tüm deney numunelerinin kümülatif enerji tüketimi grafiği karşılaştırması

4.9.1. Rijitlik Değerlendirmesi

Betonarme çerçeve deney numunelerine ait rijitlik değerlerinin değişimi, deney başlangıcından sonuna kadar grafik halinde verilmişti. Tüm numunelerin rijitlik değerlendirmesi Şekil 4.38'deki rijitlik değişimi grafiği ile gösterilmiştir. Ayrıca betonarme çerçeve numunelerde ilk çevrim, maksimum yük ve son çevrimdeki rijitlikler referans numune rijitliği oranı 1.000 kabulüne göre oranlanarak Çizelge 4.1'de değerlendirilmiştir. Çizelge 4.1'deki rijitlik değerleri ve oranları incelendiğinde, RN'ye göre Chevron (ters V) braketler üzerinde montelenen Tip 2 sönümleyicili çerçevelerin, diyagonal braketli Tip 1 sönümleyicili çerçevelere göre ilk çevrim rijitlikleri daha çok artmış, son çevrim rijitlik değerlerindeki düşüşü azalmıştır.

Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilere ait kayma yükleri, çerçeve numunelere ekstra rijitlik kazandırdığından betonarme çerçevelerin daha yüksek çevrim rijitlik değerlerine sahip olmalarını sağlamıştır. Tip 2 sönümleyicili betonarme çerçevelerde, hem kayma ekseninin hareket yönüyle aynı olması hem de chevron braketin avantajı nedeniyle rijitlik artışı daha fazla olmuştur.

Sönümleyicilerin çerçeve boşluğundaki yerleşimi ve kayma ekseninin yatayla yaptığı açı, etkinliği açısından önemlidir. Tip 2 sönümleyici kayma ekseni yatayla aynı yönde olduğundan çerçeve rijitliğine katkısı, her katta sönümleyici kayma yükü kadar olmaktadır. Tip 1 sönümleyicili deney çerçevelerinde ise sönümleyici kayma ekseni,

diyagonal elemanın açısına göre bir değer aldığından yatay ile belirli bir açı (α^o) yapmaktadır. Bu nedenle Tip 1 sönümleyicili betonarme çerçevelerde her katta sönümleyici kayma yükünün cos α^o ile çarpımı kadar bir değerde rijitliğe katkı yapmaktadır. Rijitliği etkileyen diğer bir husus ise chevron braketlerin diyagonal braketlere göre daha etkili çalışmasıdır. Diyagonal braketler, özellikle ileri çevrimlerde diyagonal elemanda çekme kuvveti oluşturan negatif adımlarda, kolon-temel birleşimindeki köşebentin ayrılmaya başlamasıyla rijitlik kaybına neden olmaktadır. Diyagonal eleman bağlantı köşebentinin ankraj bölgesinde plastik mafsalın gelişmesiyle çatlaklar yoğunlaşmaktadır. Bu bölgedeki ankraj cıvataları, çatlakların ilerlemesiyle betondan sıyrılmakta ve rijitlik kaybı oluşmaktadır. Rjitlik kaybı nedeniyle ileri çevrimlerde Tip 1 sönümleyicili çerçevelerin zarf eğrilerinde dalgalanma meydana geldiği gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. Tüm deney numunelerinde rijitlik değerlerinin karşılaştırılması

Deney Numunesi	Rijitlik Değerleri (kN/mm)			Deplasman Oranları (δ/h)		İlk Çevrim Rijitliği Oranı	Maksimum Yük Rijitliği Oranı	Son Çevrim Rijitliği Oranı
	İlk Çevrim	Maksimum Yük Çevrimi	Son Çevrim	Maksimum Yük	Son Çevrim			
Deney-1 Referans Numune	2.866	0.897	0.427	0.0198	0.0389	**1.000**	**1.000**	**1.000**
Deney-2 Tip 1 Karbonfiber	3.909	1.161	0.414	0.0196	0.0394	1.364	1.294	0.969
Deney-3 Tip 1 Kurşun	3.984	0.916	0.308	0.0279	0.0390	1.390	1.021	0.721
Deney-4 Tip 1 Pirinç	5.302	1.262	0.393	0.0198	0.0408	1.850	1.407	0.920
Deney-5 Tip 2 Karbonfiber	8.605	1.154	0.574	0.0219	0.0401	3.002	1.286	1.344
Deney-6 Tip 2 Pirinç	6.272	0.797	0.639	0.0334	0.0401	2.188	0.888	1.496
Deney-7 Tip 2 Kurşun	5.387	1.419	0.848	0.0279	0.0402	1.879	1.581	1.986

4.9.2. Süneklik Değerlendirmesi

Referans Numunenin yatay yükler altında esnek bir davranış göstermesi nedeniyle, düşük dayanımlı fakat sünek kabul edilebilecek bir ötelenme davranışı göstermiştir. Sönümleyicilerin numune çerçevelere monte edilmesiyle dayanım artmış, süneklik bir miktar azalmıştır. Buna rağmen süneklik oranı çoğu numunede ortalama $\mu>3$ üzerinde kalmıştır.

Referans numune ve Tip 2 pirinç deney numunesinde yükleme sistemindeki strok boyu yetersizliğinden dolayı, çerçeve yükünün 0.85 maksimum dayanım değerine düştüğü deplasmana gidilememiştir (Şekil 3.94). Tip 2 pirinç numunesinde süneklik oranının 4'ün üstünde olduğu dikkate alınarak, zarf eğrisinin eğimine yakın bir eğim ile dayanımın düşeceği düşünülmüştür. Buna dayanarak zarf eğrisinin kuyruk kısmı 0.85 maksimum dayanım değerini yakalayıncaya kadar uzatılmıştır (Şekil 3.164).

Sönümleyici kullanımının sebeplerinden biri de çerçeveli binalarda süneklik ihtiyacını düşürmektir. Çerçeve sistemli yapılarda sünekliği artırmak için kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanların güçlendirilmesi genellikle izlenen yoldur. Sönümleyiciler ise enerji tüketiminin bir kısmını kendi üzerinde gerçekleştirerek süneklik talebini azaltmaktadır. Elde edilen sönümleyici + betonarme çerçevenin süneklik oranlarına bakıldığında enerji tüketimiyle süneklik oranı arasında bir korelasyon yakalanamadığı görülmektedir. Referans çerçeve numune, süneklik oranının sünek kabul edilebilecek kadar yüksek ama dayanımı düşük olduğu için esnek bir çerçevedir. Ayrıca dar histeretik çevrim eğrileri nedeniyle çevrimlerde tüketilen enerjisi az olmuştur. Dolayısıyla bu sebeplerle referans çerçevenin kümülatif enerji tüketimi düşüktür. Süneklik oranı, aynı enerji tüketim mekanizmasına ve yaklaşık çevrim alanlarına sahip numuneler için daha doğru sonuçlar vermektedir. Sönümleyiciler, çerçevelerin histeretik eğri şekillerini değiştirmekte ve alanlarını büyütmektedir.

Süneklik oranlarına bakılacak olunursa, sönümleyicilerin çerçeveleri daha gevrek bir davranışa zorladığı söylenebilmektedir. Çizelge 4.2'de çerçeve deneylerinde elde edilen zarf eğrilerinden yararlanarak hesap edilen ve deney sonuçlarında grafik olarak gösterilen süneklik değerlendirmeleri tablolaştırılmıştır.

Çizelge 4.2. Tüm deney numunelerinde süneklik oranının karşılaştırılması

Deney Numunesi	Pozitif Çevrimlerde			Negatif Çevrimlerde		
	δ_y	δ_u	μ_+	δ_y	δ_u	μ_-
Deney-1 Referans Numune	**20.03**	**T.E.**	**>4.000**	**26.64**	**T.E.**	**>4.000**
Deney-2 Tip 1 Karbonfiber	24.89	64.66	2.598	18.30	48.06	2.626
Deney-3 Tip 1 Kurşun	18.55	52.49	2.829	20.95	78.52	3.748
Deney-4 Tip 1 Pirinç	17.74	60.15	3.390	20.09	66.89	3.329
Deney-5 Tip 2 Karbonfiber	14.30	54.55	3.815	17.60	64.59	3.669
Deney-6 Tip 2 Pirinç	19.41	84.16*	4.336	18.19	76.96*	4.231
Deney-7 Tip 2 Kurşun	33.18	79.76	2.404	27.79	87.17	3.137
*Deneylerde % 4 tepe ötelenmesinde tespit edilemeyip, zarf eğrisinin kuyruğu belirli bir eğimle uzatılarak bulunmuş değerlerdir.						

4.9.3. Enerji Tüketim Değerlendirmesi

Bir yapının enerji tüketme kapasitesi, deprem etkilerine karşı koyabilme yeteneğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı yapılarda enerji tüketme yeteneğinin artması önemli bir göstergedir. Bu çalışmada betonarme çerçeve numunelere uygulanan statik itme deneyleri sonucu elde edilen histerezis eğrileri içerisindeki alanların toplanmasıyla, her numune için kümülatif tüketilen enerji değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.39'da tüm çerçeve numunelerin tepe ötelenmesine göre enerji tüketim grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.3'te ise akma çevrimine kadar, maksimum yük çevrimine kadar ve deney sonuna kadar tüketilen enerji miktarları referans numunenin değerleri 1.000'a denk olduğu düşünülerek oranlanmıştır.

Çizelge 4.3'te, 1 kN.m'nin, 1 kjoule'a eşit olduğundan hareketle, bütün deney numunelerinin akma çevriminde, maksimum yükte ve deney sonundaki kümülatif enerji tüketme kapasiteleri verilmiştir. Çizelge 4.3'e göre, sönümleyici kullanımının betonarme çerçeve numunelerin enerji tüketme kapasitesini artırdığı görülmektedir. Özellikle Tip 2 sönümleyicili deney numuneleri enerji tüketme kapasitesindeki daha fazla artış dikkat çekmektedir.

Aynı sönümleyici tipi kullanılan numunelerde, bazı deneylerde sönümleyicilerin ilerleyen çevrimlerde çerçeveden ayrılarak devre dışı kalması göz ardı edilip, sadece aynı deplasmanlardaki çevrim alanları üzerinden ve sürtünme pedi çeşidine göre bir

değerlendirme yapılırsa, enerji tüketimi açısından kurşun sürtünme pedinin daha üstün performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.3. Tüm deney numunelerinde tüketilen enerjinin karşılaştırılması

Deney Numunesi	Tüketilen Enerji Değerleri (kN.m-kj)			Tüketilen Enerji Oranları		
	Akma Çevriminde	Maksimum Yük Çevriminde	Deney Sonunda	Akma Çevriminde	Maksimum Yük Çevriminde	Deney Sonunda
Deney-1 Referans Numune	**0.209**	**1.547**	**8.491**	**1.000**	**1.000**	**1.000**
Deney-2 Tip 1 Karbonfiber	1.901	4.767	15.343	9.096	3.081	1.807
Deney-3 Tip 1 Kurşun	1.579	9.928	19.035	7.555	6.418	2.242
Deney-4 Tip 1 Pirinç	2.185	3.894	19.645	10.455	2.517	2.314
Deney-5 Tip 2 Karbonfiber	1.867	10.786	32.718	8.933	6.972	3.853
Deney-6 Tip 2 Pirinç	2.529	14.034	22.937	12.100	9.072	2.701
Deney-7 Tip 2 Kurşun	4.551	25.745	49.229	21.775	16.641	5.798

Tip 1 sönümleyicili çerçevelerde diyagonal braketin bir handikapı olarak ilerleyen çevrimlerde kesme hasarı ve ankraj sıyrılması nedeniyle çerçeve dayanımı düşük kalmıştır.

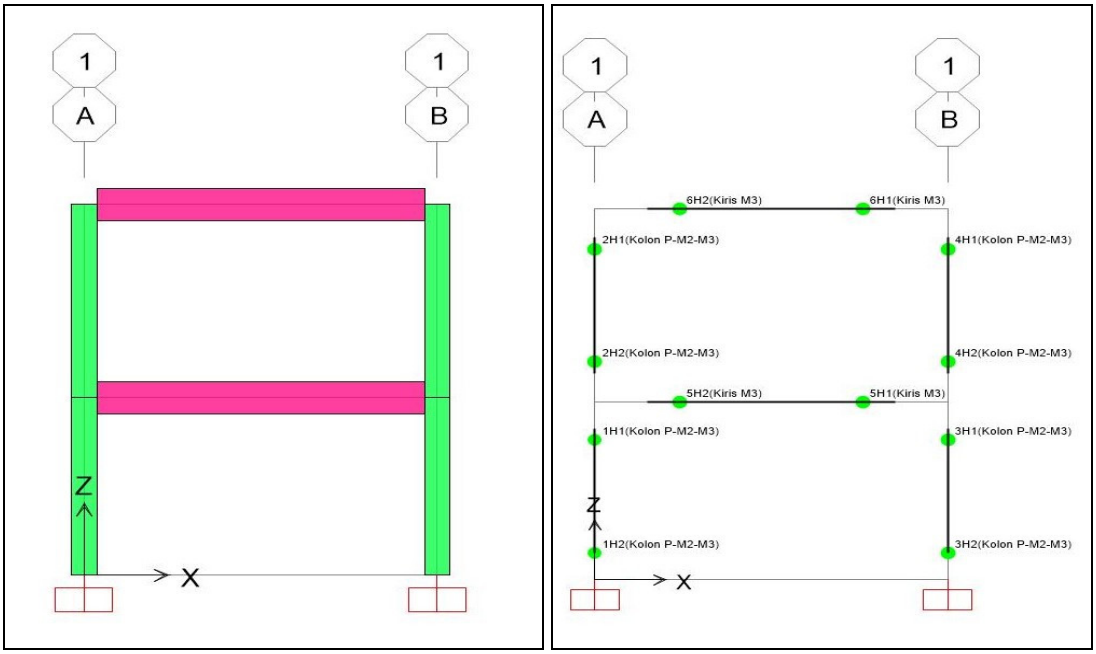
5. ANALİTİK ÇALIŞMA

Tez çalışmasının analitik kısmının sunulduğu bu bölümde, SAP2000 sonlu eleman yapı analiz yazılımında modellenen boş betonarme çerçeve, betonarme çerçeve + Tip 1 sönümleyici, betonarme çerçeve + Tip 2 sönümleyici kombinasyonlarına ait statik itme analizleri yapılarak, sönümleyicilerle rehabilitasyonun betonarme çerçeve davranışında oluşturacağı iyileşme ve muhtemel yapısal tepkiler belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

İlk olarak betonarme çerçevenin yükleme protokolünde izlenecek yolun tayini ve kapasite eğrisinin öngörülebilmesi için deney öncesinde referans numune olarak belirlenen yalın betonarme çerçeveye ve sönümleyici bilgilerine göre SAP2000'de oluşturulan modellere deplasman kontrollü statik itme analizi uygulanmıştır. Statik itme analizinden elde edilen kapasite eğrileri, deneylerden elde edilen histerezis ve zarf eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümün sonunda, elde edilen analiz sonuçları değerlendirilerek yorumlanmıştır.

5.1. Betonarme Çerçeve Numunelerin SAP2000'de Modellenmesi

Şekil 5.1'de referans numune (RN) için SAP2000'de oluşturulan model gösterilmiştir. Kirişler ve kolonlar, her bir elemanın başlangıç ve sonunda yığılı plastik davranışa sahip doğrusal olmayan bölgeler bulunan (plastik mafsal) çerçeve elemanları olarak modellenmiştir.



Şekil 5.1. RN deney numunesinin SAP2000'de oluşturulan modeli ve tanımlanan plastik mafsallar

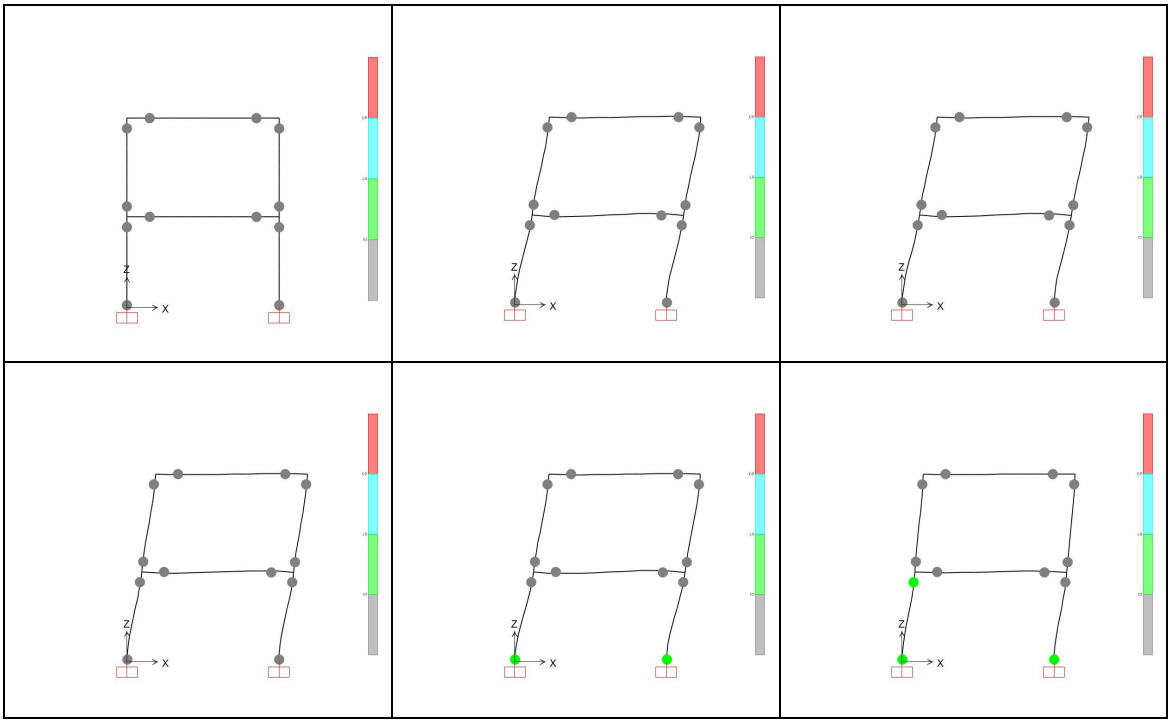
Plastik mafsal özellikleri, betonarme kirişler için ASCE/SEI-41 (2017) Tablo 10-7'de belirlenen kiriş modelleme parametreleri kriterlerine göre, SAP2000 ayarlarıyla otomatik olarak atanmıştır. Kolonlar için ise yine ASCE/SEI-41 (2017) Tablo10-8'de belirlenen betonarme dairesel olmayan kolonlar için modelleme parametrelerine göre SAP2000 ayarlarıyla otomatik atanmıştır. Mafsal tipleri kirişler için M3, kolonlar için P-M2-M3 mafsalıdır.

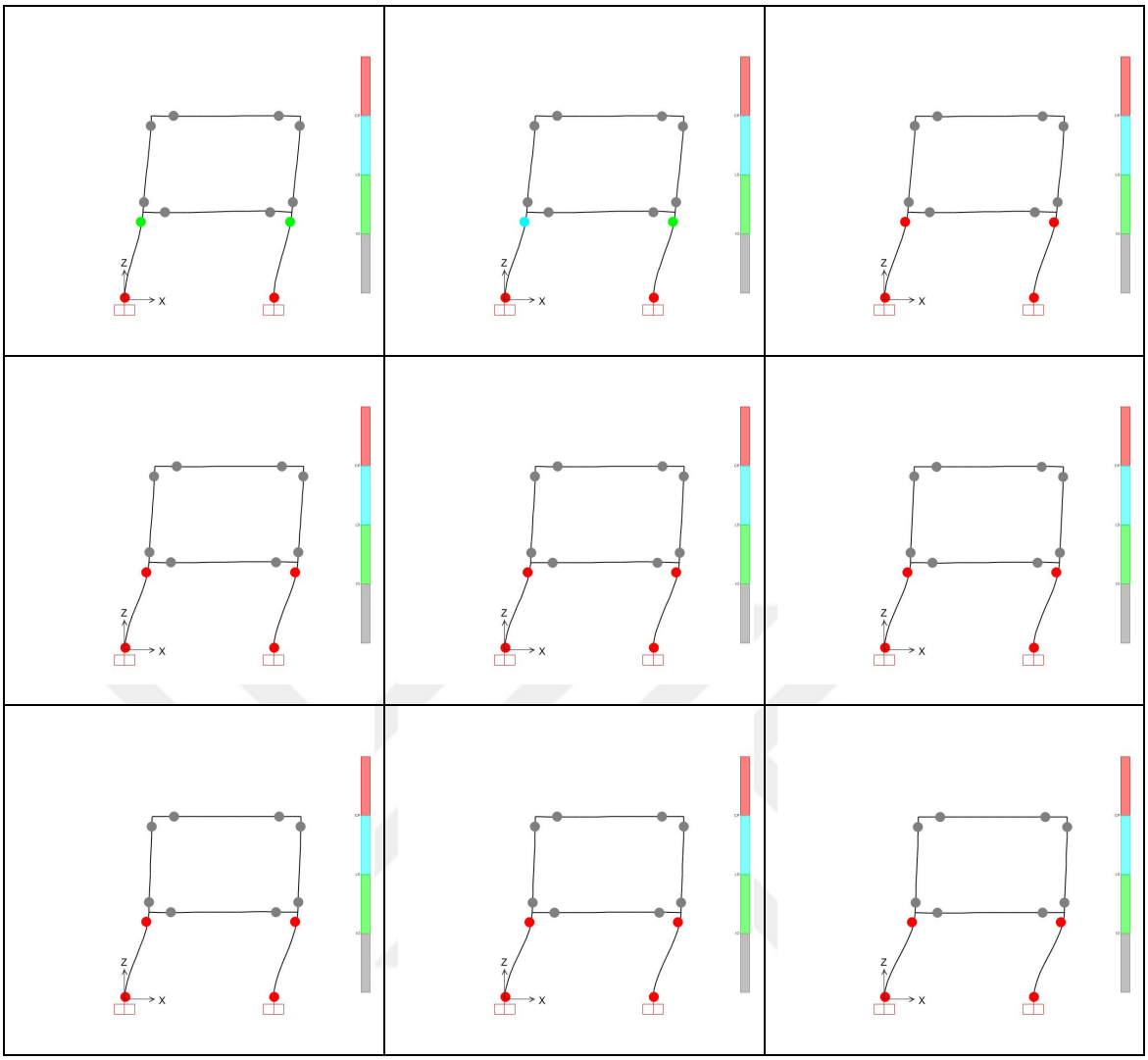
Betonarme çerçeve numune elemanları, deney numunelerinin üretiminde kullanılan beton ve donatı gibi malzemelerin özellik ve boyutlarına göre modellenmiştir. Deneylerde kolonlara eksenel yük etkimediğinden, TBDY (2018)'de eğilme etkisindeki betonarme çubuk elemanlarda kirişler için 0.35EI olarak belirlenen etkin kesit rijitliği hem kiriş hem de kolon için kullanılmıştır.

Statik itme analizlerinde adım adım çerçevede gelişen plastik mafsallar şekil ve çizelgeler ile gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda plastik mafsalların dönmeleri performans seviyelerine göre farklı renkler ile gösterilmiştir.

Çizelge 5.1'de referans çerçeve numunede (RN) kolon ve kiriş uçlarına atanan mafsallardaki dönmelere göre performans değişimleri adım adım gösterilmiştir. Çizelge 5.2'de ise bu mafsalların tepe deplasman ve taban kesme kuvvetine göre adım adım plastik mafsal sayıları ve dönme açılarına göre performans durumları gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. RN numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi

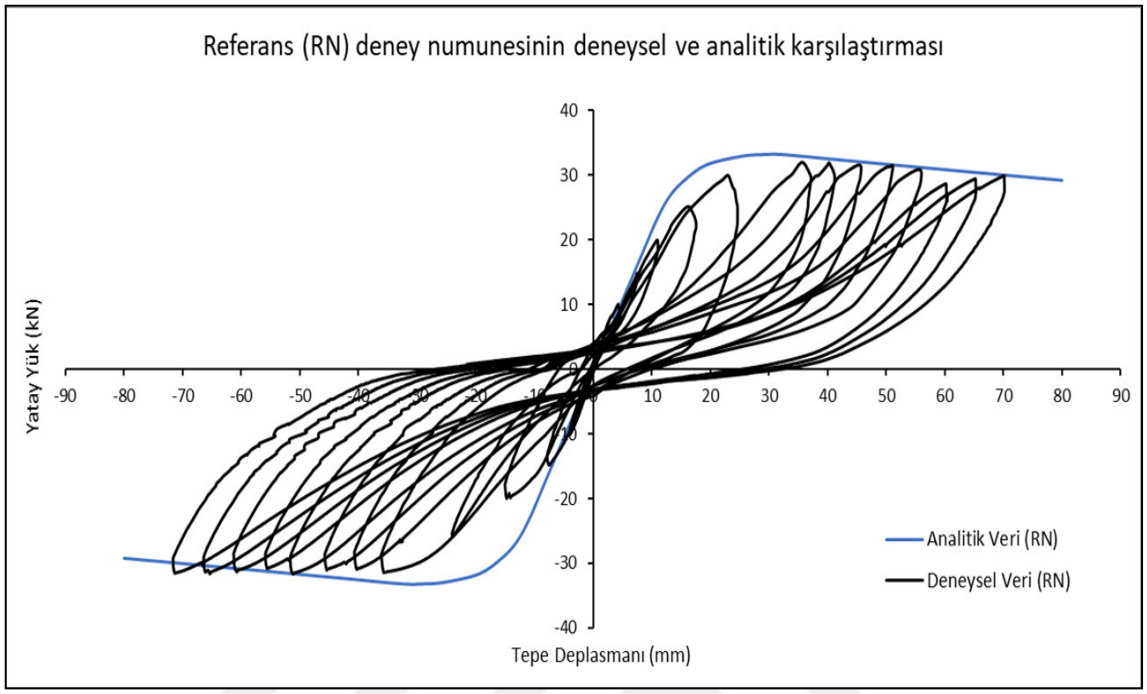




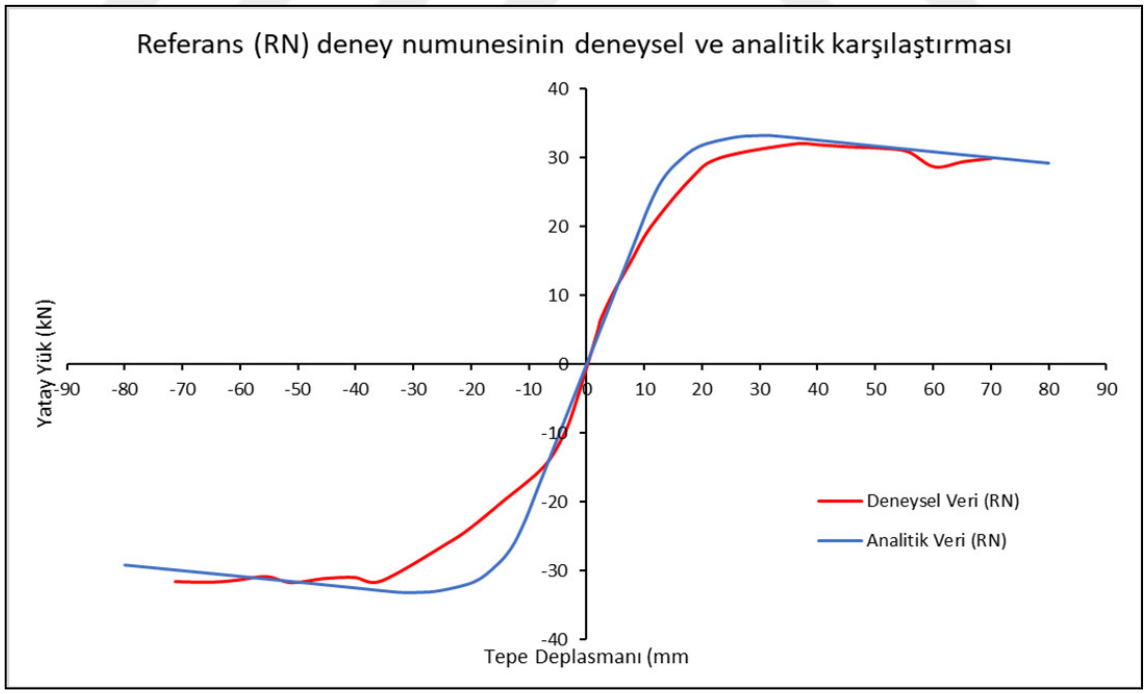
Çizelge 5.2. RN deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	8	17.04984	12	0	0	0	0	12	0	0	0
2	10.747069	22.90178	11	1	0	0	0	12	0	0	0
3	13.08234	26.76957	10	2	0	0	0	12	0	0	0
4	15.745323	29.33974	9	3	0	0	0	10	2	0	0
5	19.453895	31.64071	8	4	0	0	0	9	3	0	0
6	25.296026	32.91972	8	2	2	0	0	8	2	0	2
7	28.981031	33.18627	8	1	3	0	0	8	1	1	2
8	32.546881	33.17856	8	0	4	0	0	8	0	0	4
9	40.546881	32.49875	8	0	4	0	0	8	0	0	4
10	48.546881	31.82384	8	0	4	0	0	8	0	0	4
11	56.546881	31.15367	8	0	4	0	0	8	0	0	4
12	64.546881	30.4878	8	0	4	0	0	8	0	0	4
13	72.546881	29.82588	8	0	4	0	0	8	0	0	4
14	80	29.21278	8	0	4	0	0	8	0	0	4

Referans deney numunesinin (RN) deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden Şekil 5.2'de ve Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.2. RN deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)



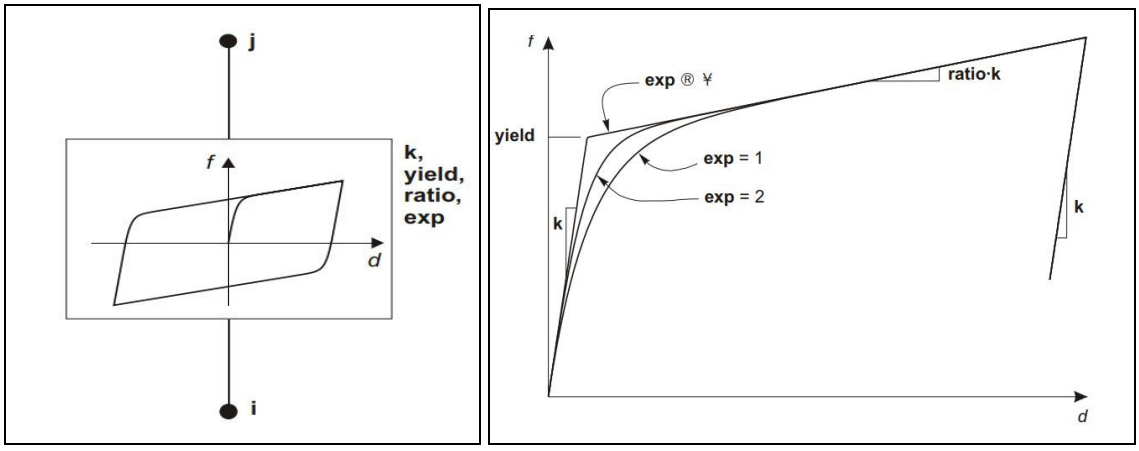
Şekil 5.3. RN deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)

5.2. Sönümleyicilerin Link Eleman Olarak Modellenmesi

Sürtünme sönümleyiciler SAP2000 yazılımında bir bağlantı elemanı (Link Element) olarak modellenebilmektedir. Başka bir ifadeyle çözümü yapacak sonlu eleman yazılımında, braket + sönümleyiciden oluşan eleman, belli bir değerde (sönümleyici kayma yükünde) akan bir braket olarak modellenir. Sürtünme sönümleyiciler yüklendiklerinde rijit-mükemmel plastik davranışa yakın, ideal bir elasto-plastik eleman gibi davranmaktadır. Bu durumda analizlerde plastik Bouc-Wen modelinin uygulanması uygundur (Moreschi ve Singh, 2003). Bu model sönümleyicinin davranışını basitleştirirken, Wen modeli analizi basitleştirmektedir.

Deneylerde de elde edildiği gibi her iki tip sönümleyicide çevrimsel histerezis eğrileri karakteristik olarak dikdörtgen şeklindedir. Rotasyonel sürtünme sönümleyicilerin deneylerde elde edilen histerezis eğrisinin özellikleri, sönümleyicinin statik, dinamik ve doğrusal olmayan diğer analizlerde bir link eleman olarak modellenmesini olanak sağlamaktadır.

SAP2000'de link elemanlarda istenen herhangi bir deformasyonel serbestlik derecesi için bağımsız tek eksenli plastiklik özellikleri belirlenebilmektedir. Plastisite modeli, Wen (1976) tarafından önerilen histeretik davranışa dayanmaktadır (Şekil 5.4a). Wen modeline göre iç deformasyonlar birbirinden bağımsızdır. Bir serbestlik derecesindeki akma, diğer deformasyonların davranışını etkilememektedir. Bir serbestlik derecesi için doğrusal olmayan özellikler belirtilmezse, bu serbestlik derecesi etkin rijitliği sıfır olarak doğrusaldır.



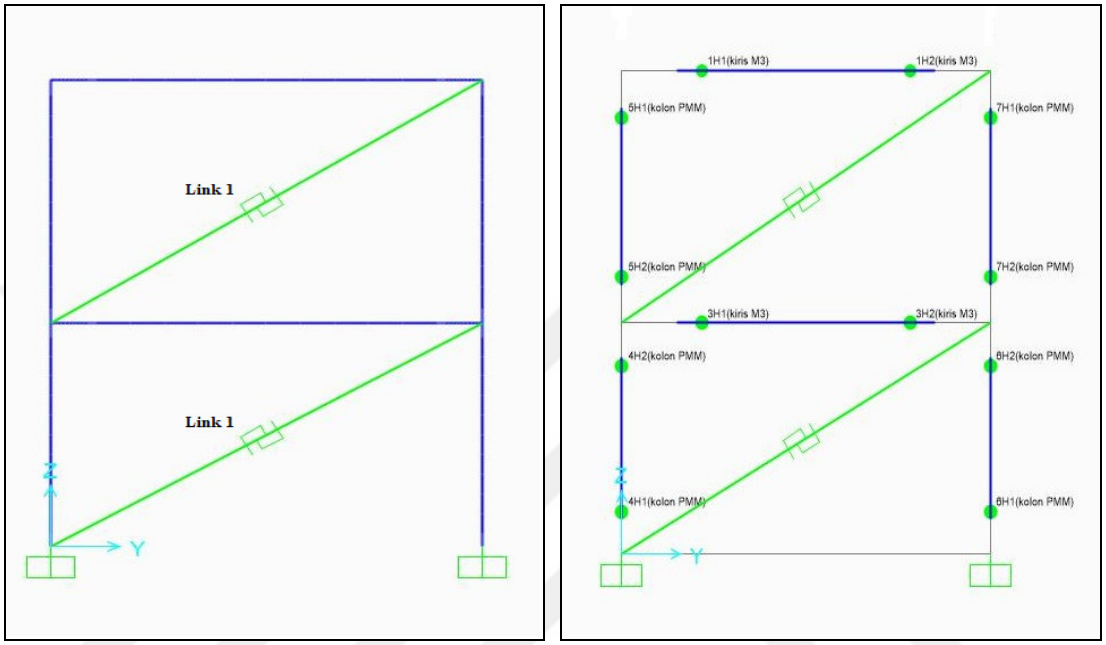
Şekil 5.4. a) Tek Eksenli Deformasyon için Wen Plastisite Özellik Türü b) Wen Plastisite Özelliği için Parametrelerin Tanımı (CSI, 2016)

Buradaki parametrelerden **k** elastik yay sabiti (elastik rijitlik), **yield** akma kuvveti, **ratio** akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe (**k**) oranıdır. **Exp** değeri ise birden büyük veya bire eşit bir üs (exponent) değeridir. Bu üssün daha büyük değerleri, Şekil

5.4b'de gösterildiği gibi akmanın keskinliğini artırmaktadır. **Exp** değeri için pratik sınır yaklaşık 20'dir (CSI, 2016).

5.3. Çalışmadaki Rotasyonel Sürtünme Sönümleyiciler için Modelleme

Tip 1 deney numunelerinin SAP2000'de oluşturulan modeli ve tanımlanan plastik mafsallar aşağıdaki Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Tip 1 deney numunelerinin SAP2000'de oluşturulan modeli ve tanımlanan plastik mafsallar

Sönümleyiciler aşağıdaki parametreler kullanılarak SAP2000 ve benzeri analiz yazılımlarda "Link Element" olarak modellenebilmektedir. SAP2000 modelinde link elemanı tanımlarken kullanılan sönümleyici özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- **Genel Özellikler**

1. Link Eleman Tipi : Plastik (Wen)
2. Link Eleman Kütlesi: $M_L = M_1+M_2$ (M_1=Sönümleyicinin kütlesi, M_2=Braket eleman kütlesi)
3. Ağırlık: $W = M_L \times g$

Ağırlık Tip 1 sönümleyici için 30 kg, Tip 2 sönümleyici için 50 kg olarak belirlenmiştir.

4. Dönme Ataletleri: $R_1=R_2=R_3=0$
5. Deformasyon Yönü: U_1 (eksenel)

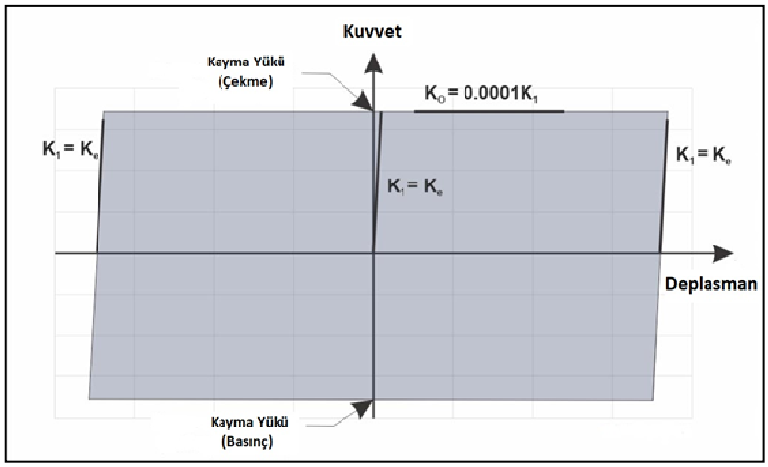
SAP2000'de doğrusal olmayan (nonlinear) özellikler etkinleştirilerek doğrusal olmayan davranış için tanımlanması gereken özellikler tanımlanır.

- **Doğrusal Olmayan Özellikler**

1. Efektif Rijitlik (K_{eff}): Efektif rijitlik sönümleyiciyle beraber kullanılacak olan braketin özelliklerine bağlı olarak ya da sönümleyicinin kayma yükünün belirli bir katı olarak belirlenir. Braket rijitliği dikkate alınacaksa K=A.E/L formülünden braket rijitliği alınır. Ya da kN-m ile çalışılıyorsa kayma yükünün 1000 katını almak yeterli görülmüştür (PallDynamics, 2023). Burada amaç eksenel yük altında sönümleyici kayma yüküne ulaşıncaya kadar braket elemanın eksenel deformasyon yapmayacağı bir rjitlikte olduğunu kabul etmektir. Tip 1 ve Tip 2 sönümleyici için braket için kullanılan kutu profilin burkulma yükünün 10 katı olan 125 ton olarak alınmıştır.
2. Efektif Sönüm (b_{eff}): Sönümleyicinin Denklem 1.14 ile bulunan efektif sönümü (b_{eff}) girilmelidir. Efektif sönüm değeri bilinmiyorsa 0 değeri girilebilir. Tip 1 ve Tip 2 sönümleyici için daha önce Denklem 1.14 ile bulunan ortalama efektif sönüm değeri b_{eff} = 0,31 olarak alınmıştır.
3. Akma Dayanımı: Sönümleyici Kayma Yükü (Şekil 5.6)

Sürtünme pedi deneylerinde Tip 1 ve Tip 2 sönümleyiciler için kurşun sürtünme pedli sönümleyicilerde kayma yükü 0,85 ton, karbonfiber sürtünme pedli sönümleyicilerde kayma yükü 0,9 ton, pirinç sürtünme pedli sönümleyicilerde kayma yükü 1 ton olarak belirlenmiştir.

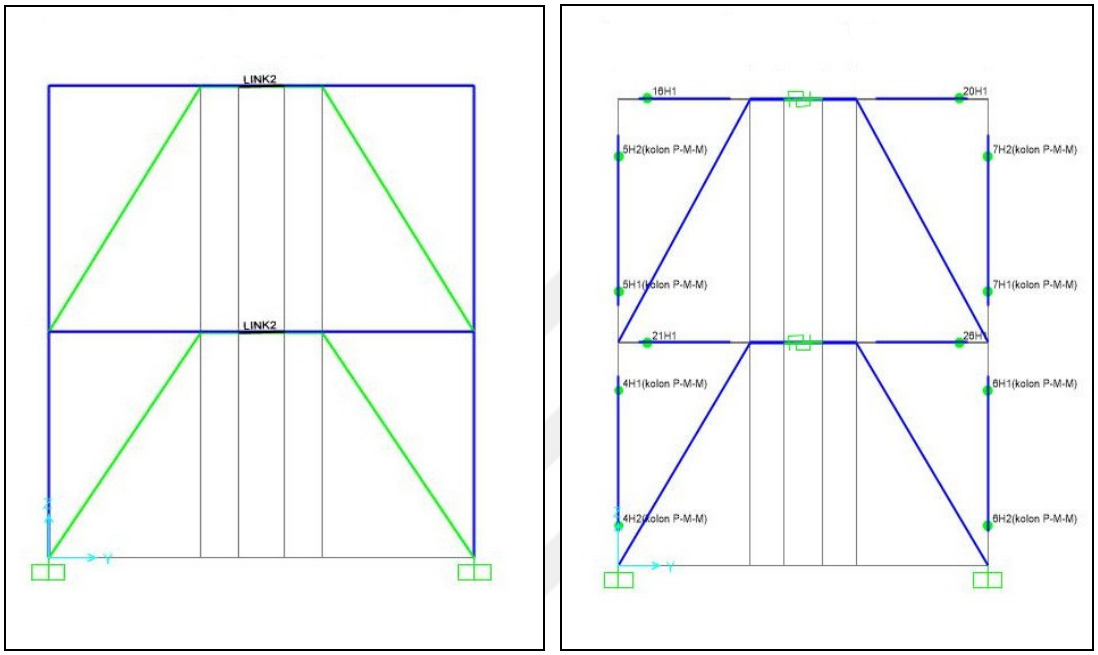
4. Akma Sonrası Rijitlik Oranı = 0,0001 (Şekil 5.6)
5. Akma Exponenti = 10



Şekil 5.6. Teorik sürtünme sönümleyici histeretik çevrimi (QUAKETEK, 2023)

Tip 1 sönümleyici ve bağlandığı diyagonal braket eleman yaklaşık aynı doğrultuda çalıştığı için tamamının sönümleyici gibi düşünülerek modellenmesi uygun olacaktır. Bu nedenle Tip 1 sönümleyici olarak modellenen "Link 1" elemanı

çerçevedeki her kata diyagonal sönümleyici olarak yerleştirilmiştir. Tip 2 sönümleyicide ise chevron braketler, kullanılan 40x60x4 mm kutu profil ile kolon bağlantıları moment aktarmayacak şekilde modellenmiştir. Chevron braketleri üst kısımda birleştiren çelik parça ise bağlantı noktalarında moment aktarabilen birleşimlere sahiptir. Tip 2 sönümleyici, chevron braketleri birleştiren 40 cm genişliğindeki yatay parça ile kat kirişi arasında 150 mm genişlik ve 3 mm yüksekliğe sahip "Link 2" elemanı olarak modellenmiştir (Şekil 5.7).



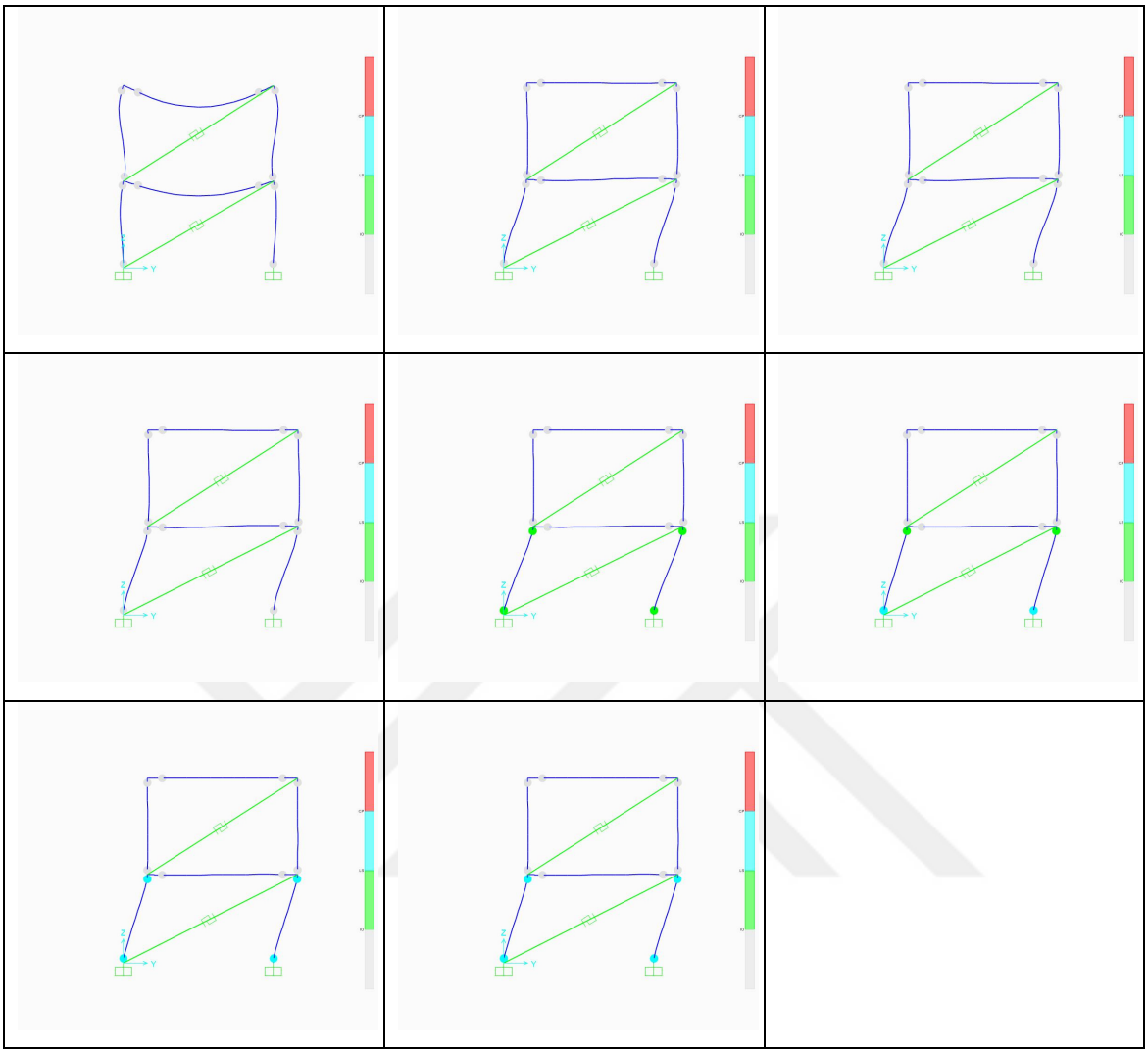
Şekil 5.7. Tip 2 deney numunelerinin SAP2000'de oluşturulan modeli ve tanımlanan plastik mafsallar

Çizelge 5.3'de T1-KBF deney numunesi için SAP2000'deki tablolardan alınan yatay yüke (kN) karşılık deplasman (mm) değerleri, plastik mafsal sayıları, ve bu plastik mafsalların performans durumları verilmiştir. Plastik mafsallar, üzerinde oluşan dönme miktarlarına göre derecelendirilmiştir. Çizelge 5.4'de ise T1-KBF deney numunesinde statik itme analizi sonucu adım adım oluşan plastik mafsallar ve gelişimleri gösterilmiştir.

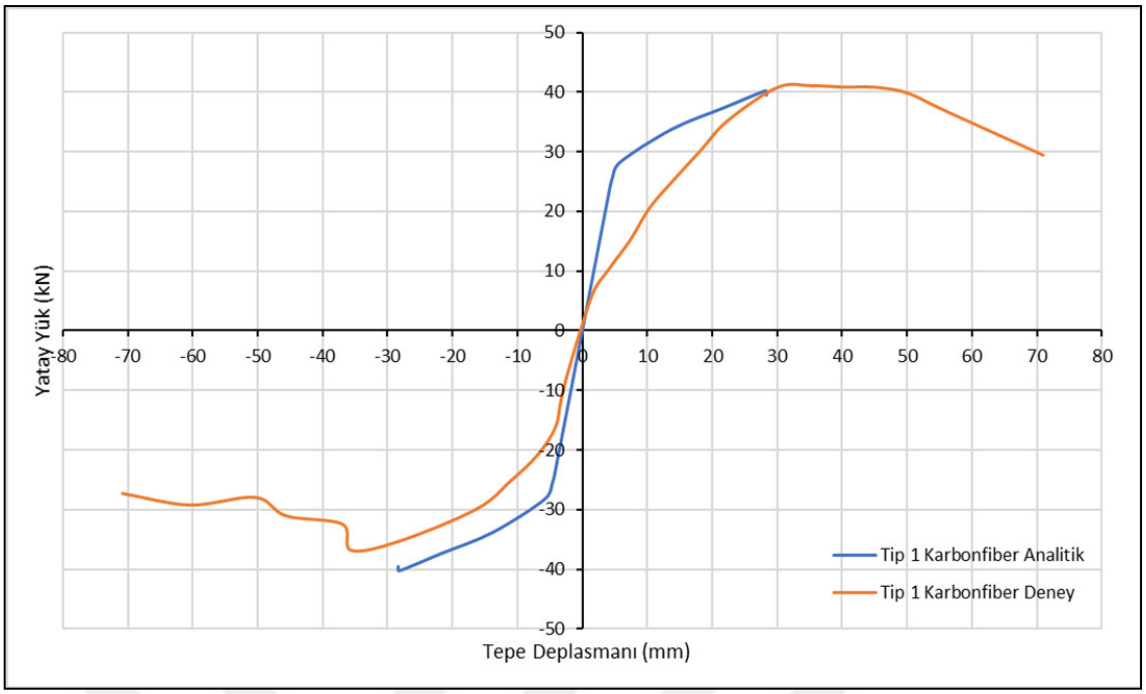
Çizelge 5.3. T1-KBF deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	4.286	24.186	11	1	0	0	0	12	0	0	0
2	4.609	25.517	10	2	0	0	0	12	0	0	0
3	5.776	28.229	8	4	0	0	0	12	0	0	0
4	13.776	33.795	8	4	0	0	0	8	4	0	0
5	21.776	37.372	8	4	0	0	0	8	2	2	0
6	28.211	40.237	8	3	1	0	0	8	0	4	0
7	28.356	39.511	8	3	1	0	0	8	0	4	0

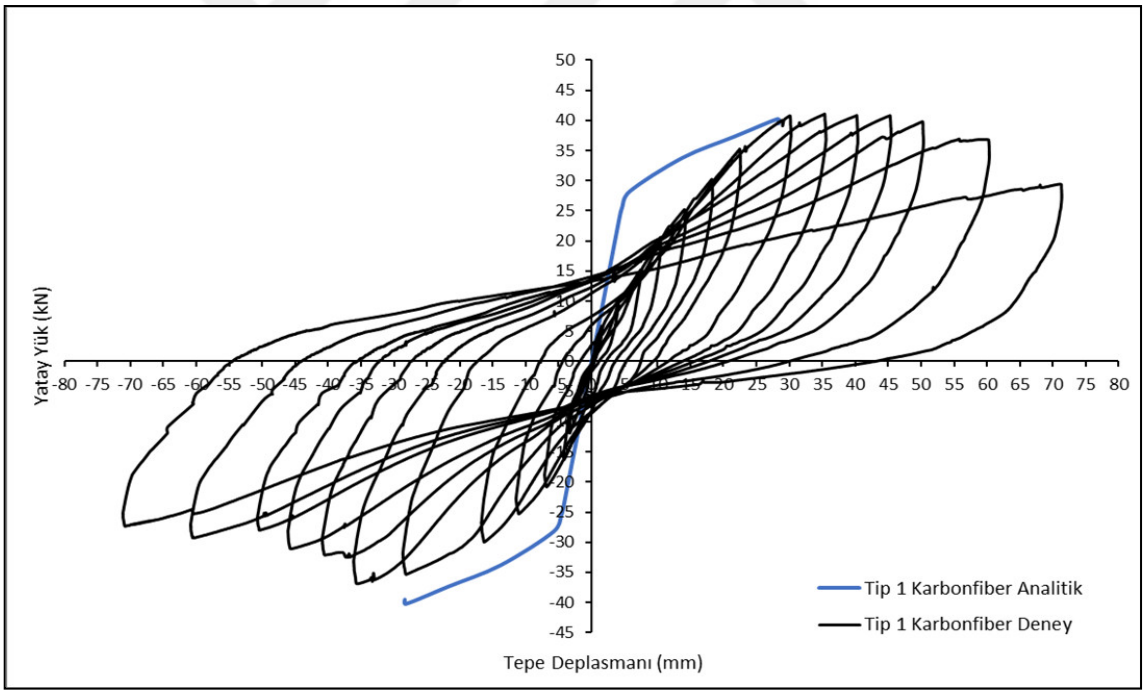
Çizelge 5.4. T1-KBF numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi



T1-KBF numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden zarf eğrisi Şekil 5.8'da ve histerezis eğrisi Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.8. T1-KBF deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)



Şekil 5.9. T1-KBF deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)

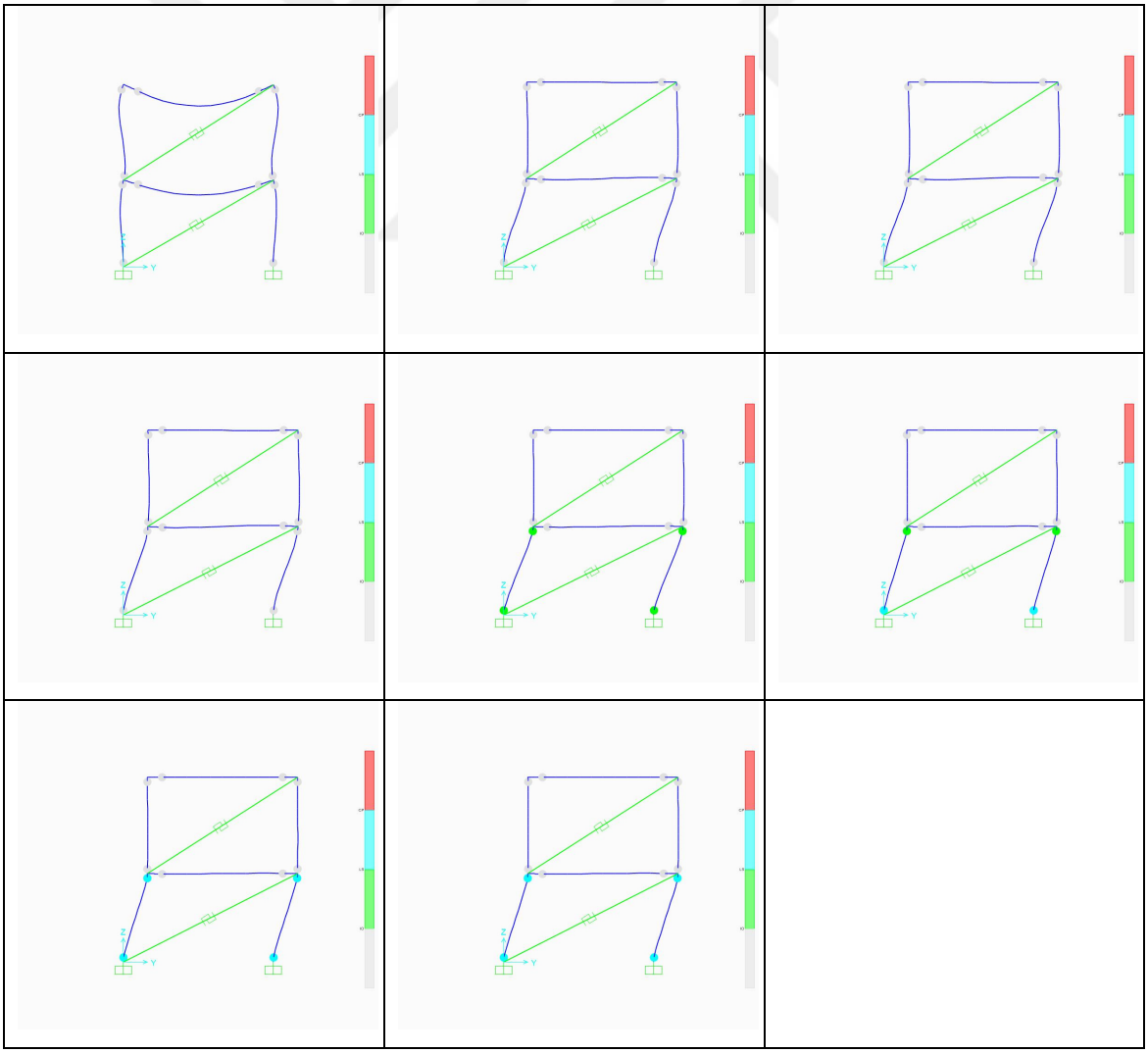
Çizelge 5.5'de T1-PRÇ deney numunesi için SAP2000'deki tablolardan alınan yatay yüke (kN) karşılık deplasman (mm) değerleri, plastik mafsal sayıları, ve bu plastik mafsalların performans durumları verilmiştir. Plastik mafsallar, üzerinde oluşan dönme miktarlarına göre derecelendirilmiştir. Çizelge 5.6'da ise T1-PRÇ deney

numunesinde statik itme analizi sonucu adım adım oluşan plastik mafsallar ve gelişimleri gösterilmiştir.

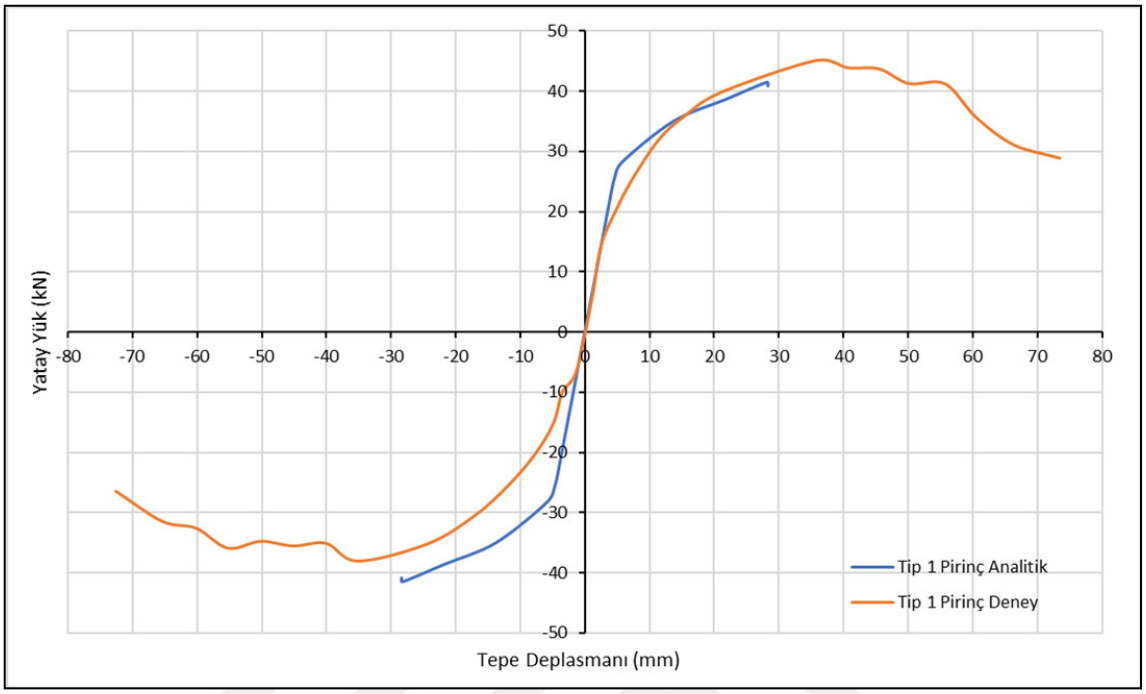
Çizelge 5.5. T1-PRÇ deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	4.286	24.186	11	1	0	0	0	12	0	0	0
2	4.609	25.518	10	2	0	0	0	12	0	0	0
3	5.777	28.242	8	4	0	0	0	12	0	0	0
4	13.777	35.071	8	4	0	0	0	8	4	0	0
5	21.777	38.661	8	4	0	0	0	8	2	2	0
6	28.211	41.536	8	3	1	0	0	8	0	4	0
7	28.364	40.89	8	3	1	0	0	8	0	4	0

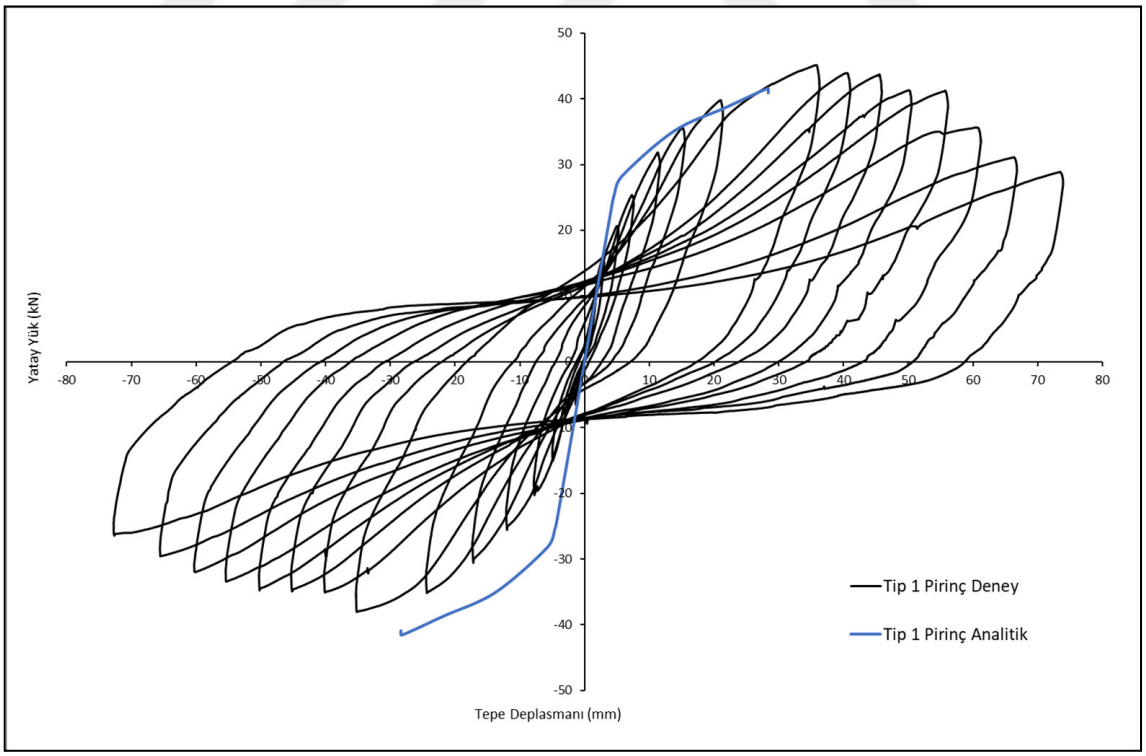
Çizelge 5.6. T1-PRÇ deney numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi



T1-PRÇ numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden zarf eğrisi Şekil 5.10'da ve histerezis eğrisi Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.10. T1-PRÇ deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)



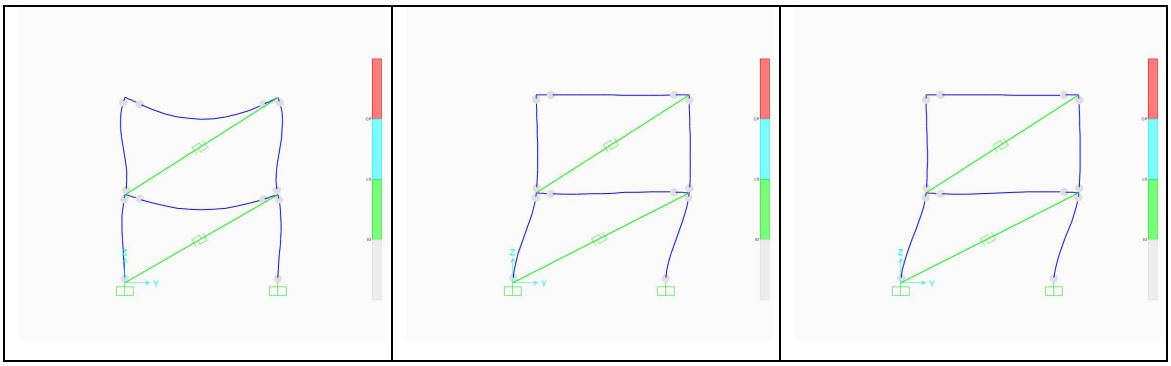
Şekil 5.11. T1-PRÇ deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)

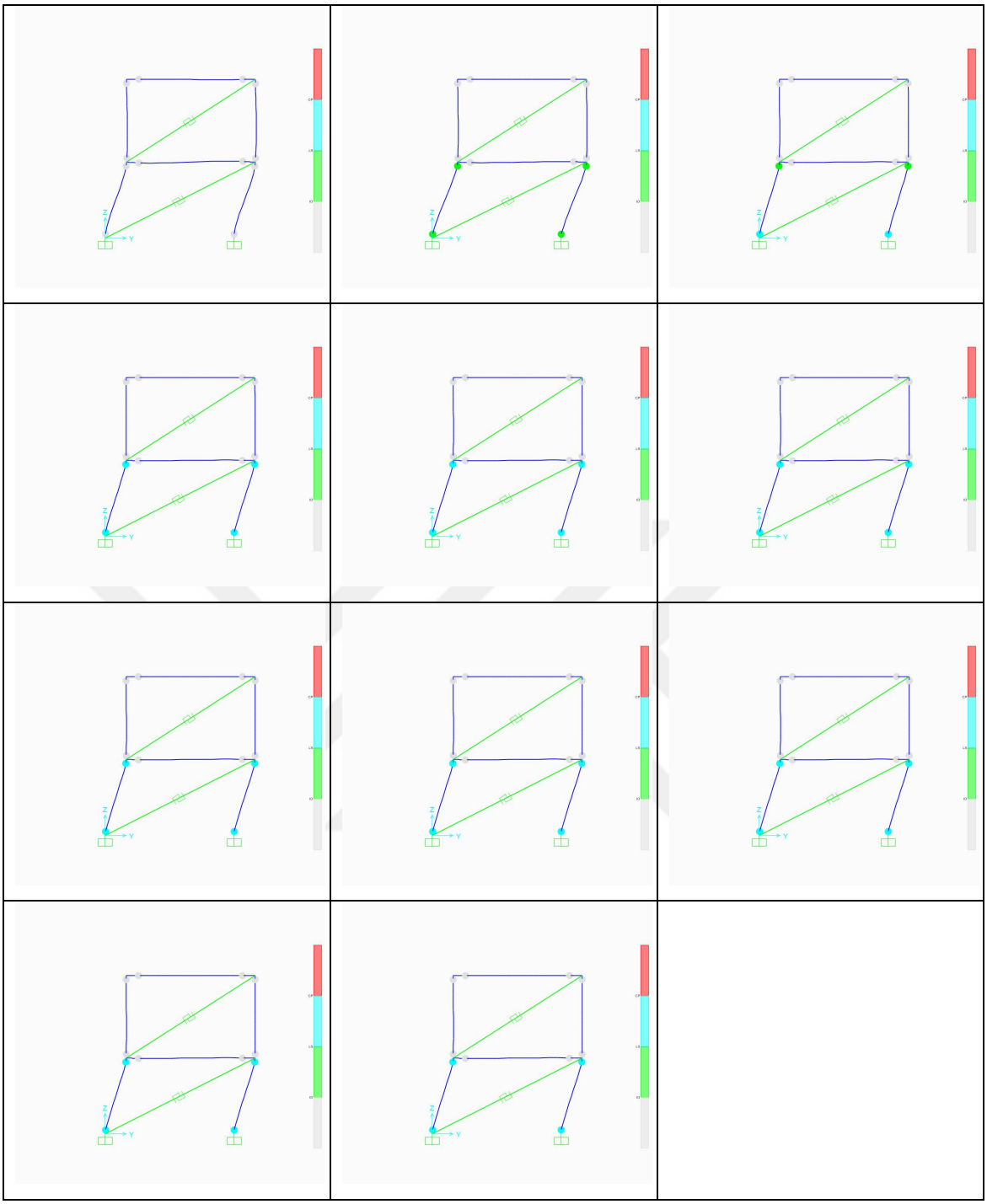
Çizelge 5.7'de T1-KRN deney numunesi için SAP2000'deki tablolardan alınan yatay yüke (kN) karşılık deplasman (mm) değerleri, plastik mafsal sayıları, ve bu plastik mafsalların performans durumları verilmiştir. Plastik mafsallar, üzerinde oluşan dönme miktarlarına göre derecelendirilmiştir. Çizelge 5.8'de ise T1-KRN deney numunesinde statik itme analizi sonucu adım adım oluşan plastik mafsallar ve gelişimleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. T1-KRN deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

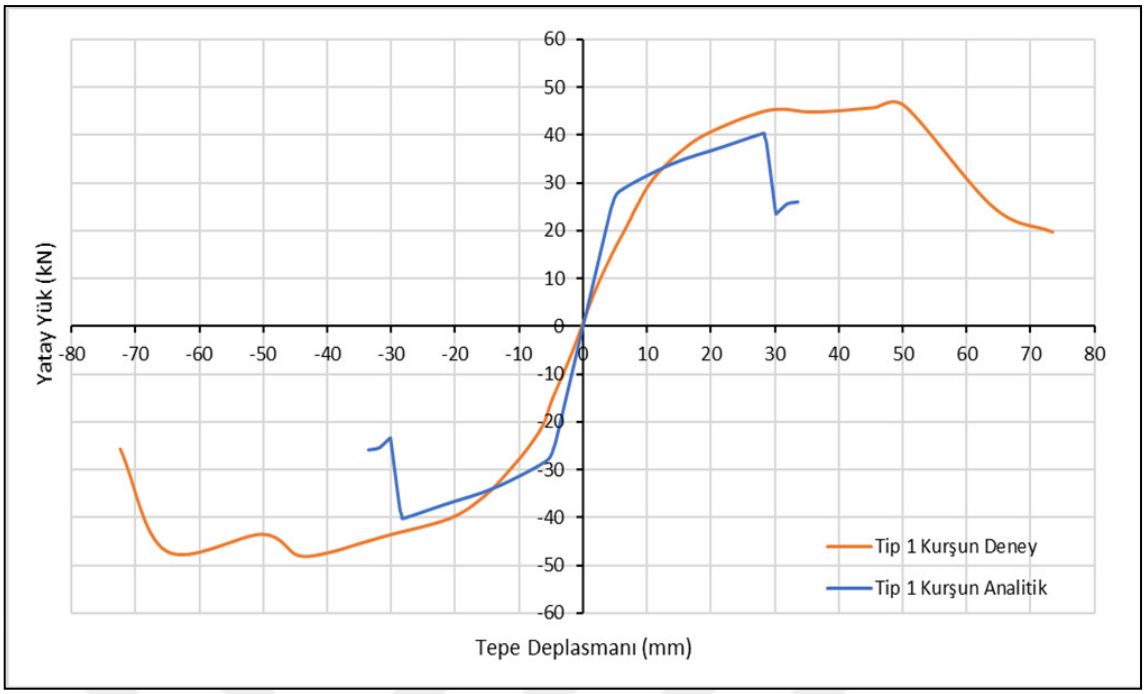
Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	4.286	24.186	11	1	0	0	0	12	0	0	0
2	4.609	25.517	10	2	0	0	0	12	0	0	0
3	5.776	28.229	8	4	0	0	0	12	0	0	0
4	13.776	33.795	8	4	0	0	0	8	4	0	0
5	21.776	37.372	8	4	0	0	0	8	2	2	0
6	28.211	40.237	8	3	1	0	0	8	0	4	0
7	28.356	39.511	8	3	1	0	0	8	0	4	0
8	28.356	39.511	8	3	1	0	0	8	0	4	0
9	28.647	38.367	8	2	2	0	0	8	0	4	0
10	30.104	23.579	8	2	1	1	0	8	0	4	0
11	30.154	23.397	8	2	0	2	0	8	0	4	0
12	31.633	25.225	8	2	0	2	0	8	0	4	0
13	32.208	25.64	8	2	0	2	0	8	0	4	0
14	33.568	25.909	8	1	1	2	0	8	0	4	0

Çizelge 5.8. T1-KRN deney numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi

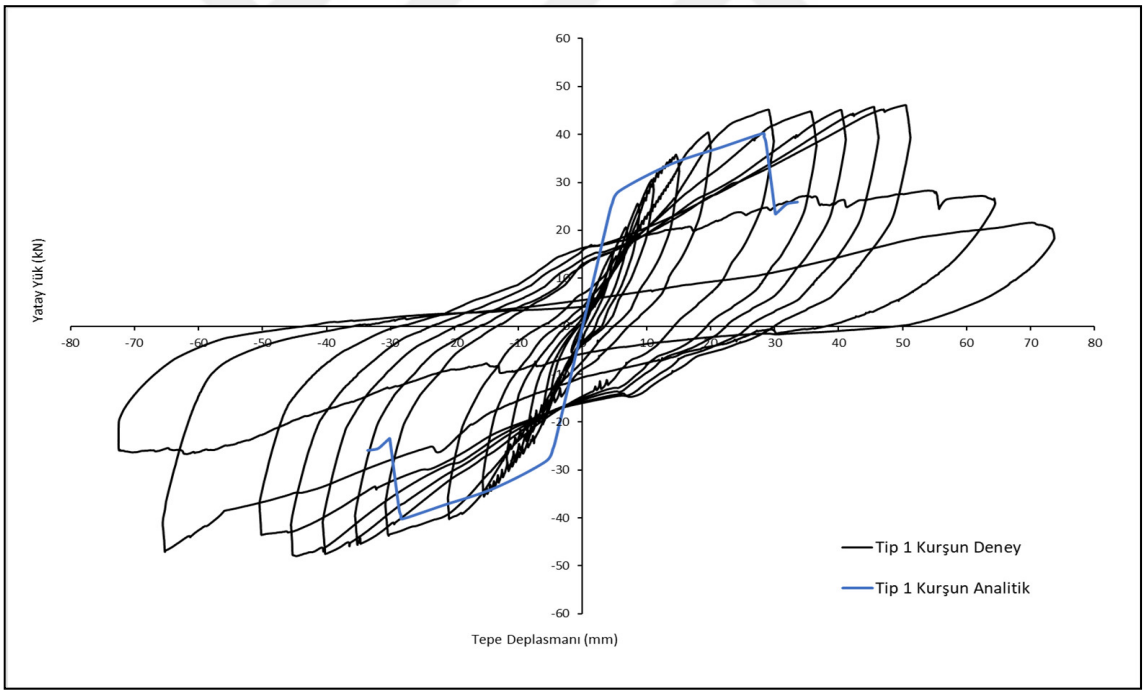




T1-KRN numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden zarf eğrisi Şekil 5.12'de ve histerezis eğrisi Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.12. T1-KRN deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)



Şekil 5.13. T1-KRN deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)

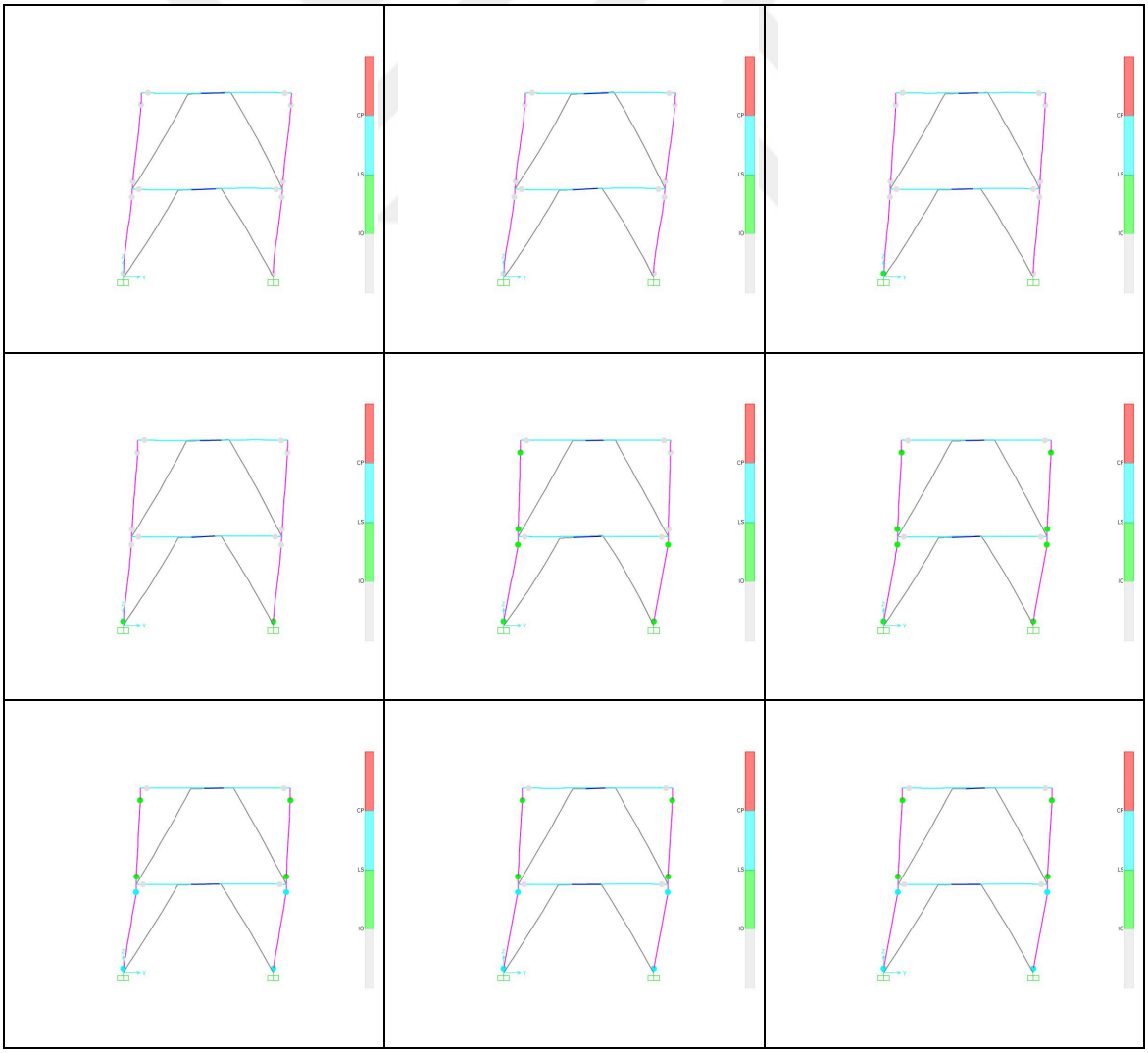
Çizelge 5.9'da T2-KBF deney numunesi için SAP2000'deki tablolardan alınan yatay yüke (kN) karşılık deplasman (mm) değerleri, plastik mafsal sayıları, ve bu plastik mafsalların performans durumları verilmiştir. Plastik mafsallar, üzerinde oluşan dönme miktarlarına göre derecelendirilmiştir. Çizelge5.10'da ise T2-KBF deney

numunesinde statik itme analizi sonucu adım adım oluşan plastik mafsallar ve gelişimleri gösterilmiştir.

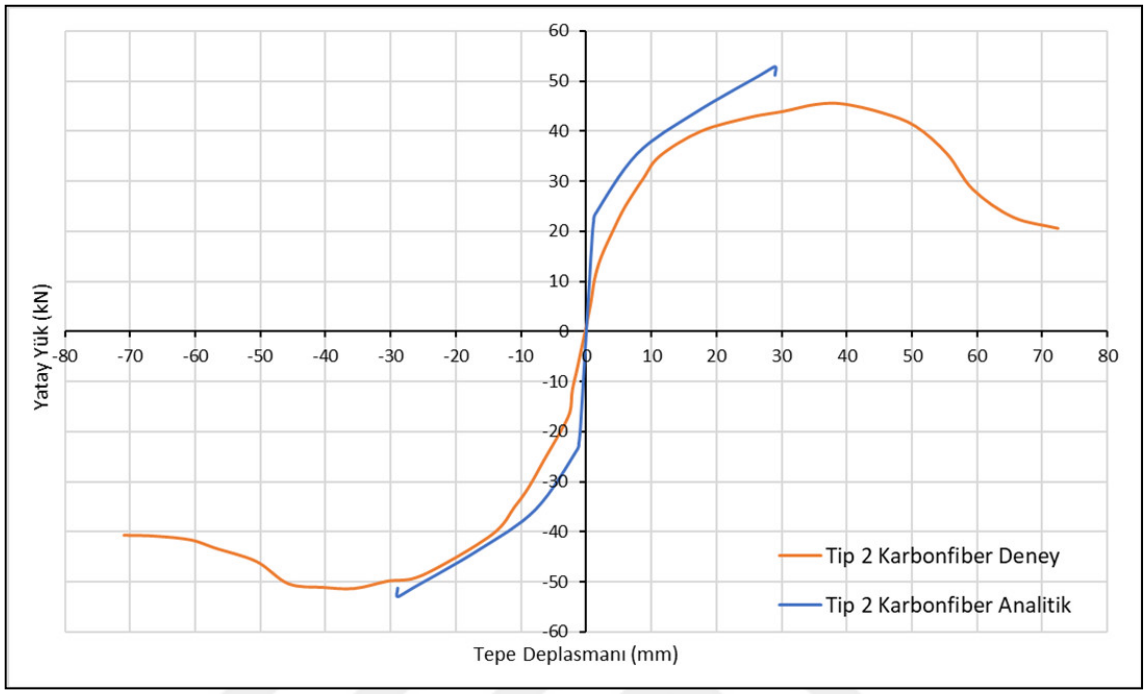
Çizelge 5.9. T2-KBF deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	0.851	18.046	11	1	0	0	0	12	0	0	0
2	1.021	20.911	10	2	0	0	0	12	0	0	0
3	1.14	22.144	9	3	0	0	0	11	1	0	0
4	1.359	23.434	8	4	0	0	0	10	2	0	0
5	7.798	35.461	4	8	0	0	0	6	6	0	0
6	16.663	43.621	3	9	0	0	0	4	8	0	0
7	26.579	51.069	2	10	0	0	0	4	4	4	0
8	28.961	52.849	2	9	1	0	0	4	4	4	0
9	28.978	51.134	2	9	1	0	0	4	4	4	0

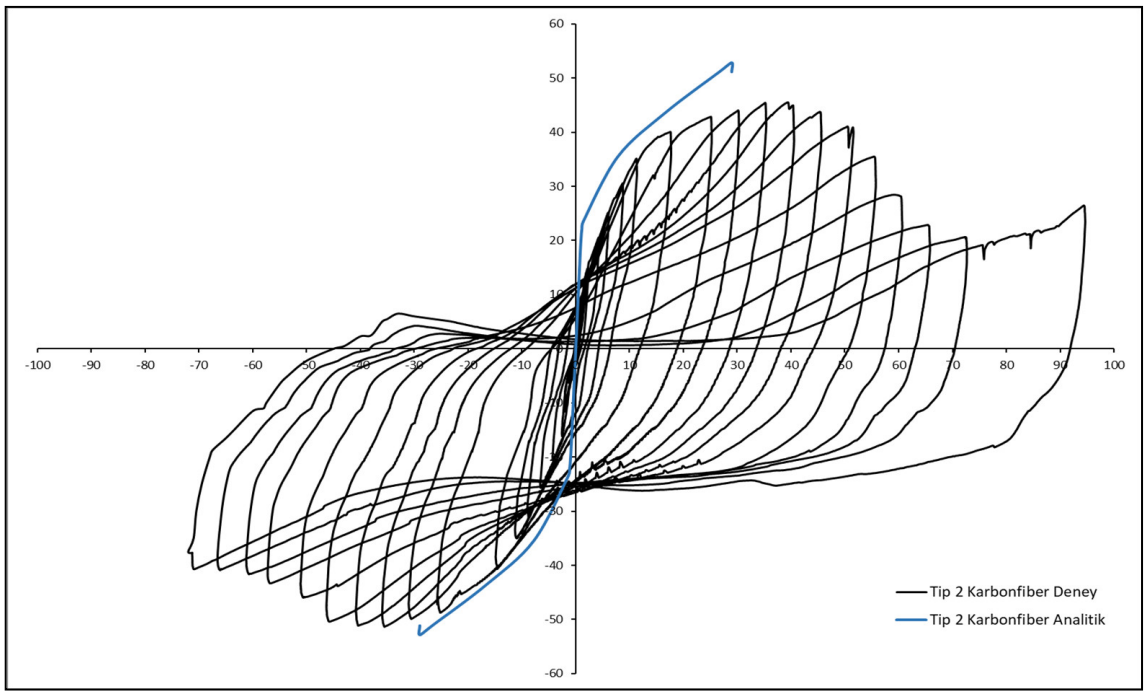
Çizelge 5.10. T2-KBF deney numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi



T2-KBF numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden zarf eğrisi Şekil 5.13'de ve histerezis eğrisi Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.13. T2-KBF deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)



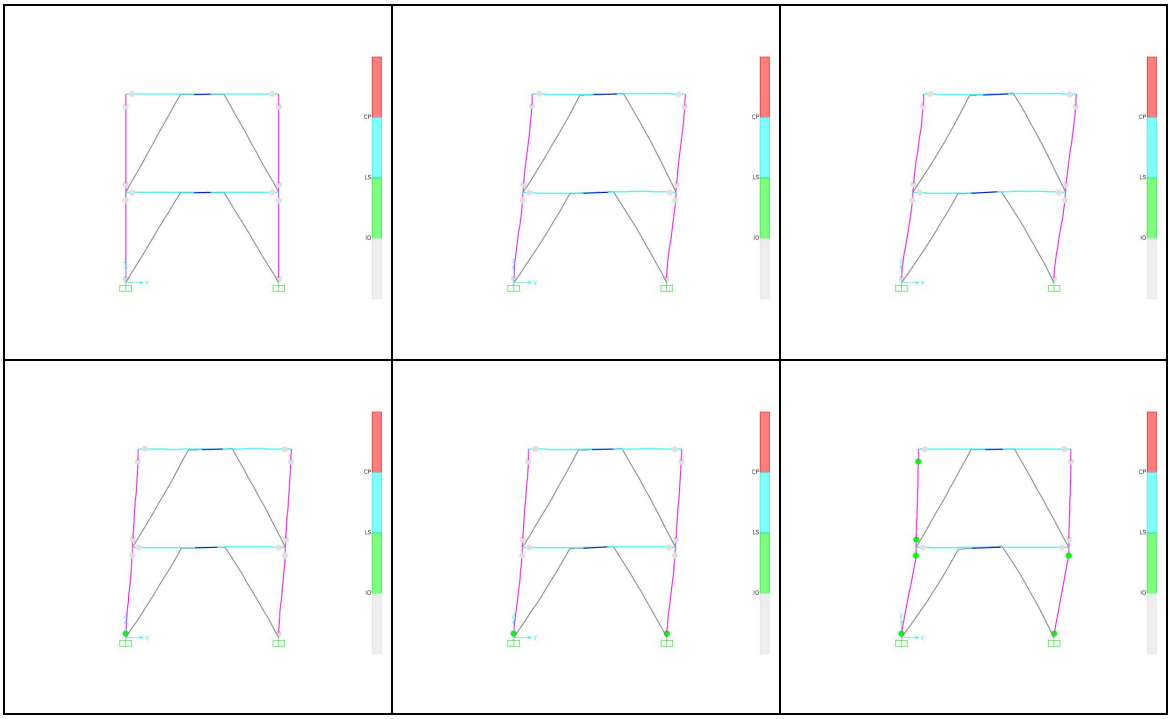
Şekil 5.14. T2-KBF deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)

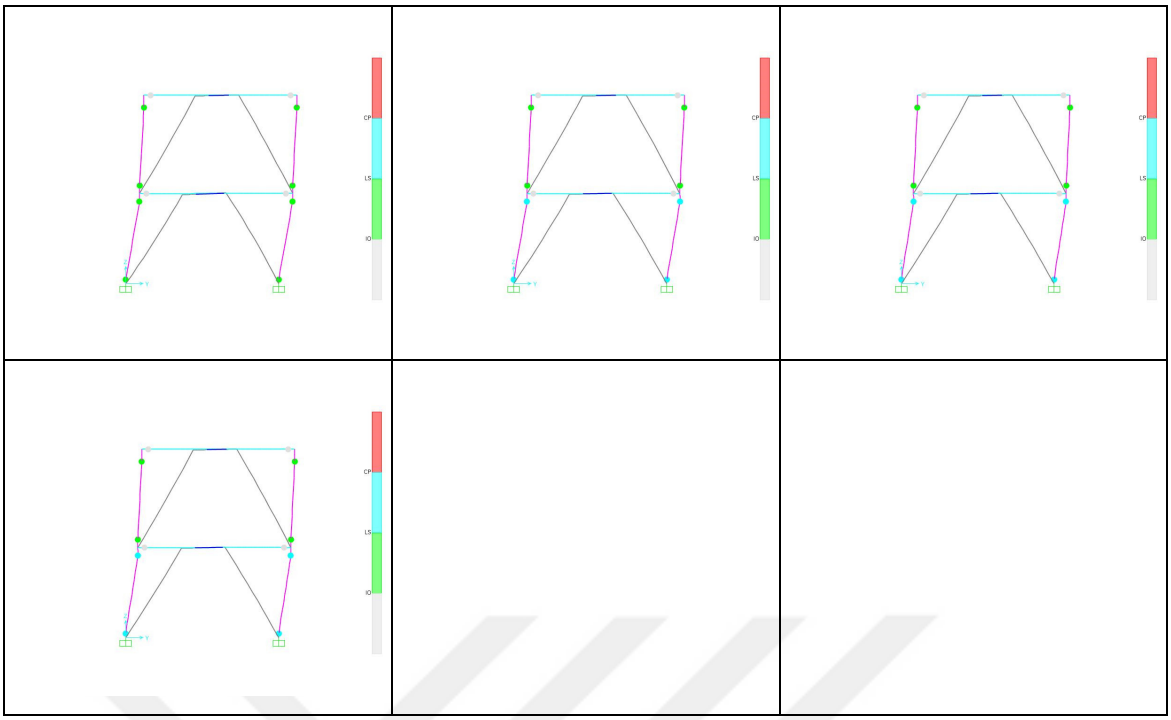
Çizelge 5.11'de T2-PRÇ deney numunesi için SAP2000'deki tablolardan alınan yatay yüke (kN) karşılık deplasman (mm) değerleri, plastik mafsal sayıları, ve bu plastik mafsalların performans durumları verilmiştir. Plastik mafsallar, üzerinde oluşan dönme miktarlarına göre derecelendirilmiştir. Çizelge 5.12'de ise T2-PRÇ deney numunesinde statik itme analizi sonucu adım adım oluşan plastik mafsallar ve gelişimleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. T2-PRÇ deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

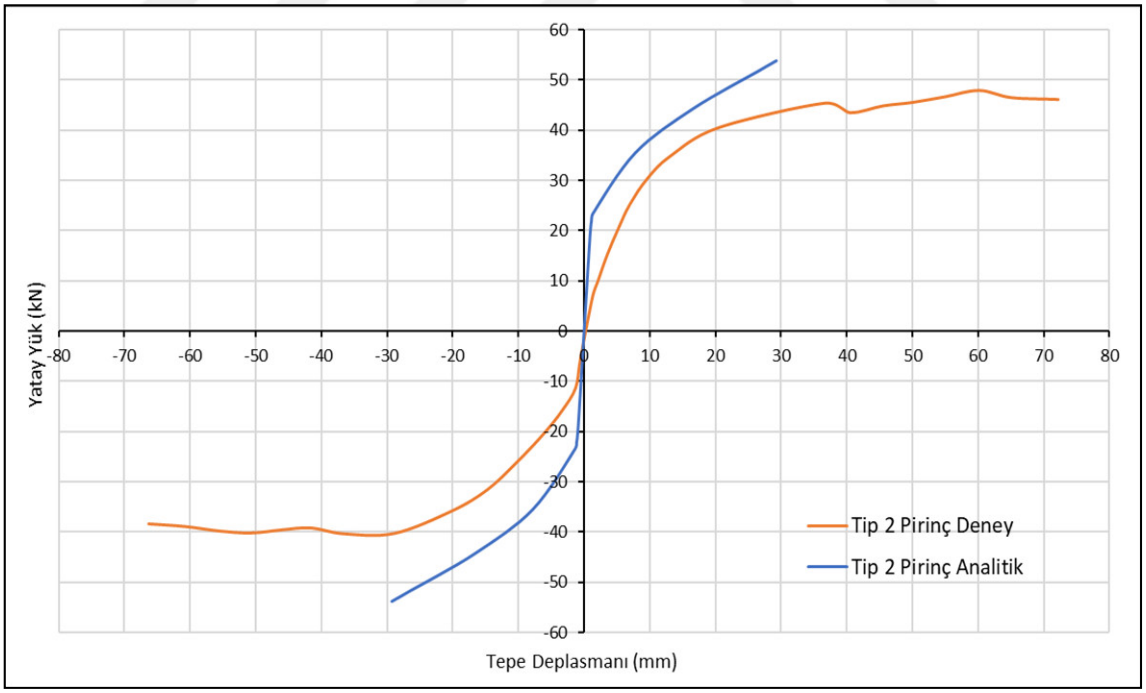
Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	0.851	18.046	11	1	0	0	0	12	0	0	0
2	1.021	20.911	10	2	0	0	0	12	0	0	0
3	1.14	22.144	9	3	0	0	0	11	1	0	0
4	1.359	23.434	8	4	0	0	0	10	2	0	0
5	7.79	35.472	4	8	0	0	0	6	6	0	0
6	16.648	44.316	3	9	0	0	0	4	8	0	0
7	26.76	51.929	2	10	0	0	0	4	4	4	0
8	29.268	53.806	2	9	1	0	0	4	4	4	0
9	29.268	53.806	2	9	1	0	0	4	4	4	0

Çizelge 5.12. T2-PRÇ deney numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi

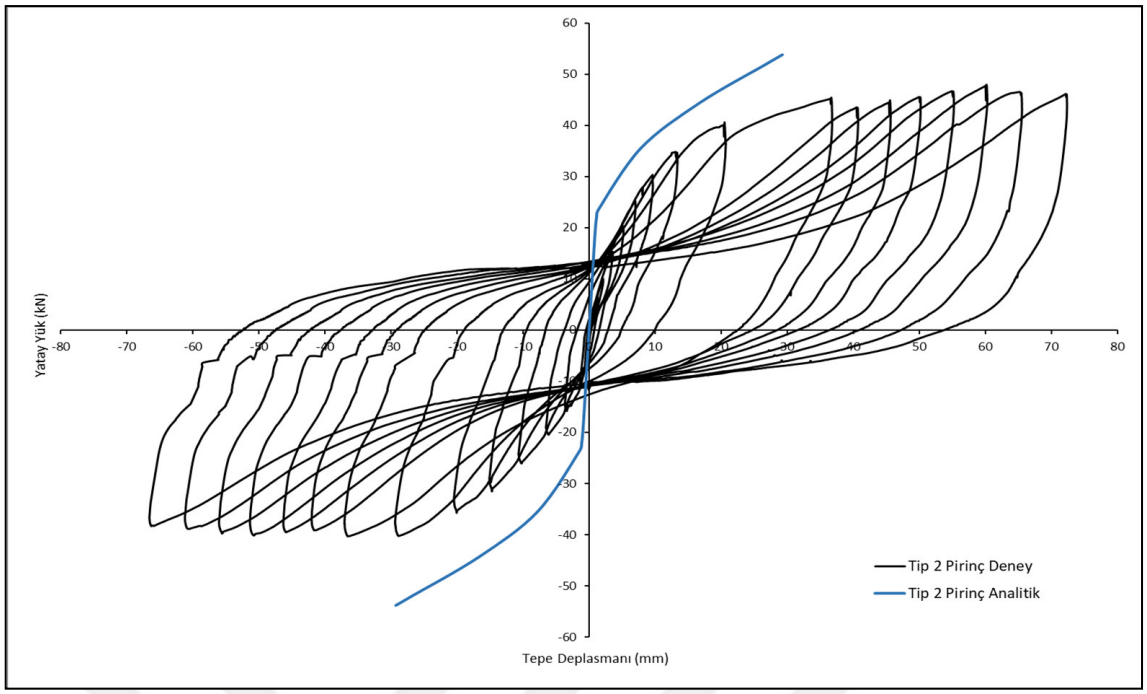




T2-PRÇ numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden zarf eğrisi Şekil 5.15'de ve histerezis eğrisi Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.15. T2-PRÇ deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)



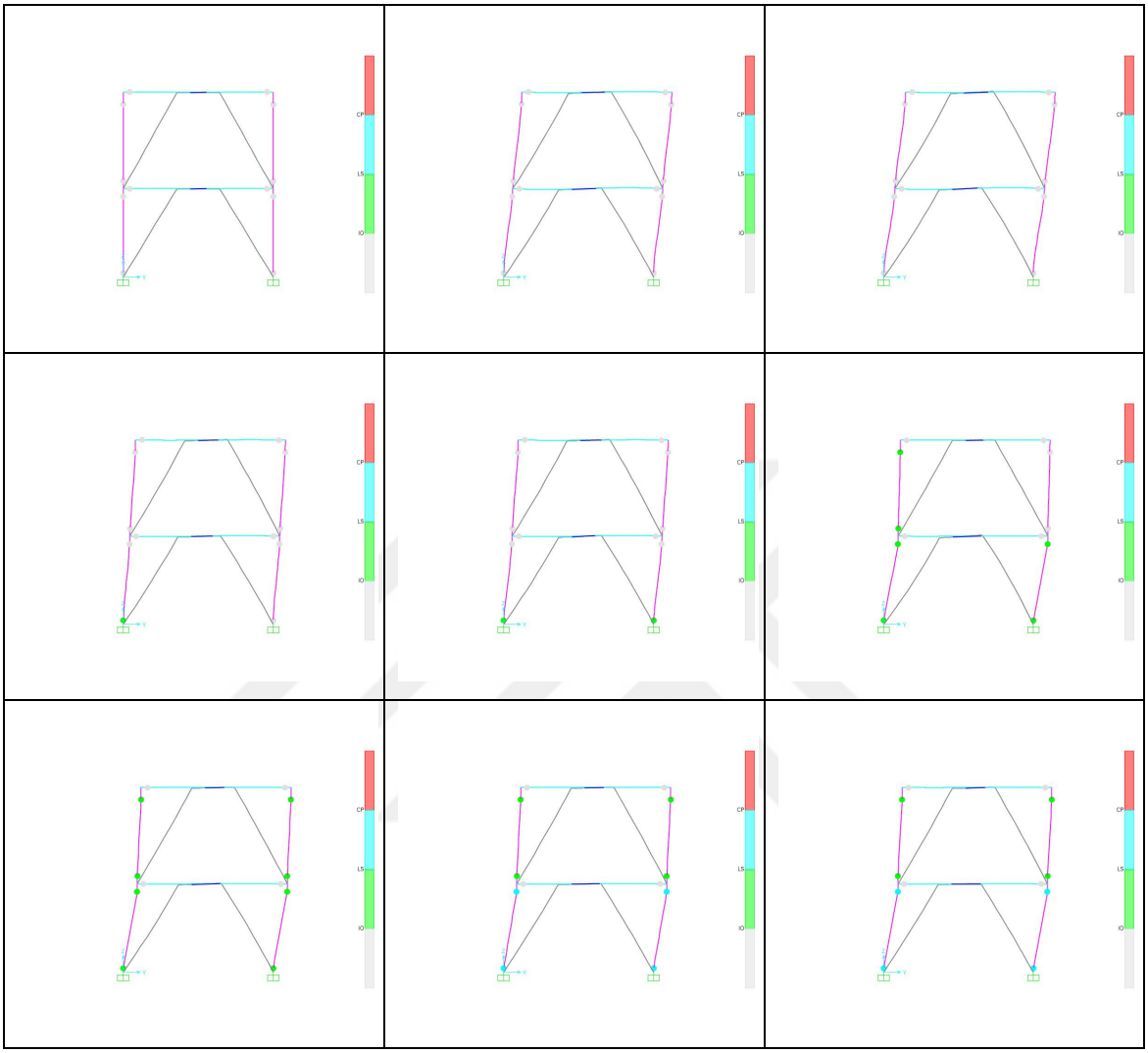
Şekil 5.16. T2-PRÇ deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)

Çizelge 5.13'de T2-KRN deney numunesi için SAP2000'deki tablolardan alınan yatay yüke (kN) karşılık deplasman (mm) değerleri, plastik mafsal sayıları, ve bu plastik mafsalların performans durumları verilmiştir. Plastik mafsallar, üzerinde oluşan dönme miktarlarına göre derecelendirilmiştir. Çizelge 5.14'de ise T2-KRN deney numunesinde statik itme analizi sonucu adım adım oluşan plastik mafsallar ve gelişimleri gösterilmiştir.

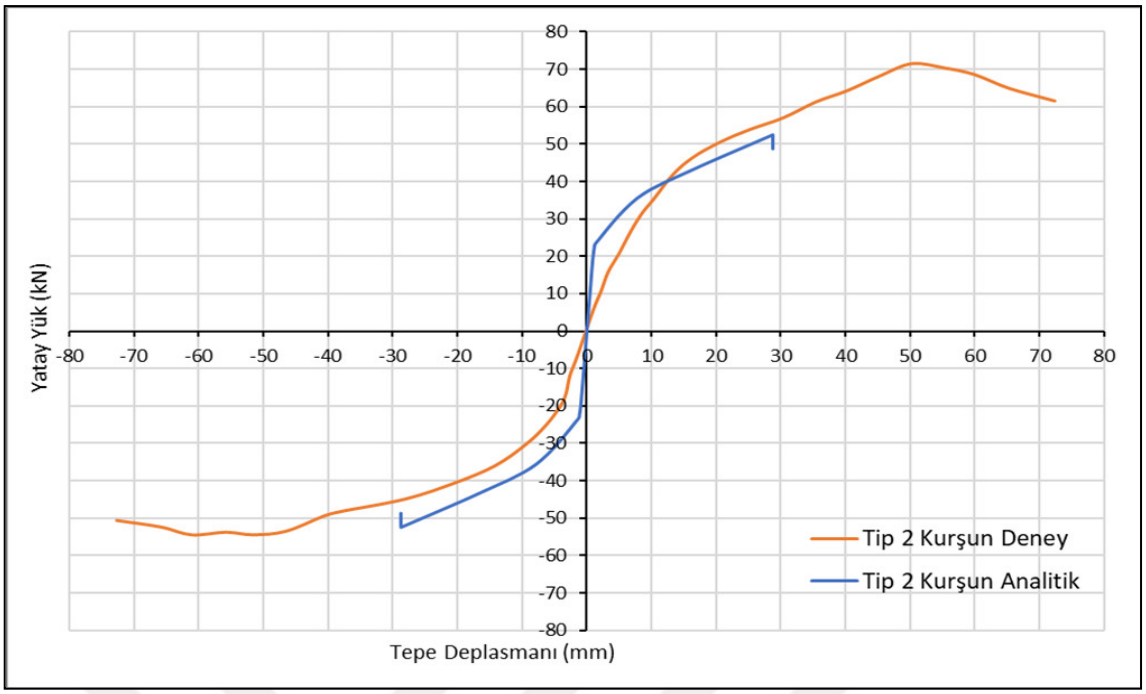
Çizelge 5.13. T2-KRN deney numunesinin statik itme analizinde oluşan mafsal sayıları ve hasar seviyeleri

Adım	Deplasman (mm)	T. K. Kuvveti (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0
1	0.851	18.046	11	1	0	0	0	12	0	0	0
2	1.021	20.911	10	2	0	0	0	12	0	0	0
3	1.14	22.144	9	3	0	0	0	11	1	0	0
4	1.359	23.434	8	4	0	0	0	10	2	0	0
5	7.808	35.467	4	8	0	0	0	6	6	0	0
6	16.654	43.254	3	9	0	0	0	4	8	0	0
7	26.487	50.64	2	10	0	0	0	4	4	4	0
8	28.807	52.371	2	9	1	0	0	4	4	4	0
9	28.807	52.371	2	9	1	0	0	4	4	4	0
10	28.823	50.718	2	9	1	0	0	4	4	4	0
11	28.831	48.615	2	8	2	0	0	4	4	4	0

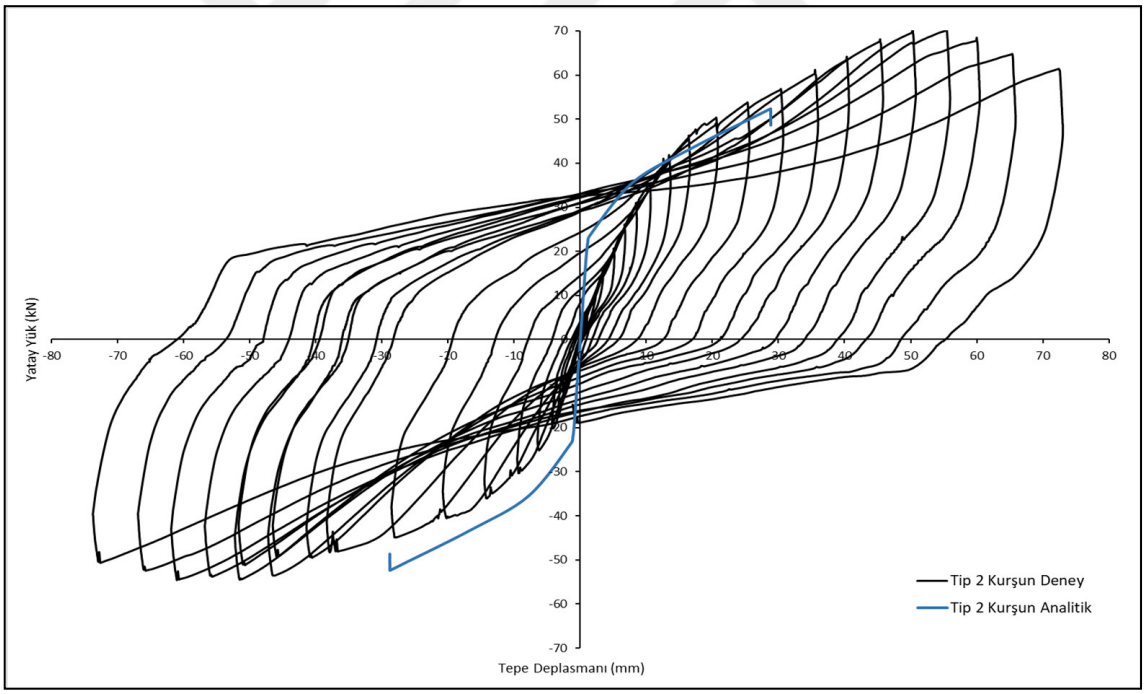
Çizelge 5.14. T2-KRN deney numunesinde statik itme analizinde her adımda oluşan plastik mafsalların gelişimi



T2-KRN numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması toplam yatay yük-tepe deplasmanı cinsinden zarf eğrisi Şekil 5.17'de ve histerezis eğrisi Şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.17. T2-KRN deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Zarf Eğrisi)



Şekil 5.18. T2-KRN deney numunesinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (Histerezis Eğrisi)

5.4. Statik İtme Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bilgisayarların gelişmesiyle birlikte hesaplarda işlem gücü artmış, çok fazla zaman alan matematiksel hesapların çözümü kolaylaşmıştır. Fakat çözülmesi istenen sorunun bilgisayara anlatılması başlı başına çok önemli bir iştir. Mühendislik alanında her ne kadar belli problemlere yönelik, özelleşmiş yazılımlar üretilmiş olsa da, analiz

yapan yazılımlardan gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmesi için modellemenin doğru yapılması önemlidir.

Statik itme analizinde de, analizi yapacak yazılıma analizi yapılacak olan numunenin özelliklerini tanıtan kabuller, materyal tanımları, kesitler, boyutlar, yükleme durumları ve plastik mafsal tanımlamaları gibi unsurların doğru tanıtılmış olması, gerçeğe yakın sonuçların elde edilmesi açısından önemlidir. Analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılırken, yazılımın çözümde dikkate almadığı detayların, tanımlanmayan, öngörülemeyen parametrelerin etkisinin her zaman var olabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenden dolayı gerçek deneylerin yapılarak davranış hakkında tecrübe edinilmesi ve bu tecrübenin, analizleri yapan programları geliştirme ve daha doğru analiz sonuçları elde etme adına modellemeye aktarılarak sonuçların karşılaştırılması önemlidir.

Bu çalışmada yürütülen statik analizde, deneyleri yapılan çerçeve numunelerin modelleri oluşturulurken, bu durumlara dikkat edilerek doğru sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. SAP2000'de modellenen 7 adet betonarme çerçeve + sönümleyicinin malzeme, boyut, kesit, yükleme, plastik mafsal gibi özellikleri gerçeğe en yakın şekilde analiz modellerine aktarılmasına özen gösterilmiştir. Analizden elde edilen veriler gerçek modeller ile karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır;

1. Analizlerde tanımlanan plastik mafsal kabulleri, deneylerdeki hasarları tam olarak karşılamamaktadır. Gerçek deneylerde önce eğilme (moment) mafsalı gibi çalışan, daha sonra kesitlerin yumuşamasıyla birlikte, çekme kuvvetleri oluşturan braketlerin de etkisiyle kesme mafsalına dönüşen plastik mafsal oluşumları gözlemlenmiştir.
2. Çatlamış kesit rijitliği bulunurken, kirişler için yönetmeliğimizde kiriş rijitliği 0,35 katsayısıyla çarpılmasına rağmen, FEMA356, FEMA273 gibi yabancı standartlarda 0,5 katsayısı kullanılmaktadır. Ayrıca bu tür farkların yanında çatlamış kesit rijitliğinin tüm deney boyunca aynı kaldığını kabul etmek de analiz ile gerçek deney arasında farklılıklar yaratabilmektedir.
3. Plastik mafsal boyutları analizlerde belirli bir eleman uzunluğu olarak kabul edilmektedir, deneylerde ise farklı uzunluklara yayılan mafsal oluşumları gözlemlenmiştir.
4. Deneylerde yığılı plastik davranışa (plastik mafsal kabulü) uymayan hasar mekanizmaları gözlemlenmiştir. Özellikle Tip 2 sönümleyicili çerçeve numunelerde, sönümleyici ile çerçeve etkileşimi nedeniyle 1. kat kolonlarında tüm kesitlere yayılan hasar (yayılı plastik davranış) söz konusu olmuştur.

5. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, öncelikli düzeltilmesi gereken kusur zayıf kolon-güçlü kiriş durumudur. Normalde ideal bir plastik mafsal oluşum sırası alt katlardaki kiriş uçlarında başlayıp, üst katlardaki kirişlere tırmanan bir plastik mafsal oluşum sırasıdır. Kolonlarda mafsalların mümkün olduğunca geç oluşması istenir. Kolonlarda oluşan mafsallar tek bir katta yoğunlaştığında yumuşak kat durumlarında meydana gelen "kat mekanizması" oluşmakta ve bina enerji tüketme kapasitesini kullanamadan göçmektedir. Yapılan analizlerde de gerek kolonların kirişlerden zayıf olması, gerekse de kolonlarda eksenel yükün bulunmaması nedeniyle mafsallaşma ilk olarak 1. kat kolonlarının alt ve üst uçlarında oluşmuş, statik analizde deneylerde olduğu gibi ulaşılması planlanan deplasmana (%4 göçme ötelenmesi kabul edilen 72 mm tepe deplasmanı) ulaşamadan kat mekanizması oluşmuş, bu nedenle analize son verilmiştir.
6. Statik analizde elde edilen kapasite eğrileri, deney zarf eğrileri ile karşılaştırıldığında statik analizin sonlandırıldığı deplasman değerine kadar zarf eğrileri ile analizden elde edilen kapasite eğrileri arasında %85-90'a varan benzerlikler görülmektedir. Sadece Tip 2 pirinç numunesinde kapasite eğrisi ile zarf eğrisi verileri arasında %20 civarında fark oluşmuştur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı sürtünme malzemelerine sahip iki farklı rotasyonel sürtünme sönümleyicinin çevrimsel davranışı ve bu rotasyonel sürtünme sönümleyicilerin deprem davranışı zayıf betonarme çerçevelerde kullanımı deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak, sönümleyicilerde sürtünme pedi olarak kullanılması planlanan malzemelerden üretilmiş sürtünme pedleri belirli cıvata sıkma torklarında, V tipi sönümleyici içerisinde çevrimsel testlere tabi tutulmuştur. Bu deneylerle seçilen sürtünme pedi malzemelerinin kullanıma uygunluğu ve belirli torklarda kayma yükleri ve enerji tüketimleri elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan sürtünme pedi malzemeleri arasında Teflon (PTFE), karbonfiber, pirinç ve kurşun plakalar yer almıştır. Sönümleyici numunelerine FEMA356'da bahsedilen protokollere göre çevrimsel yükleme testleri uygulanmıştır. Sürtünme pedi deneyleri için üretilen V sönümleyicinin ve betonarme çerçeveler için üretilen Tip 1 ve Tip 2 sönümleyici test sonuçları FEMA356'da verilen kabul kriterlerine göre incelenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır;

Pirinç, kurşun ve karbonfiber pedler, FEMA356 tarafından sunulan pasif enerji dağıtma cihazları için kabul kriterlerini karşılarken, Teflon (PTFE) pedler söz konusu olduğunda bazı kabul kriterleri karşılanmamaktadır. Pirinç, kurşun, ve karbonfiber sürtünme pedleri, yürütülen sürtünme pedi deneylerinde kararlı histerezis davranışı ve düşük mukavemet azalması sergilemiştir. Teflon (PTFE), yüksek basınç altında sürtünme katsayısı düşen bir malzemedir. Teflon (PTFE) sürtünme pedlerinin yüksek cıvata sıkma torklarında (80, 90, 100 Nm) elastik deformasyon yapması ve basınç altında sürtünme yüzeyinde meydana gelen cilalanma sonucu düşen sürtünme katsayısından dolayı istenen enerji dağıtım değerlerine ulaşılamamıştır.

Sürtünme pedi parametresine göre Tip 1 ve Tip 2 sönümleyicilerde kayma yükü ve enerji dağıtımı açısından elde edilen performans sıralaması pirinç>karbonfiber>kurşun şeklinde olmuştur. 100 Nm cıvata sıkma torkunda pirinç sürtünme pedinde 1000 kg, karbonfiber sürtünme pedinde 900 kg, kurşun sürtünme pedinde ise 850 kg ortalama kayma yükü değeri elde edilmiştir. Aşınma açısından performansa bakıldığında ise pirinç>kurşun>karbonfiber sıralaması görülmüştür. Pirinç sürtünme pedlerinde çok az miktarda abrazif aşınma oluşmaktadır. Kurşun sürtünme pedlerinde ise abrazif aşınma ile başlayıp ilerleyen çevrim sayısı ile birlikte

abrazif+adhezif aşınma davranışına dönüşen bir aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Kurşunda bulunan eşsiz bir özellik sayesinde aşınma olsa bile sürtünme pedinde çok fazla malzeme kaybı oluşmamaktadır. Ekstrüzyona uygun bir materyal olması sebebiyle aşınıp serbest kalan parçacıklar sürtünme yüzeyindeki basınç altında tekrar sürtünme pedi yüzeyine yapışmaktadır. Karbonfiber sürtünme pedinde ise, kompozitin matris fazını oluşturan karbon bazlı reçine bileşeni, sürtünme etkileri altında sürtünme arayüzünden çok ince toz halinde dökülerek sürtünme pedinde malzeme kaybına neden olmaktadır. Karbonfiber sürtünme pedinde oluşan malzeme kaybı, birçok çevrimden sonra bile sürtünme yüzeyine etkiyen basıncı düşürmeyecek kadar azdır. Yapılarda karbonfiber pedli sönümleyici kullanılacaksa, depremden sonra sönümleyicinin tedbir amaçlı kontrolü yapılarak, gerekiyorsa sıkıştırma cıvatalarına tekrar belirli torklarda öngerme yapılmalı ve/veya pedlerde çalışmayı olumsuz etkileyecek aşınma, deformasyon varsa yenisi ile değiştirilmelidir.

Sürtünme sönümleyiciler bireysel testlerde FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine uygun performans sergilemiştir. Kuvvet-deplasman grafiklerinden hareketle kayma yükü, efektif rijitlik (k_{eff}), efektif sönüm (b_{eff}), çevrimsel enerji değerleri hesaplanarak histeretik davranışlarının son derece düzenli ve tekrarlanabilir olduğu görülmüştür. Tip 1 ve Tip 2 rotasyonel sürtünme sönümleyiciler, testler boyunca kayma yükünde kayda değer değişiklik göstermemiş; kayma yükü, efektif rijitlik (k_{eff}), efektif sönüm (b_{eff}), çevrimsel enerji değerleri FEMA356 sönümleyici kabul kriterlerine uygun şekilde ±%15 ortalama değer sınırları içerisinde kalmıştır. Elde edilen ortalama değerler, karbonfiber ve pirinç sürtünme pedli sönümleyicilerde ±%5 sınırları içerisinde kalırken, son çevrimlere doğru kurşun sürtünme pedine ait ortalama değerler ±%10 aralığında değişmiştir.

3 farklı sürtünme pedi ile üretilen 2 farklı tip rotasyonel sürtünme sönümleyicinin neredeyse mükemmel elastik - mükemmel plastik bir şekilde davrandıkları gösterilmiştir. Bu sonuçlar ışığında kurşun, pirinç ve karbonfiber sürtünme yüzeyleri üzerinde çelik bulunan sürtünme sönümleyicilerin enerji dağıtıcı olarak verimlilik ve modelleme kolaylığı açısından önemli avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca düşük malzeme ve imalat maliyetiyle bu sönümleyiciler sismik tasarımda ve yapıların rehabilitasyonunda enerji dağıtımı için alternatif bir seçim olarak büyük bir potansiyel sergilemektedir.

Diğer bazı sönümleyicilerin aksine, sürtünme sönümleyicileri kayma yükünden küçük yükler etkidiğinde devreye girmemektedir. Bu koşullar altında sönümleyiciler

daha çok, eş merkez braketli çerçevelerdeki braket destekler gibi davranmaktadır. Bu durum betonarme çerçeve deneylerinin ilk çevrimlerinde gözlemlenmiştir.

Enerji tüketimi açısından chevron (ters V) şeklindeki braket sistemi üzerinde monte edilen Tip 2 sönümleyicilerin, diyagonal braket üzerindeki Tip 1 sönümleyicilerden daha verimli çalıştığı, çerçevenin enerji tüketimine daha fazla katkı sağladığı görülmüştür. Tüketilen enerji değerlerine bakıldığında, Tip 2 sönümleyicilerden deney sonunda en az enerji tüketimi gösteren numunede (T2-PRÇ) referans çerçeveden % 170.1 daha fazla enerji tüketilirken, Tip 1 sönümleyicili çerçevede (T1-KBF) referans çerçeveden % 80.7 daha fazla enerji tüketmiştir. Maksimum dayanım ve deney sonu dayanımlara bakıldığında ise Tip 2 sönümleyicilerde chevron braketlerin daha verimli çalışması nedeniyle deney sonu dayanımları yüksektir. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerde diyagonal braketin bir handikapı olarak ilerleyen çevrimlerde kesme hasarı oluşması nedeniyle deney sonu dayanımları düşük kalmıştır. Tip 1 sönümleyicili çerçevelerde deney sonu dayanım maksimum dayanıma göre % 25.89-53.17 aralığında düşerken, Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde %3.76-48.96 aralığında bir düşüş yaşanmıştır. Tip 2 sönümleyicili çerçevelerden T2-KRN ve T2-PRÇ numuneleri deney sonunda dayanımlarının büyük kısmını korumaktadır. T2-KBF numunesinde kat mekanizması ve köşebent ankrajının betondan sıyrılması nedeniyle deney sonu dayanım çekme yönünde % 48.96 düşmüştür.

Deneylerde çerçevelerin elastik kaldığı tepe deplasmanlarda da, çalışmada kullanılan sürtünme sönümleyicilerin sağladığı ek sönümleme ile betonarme çerçeve numunelerde büyük miktarda kinetik enerji dağıtılabilmiştir. Akma çevrimine kadar en az enerji tüketim değeri veren Tip 1 sönümleyicili çerçevede (T1-KRN), referans çerçeveden % 655.5 daha fazla enerji tüketilirken, en az enerji tüketen Tip 2 sönümleyicili çerçevede (T2-KBF) %793.3 daha fazla enerji tüketimi olmuştur. Böylece elastik bölgede yapıya gelen enerjinin daha büyük bir kısmının dağıtılması sağlandığından, yapısal sünekliğe ihtiyaç duyulmadığı söylenebilir. Akma çevrimine kadar tüketilen enerjilerin oranı, deney sonu tüketilen enerji tüketim oranlarına göre yüksektir, buna göre sönümleyicilerin elastik bölgede daha etkili çalıştığı görülmüştür.

Betonarme çerçeve deneylerinde, herhangi bir rehabilitasyon yöntemi uygulanmamış referans numunede (RN) histerezis döngülerinin çok dar olduğu ve rijitliğinin oldukça çabuk düştüğü görülmüştür. Bu durum, referans numunede enerji dağıtma kapasitesinin düşük olduğuna işaret etmektedir. Bu şartlarda, yapıda daha büyük yer değiştirmeler beklenmelidir. Tasarımı yapılan sönümleyicilerle rehabilite

edilmiş betonarme çerçeve numunelerde ise histerezis eğri alanlarının önemli ölçüde büyüdüğü, rijitliğin de referans numuneye nispeten daha yavaş düştüğü görülmüştür. Dolayısıyla bu iyileşme, kümülatif enerji tüketiminde daha fazla enerji tüketimi olarak kendini göstermektedir.

Genel olarak, üretilen rotasyonel sürtünme sönümleyiciler betonarme çerçevelerin başlangıç rijitliğini %36.4 - %200.2 aralığında artırırken, elastik bölgede daha etkili olması beklenen sönümleyicilerin akma çevrimine kadar %655.5 - %2000.7 aralığında enerji tüketimini artırdığı, göçme öncesini temsil eden son çevrimde ise %80.7 - %479.8 aralığında toplam enerji tüketimini artırdığı deneysel çalışma sonucunda tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında ilave edilen sönümleyicilerle, çerçevelerin toplam rijitliğini fazla artırmadan enerji tüketimini kayda değer bir oranda artırılabildiği sonucuna varılmıştır.

Referans çerçevede çatlaklar kolon-kiriş birleşim bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Bu nedenle hasar mekanizmasının "yığılı plastik davranış modeli"ne daha uygun olduğu söylenebilir. Sönümleyici kullanılan numunelerde (özellikle chevron braketli, Tip 2 sönümleyicili çerçevelerde) ise sönümleyici + braket sistemlerle etkileşime giren çerçevelerde çatlaklar kolon ve kirişler üzerine yayılmış olduğundan "yayılı plastik davranış modeli"ne uygun bir hasar mekanizmasına daha yakın bir davranış gösterdiği değerlendirilmektedir.

Deneylerde, sönümleyicili betonarme çerçevelerin histeretik davranışının deplasman miktarına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Sönümleyicili betonarme çerçevelerin ilk çevrimlerinde, sönümleyici kayma yükünü geçmeyen düşük yükler sönümleyicilerin çalışmamasına veya daha az çalışmasına neden olmuştur, bu durumda enerji tüketiminde betonarme çerçeve daha etkili olmuştur. Histerezis eğrileri incelendiğinde, ilk çevrim eğrilerinin şekli referans numune çevrimlerine benzerken, son çevrimlerde betonarme çerçevelerin kapasite kaybı nedeniyle enerji tüketiminin azalması ve sönümleyicilerin enerji tüketiminde daha etkili olmasıyla eğrilerin dikdörtgene benzer bir şekil aldığı gözlemlenmiştir.

Sönümleyicilerle rehabilitasyonu yapılan betonarme çerçevelerin deneylerinde, "Sınırlı Güvenlik" performans aralığındayken, braket + sönümleyici elemanlarda oluşan çekme gerilmelerinin etkisiyle temel - kolon birleşimlerinde kesme hasarı oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle diyagonal braket + sönümleyici eleman kombinasyonuna sahip Tip 1 sönümleyicili numunelerin temel - kolon birleşimlerinde plastik mafsalların gelişmesiyle bağlantı köşebentlerinin bağlandığı kolon kesiti zayıflamakta ve bu bölge

braket + sönümleyici elemandan etkiyen çekme gerilmeleri altında kesme hasarına uğramaktadır. Bu nedenle sönümleyicilerle rehabilitasyonu yapılacak betonarme yapılarda "Sınırlı Güvenlik" performans aralığı hedefleniyorsa, bağlantı köşebentlerinin bulunduğu kolon kesitleri kesmeye karşı güçlendirilmelidir. Bu bölgelerin karbonfiber veya farklı lif özelliklerine sahip FRP sargı ile güçlendirilmesi önerilmektedir.

Deneyleri yapılan sürtünme sönümleyicilerin ilave edildiği betonarme çerçeveler zayıf kolon - güçlü kiriş kusuru içermektedir, dolayısıyla zayıf deprem performansına sahiptir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, öncelikli düzeltilmesi gereken kusur zayıf kolon-güçlü kiriş durumudur. FEMA356'da da pasif enerji dağıtan sistemlerin uygulanmasından önce, varsa çerçeve sistemdeki ciddi kusurların giderilmesi gerektiği belirtilmektedir. Normalde bina çerçevelerinde ideal bir plastik mafsal oluşum sırası alt katlardaki kiriş uçlarında başlayıp, üst katlardaki kirişlere tırmanan bir plastik mafsal oluşum sırasıdır. Kolonlarda mafsalların mümkün olduğunca geç oluşması istenir. Kolonlarda oluşan mafsallar tek bir katta yoğunlaştığında yumuşak kat durumlarında meydana gelen "kat mekanizması" oluşmakta ve bina enerji tüketme kapasitesini kullanamadan göçmektedir. Yapılan analizlerde de gerek kolonların kirişlerden zayıf olması, gerekse de kolonlarda eksenel yükün bulunmaması nedeniyle mafsallaşma ilk olarak 1. kat kolonlarının alt ve üst uçlarında oluşmuş, statik analizde deneylerde olduğu gibi ulaşılması planlanan deplasmana (%4 göçme ötelenmesi kabul edilen 72 mm tepe deplasmanı) ulaşamadan kat mekanizması oluşmuş, bu nedenle analize 28-30 mm tepe deplasmanında son verilmiştir.

Çalışmadaki betonarme çerçevelerin rehabilitasyonunda her iki katta da aynı kayma yüküne sahip sönümleyiciler kullanılmıştır. Betonarme çerçevenin akma sonrasında 1. kat kolonlarında oluşan yumuşama nedeniyle çerçevenin deplasman talebi büyük oranda 1. katta karşılanmakta, 2. kat daha rijit kaldığı için deplasman yapmamaktadır. Yapılabilecek bir optimizasyon çalışması sonrası 2. kat sönümleyicisinin kayma yükünün değiştirilmesi, farklı bir braket sistemi üzerinde açılı çalışan bir sönümleyici, sönümleyici ünite sayısının değiştirilmesi vb. gibi çözümlerle ileri deplasman değerlerinde hem "kat mekanizması" gibi istenmeyen durumların bertaraf edilebileceği, hem de daha verimli bir sonuç elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla sönümleyicilerle rehabilitasyon öncesi, optimizasyona yönelik analiz çalışmalarının yürütülmesi ve buna göre rehabilitasyon yapılması önemlidir.

6.2. Öneriler

Sönümleyicilerle ilgili birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, betonarme çerçevelerde sönümleyici kullanımı ile ilgili yeterince deneysel çalışma bulunmamaktadır. Sönümleyicilerin betonarme çerçevelerde kullanımı üzerine deneysel ve/veya analitik çalışma yapacak araştırmacılara, bu çalışmada edinilen bilgi ve tecrübelere dayanılarak aşağıdaki öneri ve tavsiyeler verilebilir;

Genel olarak pasif enerji dağıtım sistemleri binadaki deplasmanı azaltmayı amaçlayan rehabilitasyon yöntemleridir, dolayısıyla yatay yük taşıma kapasitesine katkı sağladıkları söylenebilir. Ancak bu kapasiteyi iyileştirirken betonarme kesitlerde oluşabilecek kesme kuvvetleri hesaplanmalı, kesitler yetersiz ise kesme kapasitesini artıracak önlemler (FRP sargı vb. yöntemlerle) alınmalıdır.

Özellikle betonarme çerçeveli binalarda sönümleyici-çerçeve etkileşimi araştırılması gereken bir konudur. Deneysel çalışmalarda çerçevelerde oluşan hasar ve çatlaklardan, sönümleyicilerin çerçevede meydana getirdiği öngörülemeyen zorlamalar görülebilmektedir. Eğer bu konu üzerinde analitik çalışılacaksa, çubuk eleman hesabı yapan yazılımlar yerine betonarme kolon ve kirişlerin sonlu eleman olarak modellenebileceği (ABAQUS, ANSYS vb.) yazılımların tercih edilmesi lokal hasar ve zorlanmaların gerçeğe yakın bir şekilde görülebilmesi açısından önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında teknik ekipman yetersizliği nedeniyle deney çerçevelerine düşey yük (kolon normal kuvveti) verilememiştir, bu nedenle deneylerde kolonların kapasitesi olması gerekenden daha düşük seviyelerdedir. Gerçek davranışa daha yakın sonuçların elde edilebilmesi açısından, kolonlara normal kuvvetin verilebildiği bir deney düzeneğinde çalışılması tavsiye edilmektedir.

Her ne kadar sürtünme sönümleyicilerin frekans ve hızdan bağımsız özellikleri olduğu bilinse de, literatürde tüm sönümleyicilerin etkinliğini karşılaştırmak amacıyla dinamik analiz yöntemleri tercih edilmektedir. Özellikle, farklı deprem kayıtlarıyla yapılan zaman tanım alanında analizler sonucu, sönümleyicili binada meydana gelen yapısal tepkilerin karşılaştırılması üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapılabilir.

Sönümleyici deneylerinde betonarme ve çelik çerçeve yerine, üç boyutlu yapısal tepkileri gözlemlemek için daha büyük ölçekli ve çok kat sayılı, üç boyutlu binaların sarsma tablasında deprem simülasyonu deneylerinin yapılması literatüre katkı açısından daha önemlidir, bu yönde çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Ülkemiz gibi depremselliği yüksek coğrafyalarda, yapısal sönümleyici ve izolatör cihazlarının kullanımı her geçen gün önem kazanmaktadır. Kullanımdaki

sönümleyici ve izolatörler, patentli ve yabancı menşeili sistemler olduğundan yüksek maliyetli, ithal cihazlardır. Ülkemizde bu tür sistemlerin üretim ve uygulamasını yapan şirketler bulunmasına rağmen yeterli sayıda değildir. Gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte edinilen yapısal davranış bilgilerinin ışığında, ülkemize ait patentli yeni tip izolatör ve sönümleyicilerin tasarlanması ve mevcut cihazların geliştirilmesi için Ar-Ge çalışmalarına ağırlık verilmesi önerilmektedir.

Sönümleyicilerin çerçeve sistem içinde rijitliği, sayısı ve konumu hakkında bazı optimizasyon çalışmaları yapılmış olmasına rağmen geliştirmeye açık bir alandır, bu konuda özellikle yapay sinir ağları ile yeni algoritmalar kullanılarak optimum çözümlere yönelik çalışmalar yapılabilir.

Ülkemiz yapı yönetmeliği TBDY (2018)'deki Bölüm 14'de izolatör sistemleri ve izolatörlü bina tasarım hesapları hakkında esaslar belirlenmiş olsa da, sönümleyici cihazlar hakkında herhangi bir kabul kriteri ve hesap esası belirlenmemiştir. Bir sonraki yapı yönetmeliği versiyonunda sönümleyici cihazlar ile ilgili hesap, tasarım ve kabul kriterlerinin belirlenmesi adına ülkemizde araştırmaların yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

AFAD, A. v. A. D. Y. B., 1996, Deprem bölgeleri haritası, https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi: [20.11.2022].

AFAD, A. v. A. D. Y. B., 2018, Türkiye Deprem Tehlike Haritası https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi: [20.11.2022].

Aiken, I. D., Kelly, J. M. ve Pall, A. S., 1988, Seismic response of a nine-story steel frame with friction damped cross-bracing.

Aiken, I. D. ve Kelly, J. M., 1990, Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing systems for multistory structures, *University of California, Berkeley*, *Earthquake Engineering Research Center*.

Aiken, I. D., Nims, D. K. ve Kelly, J. M., 1992, Comparative study of four passive energy dissipation systems, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 25 (3), 175-192.

Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S. ve Kelly, J. M., 1993, Testing of passive energy dissipation systems, *Earthquake Spectra*, 9 (3), 335-370.

Akbay, Z. ve Aktan, H., 1990, Intelligent energy dissipation devices, *Proc. of the Fourth*.

Akın, A., 2011, Ön üretimli Beton Panellerle Güçlendirilmiş Dolgulu Betonarme Çerçevelerin Deprem Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, Türkiye.

Aksoylu, C., 2018, Önüretimli Çapraz Beton Panellerle Güçlendirilmiş Dolgulu Betonarme Çerçevelerin Deprem Davranışının Deneysel Ve Analitik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, Türkiye, 306.

Alehashem, S. M. S., Keyhani, A. ve Pourmohammad, H., 2008, Behavior and Performance of Structures Equipped With ADAS & TADAS Dampers (a Comparison with Conventional Structures).

Anonim, 2015, Türkiye nüfus yoğunluğu haritası, http://cografyaharita.com/haritalarim/4aturkiye-2015-nufus-yogunlugu-haritasi.png: [20.11.2022].

Anoushehei, M., Daneshjoo, F., Mahboubi, S. ve Hashemi, M. H., 2017, Empirical Evaluation of Cyclic Behavior of Rotational Friction Dampers with Different Metal Pads, *Scientia Iranica*, 0 (0), 0-0.

Arslan, M. H., 2007, Kolonları Çekme Kırılması Gösteren Sünek Olmayan Betonarme Çerçevelerin Dış Perde Duvar Uygulaması ile Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, Türkiye.

Arslan, M. H. ve Korkmaz, H. H., 2007, What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey?, *Engineering Failure Analysis*, 14 (1), 1-22.

ASCE/SEI-41, 2017, Seismic rehabilitation of existing buildings

Atam, E., 2018, Friction damper-based passive vibration control assessment for seismically-excited buildings through comparison with active control: A case study, *IEEE access*, 7, 4664-4675.

ATC40, 1996, Seismic Evaluation and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings, *Applied Technology Council*

Baktash, P. ve Marsh, C., 1987, Damped Moment-Resistant Braced Frames - a Comparative-Study, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 14 (3), 342-346.

Balık, F. S., 2012, Betonarme Dolgu Duvarla Güçlendirilmiş Deprem Davranışı Yetersiz Betonarme Çerçevelerin Davranışına Pencere Boşluklarının Etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Barmo, A., Mualla, I. H. ve Hasan, H. T., 2014, The behavior of multi-story buildings seismically isolated system hybrid isolation (friction, rubber and with the addition of rotational friction dampers), *Open Journal of Earthquake Research*, 4 (01), 1.

Barrett, R. T., 1990, Fastener Design Manual, *NASA*, *Cleveland,Ohio, USA*.

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.

Blau, P., 1992, Static and kinetic friction coefficients for selected materials, *ASM handbook*, 18, 70-75.

Celep, Z., 2013, Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, *İstanbul*, Beta Yayınları, p.

Chang, K., Soong, T., Oh, S.-T. ve Lai, M., 1995, Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers, *Journal of Structural Engineering*, 121 (10), 1418-1426.

Colajanni, P. ve Papia, M., 1995, Seismic response of braced frames with and without friction dampers, *Engineering structures*, 17 (2), 129-140.

Colajanni, P. ve Papia, M., 1997, Hysteretic behavior characterization of friction-damped braced frames, *Journal of Structural Engineering*, 123 (8), 1020-1028.

Constantinou, M., Reinhorn, A., Mokha, A. ve Watson, R., 1991, Displacement control device for base-isolated bridges, *Earthquake Spectra*, 7 (2), 179-200.

Constantinou, M., Kartoum, A., Reinhorn, A. ve Bradford, P., 1992, Sliding isolation system for bridges: Experimental study, *Earthquake Spectra*, 8 (3), 321-344.

Constantinou, M. ve Symans, M., 1993a, Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers, *The Structural Design of Tall Buildings*, 2 (2), 93-132.

Constantinou, M. C., Caccese, J. ve Harris, H. G., 1987, Frictional characteristics of Teflon–steel interfaces under dynamic conditions, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 15 (6), 751-759.

Constantinou, M. C. ve Symans, M. D., 1993b, Seismic response of structures with supplemental damping, *The Structural Design of Tall Buildings*, 2 (2), 77-92.

Constantinou, M. C., Soong, T. T. ve Dargush, G. F., 1998, Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit.

CSI, C. S., Inc., 2016, CSI SAP2000 V19 Analysis Reference Manual, *Berkeley, California, USA*, p.

DAMPTECH, 2023, Damptech Earthquake Protection, https://www.damptech.com/:

Davim, J. P., 2000, An experimental study of the tribological behaviour of the brass/steel pair, *Journal of Materials Processing Technology*, 100 (1-3), 273-277.

Dixon, J. C., 1999, The shock absorber handbook, *SAE International*, p.

Doğangün, A., 2004, Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, *Engineering structures*, 26 (6), 841-856.

Dolce, M. ve Cardone, D., 2001, Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension, *International journal of mechanical sciences*, 43 (11), 2657-2677.

Dolce, M., Cardone, D. ve Croatto, F., 2005, Frictional behavior of steel-PTFE interfaces for seismic isolation, *Bulletin of earthquake engineering*, 3, 75-99.

DuPont, Teflon PTFE Properties Handbook. U.S.A.

Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Quast, P., Sain, M. K., Kaspari Jr, D. C. ve Soong, T. T., 1996, Acceleration feedback control of MDOF structures, *Journal of engineering mechanics*, 122 (9), 907-918.

engineeringlibrary.org, 2023, Coefficient of Friction, https://engineeringlibrary.org/reference/coefficient-of-friction:

Fan, F.-G., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I. G., 1988, Base Isolation of a Multi-story Building Under a Harmonic Ground Motion: A Comparison of Performances of Various Systems, National Center for Earthquake Engineering Research, p.

FEMA273, 1996, NEHRP guidelines for seismic rehabilitation of buildings. Building Seismic Safety Council, Washington D.C.

FEMA356, 2000, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. ASCE, Federal Emergency Management Agency: Washington DC.

FEMA461, 2007, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components. ATC Applied Technology Council, Washington, D.C.

Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2006, Behaviour of the double concave friction pendulum bearing, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35 (11), 1403-1424.

Filiatrault, A., 1985, Performance Evaluation of Friction Damped Braced Steel Frames Under Simulated Earthquake Loads, *The University of British Columbia*

Filiatrault, A. ve Cherry, S., 1989, Parameters influencing the design of friction damped structures, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16 (5), 753-766.

Filiatrault, A. ve Cherry, S., 1990, Seismic design spectra for friction-damped structures, *Journal of Structural Engineering*, 116 (5), 1334-1355.

Fitzgerald, T., Anagnos, T., Goodson, M. ve Zsutty, T., 1989, Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections, *Earthquake Spectra*, 5 (2), 383-391.

Frahm, H., 1911, Device for damping vibrations of bodies, Google Patents.

Fu, Y. ve Cherry, S., 2000, Design of friction damped structures using lateral force procedure, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29 (7), 989-1010.

Fujino, Y., Soong, T. T. ve Spencer, B. F., 1996, Structural control: Basic concepts and applications.

Golafshani, A. A. ve Gholizad, A., 2009, Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (1), 180-187.

Grigorian, C. E., Yang, T.-S. ve Popov, E. P., 1993, Slotted bolted connection energy dissipators, *Earthquake Spectra*, 9 (3), 491-504.

Guan, Q., Li, G., Wang, H. ve An, J., 2004, Friction-wear characteristics of carbon fiber reinforced friction material, *Journal of materials science*, 39 (2), 641-643.

Gutierrez Soto, M. ve Adeli, H., 2013, Tuned mass dampers, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20, 419-431.

Habibi, A., Chan, R. W. K. ve Albermani, F., 2013, Energy-based design method for seismic retrofitting with passive energy dissipation systems, *Engineering structures*, 46, 77-86.

Hahn, G. ve Sathiavageeswaran, K., 1992, Effects of added-damper distribution on the seismic response of buildings, *Computers & structures*, 43 (5), 941-950.

Hanson, R. D., 1993, Supplemental damping for improved seismic performance, *Earthquake Spectra*, 9 (3), 319-334.

Hwang, J., Chang, K. ve Lee, G., 1990, Quasi-static and dynamic sliding characteristics of Teflon—Stainless steel interfaces, *Journal of Structural Engineering*, 116 (10), 2747-2762.

Iancu, V., Gillich, G. R., Iavornic, C. M. ve Gillich, N., 2013, Some models of elastomeric seismic isolation devices. (Vol. 430, pp. 356-361). , *In Applied Mechanics and Materials*, 430, 356-361.

Jaisee, S., Yue, F. ve Ooi, Y. H., 2021, A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications, *Engineering structures*, 235.

Jensen, M. M., 2009, Experimental Evaluation of a Friction Damper Device, Bachelor Project, *Technical University of Denmark*.

Keel, C. J. ve Mahmoodi, P., 1986, Design of viscoelastic dampers for Columbia Center Building, *Building motion in wind*, 66-82.

Kelly, J. M., Skinner, R. ve Heine, A., 1972, Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5 (3), 63-88.

Kim, J., Choi, H. ve Min, K. W., 2011, Use of rotational friction dampers to enhance seismic and progressive collapse resisting capacity of structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20 (4), 515-537.

Lee, D. ve Taylor, D. P., 2001, Viscous damper development and future trends, *The Structural Design of Tall Buildings*, 10 (5), 311-320.

Li, R., 1987, Fabrication Technology of Carbon Fiber Composite, Chinese Science Press Beijing.

Lim, S. C. ve Ashby, M. F., 1987, Overview no. 55 wear-mechanism maps, *Acta metallurgica*, 35 (1), 1-24.

Lin, R., Liang, Z., Soong, T. ve Zhang, R., 1988, An experimental study of seismic structural response with added viscoelastic dampers, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New …, p.

Lin, Y.-Y., Tsai, M., Hwang, J. ve Chang, K., 2003, Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems, *Engineering structures*, 25 (1), 25-37.

Ma, Z., Zheng, C., Xiong, C., Yu, L., Liu, Y. ve Zhang, C., 2022, Friction-Wear Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Paper-Based Friction Materials under Different Working Conditions, *Materials*, 15 (10), 3682.

Min, K. W., Seong, J. Y. ve Kim, J., 2010, Simple design procedure of a friction damper for reducing seismic responses of a single-story structure, *Engineering structures*, 32 (11), 3539-3547.

Mokha, A., Constantinou, M. ve Reinhorn, A., 1990, Teflon Bearings in Base Isolation I: Testing, *Journal of Structural Engineering*, 116 (2), 438-454.

Monir, H. S. ve Zeynali, K., 2013, A modified friction damper for diagonal bracing of structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 87, 17-30.

Moreschi, L. M. ve Singh, M. P., 2003, Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32 (8), 1291-1311.

Mostaghel, N. ve Tanbakuchi, J., 1983, Response of sliding structures to earthquake support motion, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 11 (6), 729-748.

Mualla, I., Nielsen, L., Belev, B., Liao, W., Loh, C. ve Agrawal, A., 2002, Numerical predictions of shaking table tests on a full scale friction-damped structure, *12th European conference on earthquake engineering, London, UK*.

Mualla, I. H., 2000a, Experimental and numerical evaluation of a novel friction damper device, Ph.D. Thesis, *Technical University of Denmark*, Denmark.

Mualla, I. H., 2000b, Parameters influencing the behavior of a new friction damper device, *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, 64-74.

Mualla, I. H. ve Belev, B., 2002, Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation, *Engineering structures*, 24 (3), 365-371.

Nagarajaiah, S., 1994, Fuzzy controller for structures with hybrid isolation system. In Proc. First World Conf. Struct. Control, Los Angeles, CA**:** 67-76.

Newmark, N. M., Rosenblueth, E. ve Pao, Y. H., 1972, Fundamentals of earthquake engineering, p.

Nims, D. K., Richter, P. J. ve Bachman, R. E., 1993, The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation, *Earthquake Spectra*, 9 (3), 467-489.

Özmen, B., Güler, H. ve Nurlu, M., 1997, Coğrafi bilgi sistemi ile deprem bölgelerinin incelenmesi, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Fenel Mürdürlüğü*, p.

Pall, A., 1986, Energy dissipation devices for aseismic design of buildings, *Proceedings of a seminar and workshop on base isolation and passive energy dissipation*, 223-232.

Pall, A. ve Pall, R. T., 2004, Performance-Based Design Using Pall Friction Dampers-An Economical Design Solution. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, BC, Canada. 71.

Pall, A. P., R. Tina, 2004, Performance-based design using pall friction dampers-an economical design solution, *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*.

Pall, A. S. ve Marsh, C., 1982, Response of friction damped braced frames, *Journal of structural engineering*, 108 (9), 1313-1323.

Pall, A. S. M., C., 1982, Response Of Friction Damped Braced Frames, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108, 13.

PallDynamics, 2023, DesignWithFrictionDampers, http://www.palldynamics.com/DesignWithFrictionDampers.htm:

Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R. T. ve Pall, A., 2004, Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal, *13th world conference on earthquake engineering*, 1-2.

Pradlwarter, H. J., Schuëller, G. I. ve Dorka, U., 1998, Reliability of MDOF-systems with hysteretic devices, *Engineering structures*, 20 (8), 685-691.

QUAKETEK, 2023, Seismic Design with Friction Dampers, https://quaketek.com/seismic-design/:

Quast, P. ve Sain, M. K., 1995, Role of control-structure interaction in protective system design, *Mechanics*, 121 (2), 322-338.

Rabinowicz, E. ve Tanner, R., 1966, Friction and wear of materials, *Journal of Applied Mechanics*, 33 (2), 479.

Rae, P. ve Dattelbaum, D., 2004, The properties of poly (tetrafluoroethylene)(PTFE) in compression, *Polymer*, 45 (22), 7615-7625.

Rahmani Samani, H., Mirtaheri, M., Zandi, A. P. ve Bahai, H., 2014, The Effects of Dynamic Loading on Hysteretic Behavior of Frictional Dampers, *Shock and Vibration*, 2014, 1-9.

Reinhorn, A. M., 1994, Control of bridge vibrations with hybrid devices. In Proc. First World Conf. Struct. Control. Los Angeles, CA**:** 50-59.

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, *Proceedings of the 1990 SEAOC Convention*, 377-401.

Sakai, F., 1989, Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibration, *Proceedings of 1^< st> International Conference on High-rise Buildings*, 926-931.

Saoka, Y., Sakai, F., Takaeda, S. ve Tamaki, T., 1988, On the suppression of vibrations by tuned liquid column dampers, *Annual meeting of JSCE, JSCE, Tokyo*.

SAP2000, 2015, v17.3 Academic Version. Computers & Structures, I. Berkeley, California, USA.

Shukla, A. ve Datta, T., 1999, Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force, *Journal of Structural Engineering*, 125 (4), 401-409.

Singh, M. P. ve Moreschi, L. M., 2001, Optimal seismic response control with dampers, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30 (4), 553-572.

Singh, M. P. ve Moreschi, L. M., 2002, Optimal placement of dampers for passive response control, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31 (4), 955-976.

Skinner, R. I., Kelly, J. M. ve Heine, A., 1974, Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 3 (3), 287-296.

Smartbolts, 2022, Smartbolts Industrial Indicators - Relating Tension to Torque, http://www.smartbolts.com/insights/nut-factor-affect-torque/: [15.12.2022].

Song, G., Ma, N. ve Li, H.-N., 2006, Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering structures*, 28 (9), 1266-1274.

Soong, T., Reinhorn, A., Wang, Y.-P. ve Lin, R., 1991a, Full-scale implementation of active control. I: Design and simulation, *Journal of Structural Engineering*, 117 (11), 3516-3536.

Soong, T. ve Constantinou, M., 1994, Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, Springer, *Verlag, New York*.

Soong, T. ve Spencer Jr, B., 2002, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, *Engineering structures*, 24 (3), 243-259.

Soong, T. T., 1990, Active structural control, *Longman Scientific and Technical*, p.

Soong, T. T., Masri, S. F. ve Housner, G. W., 1991b, An overview of active structural control under seismic loads, *Earthquake Spectra*, 7 (3), 483-505.

Soong, T. T. ve Dargush, G. F., 1997, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, Wiley, p.

Soong, T. T. ve Costantinou, M. C., 2014, Passive and active structural vibration control in civil engineering, Springer, p.

Symans, M. D. ve Kelly, S. W., 1997, Fuzzy logic control of structures with hybrid seismic isolation systems. In Proceedings of Eleventh VPI and SU Symposium on Structural Dynamics and Control. Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg**:** 21-30.

Symans, M. D. ve Constantinou, M. C., 1999, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering structures*, 21 (6), 469-487.

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.

Tadaki, T., Otsuka, K. ve Shimizu, K., 1988, Shape memory alloys, *Annual Review of Materials Science*, 18 (1), 25-45.
Taiyari, F., Mazzolani, F. M. ve Bagheri, S., 2019, Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 11-20.
Takewaki, I., 2011, Building control with passive dampers: optimal performance-based design for earthquakes, John Wiley & Sons, p.
TBDY, 2018, Deprem Etkisi Altındaki Binaların Tasarımı için Esaslar, *Ankara, Turkiye*.
TDG, 2009, TestLAB Basic Kullanım Kılavuzu, *Teknik Destek Grubu*.
TDY, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara, Türkiye, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
TKDY, 2020, Türkiye Köprü Deprem Yönetmeliği. Ankara, Türkiye, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı.
TS500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü.
TS708, 2016, Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği. Ankara, Türkiye, Türk Standardları Enstitüsü.
TÜİK, T. İ. K., 2015, Nüfus ve Demografi, https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1: [20.11.2022].
Türkoğlu, N., 1993, Türkiye'nin Yüzölçümü ve Nüfusunun Deprem Bölgelerine Dağılışı, *TÜCAUM, Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi, Ankara.*, 8.
Tyler, R., 1977, Dynamic tests on PTFE sliding layers under earthquake conditions, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 10 (3), 129-138.
Uang, C. M. ve Bertero, V. V., 1988, Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design (Vol. 88), *Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center*, University of California, p.
Vail, C., Hubbell, J., O. C., B., King, J. ve Pall, A., 2004, Seismic upgrade of the Boeing commercial airplane factory at Everett, WA, USA, *The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada*.
Verganelakis, V. ve Pall, R. T., 2004, Hightech seismic design of Le Nouvel Europa, Montreal, *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
Vezina, S., Proulx, P., Pall, R. ve Pall, A., 1992, Friction-Dampers for Aseismic Design of Canadian-Space-Agency, *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Vols 1-10*, 4123-4128.
Warn, G. P. ve Ryan, K. L., 2012, A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs, *Buildings*, 2 (3), 300-325.
Wen, Y.-K., 1976, Method for random vibration of hysteretic systems, *Journal of the engineering mechanics division*, 102 (2), 249-263.
Whittaker, A., Bertero, V., Alonso, J. ve Thompson, C., 1988, Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements, p.
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.
Zayas, V. A. ve Mahin, S. A., 1987, The FPS earthquake resisting system experimental report, Earthquake Engineering Research Center, p.

Zayas, V. A., Low, S. S. ve Mahin, S. A., 1989, Seismic isolation using the Friction Pendulum system.

Zhang, R. H., Soong, T. ve Mahmoodi, P., 1989, Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 18 (3), 389-396.