
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YAPISAL ÇERÇEVELER İÇİN YENİ BİR DEPREM SÖNÜMLEYİCİSİ TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

İbrahim Utku DEMİRBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

İbrahim Utku DEMİRBAŞ

17/07/2025

YAPISAL ÇERÇEVELER İÇİN YENİ BİR DEPREM SÖNÜMLEYİCİSİ TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İbrahim Utku DEMİRBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Taşıyıcı sistemleri yapısal çerçevelerden oluşan yapılara yatay yönde etkiyebilecek deprem, rüzgâr vb. yüklerin sebep olabileceği ek tesirlerin etkisini azaltabilmek için çaprazlar, sismik izolatörler vb. gibi çeşitli çözümler kullanılmaktadır. Yakın zamanda bu amaçla farklı çözümlerden biri olan sönümleyiciler (damper) yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Sönümleyicilerin kullanımı, deprem güvenliği ve maliyet açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Bu sönümleyiciler, yapıya etki eden yatay sismik kuvvetlerin sonucunda oluşan yatay deplasmanları azaltıp enerji dönüştürerek yapı elemanlarının daha az zorlanmasını sağlar. Böylece, taşıyıcı sistem elemanlarının tasarım boyutları küçültülebilir ve daha ekonomik çözümler elde edilebilir. Söz konusu sönümleyiciler pasif, aktif ve yarı-aktif olmak üzere çalışma prensiplerine bağlı olarak üç ana grup olarak sınıflandırılmaktadır. Üç ana gruptan birisi olan pasif sönümleyiciler, diğer gruplardan farklı olarak herhangi bir dış enerji gereksinimi olmadan çalışabilirler. Bu sayede hem kolay uygulanabilir hem de bakım ihtiyacının az olması ve uzun ömürlü performans sunmaları sebebiyle daha ekonomiktir. Pasif sönümleyici sistemlerden biri olan sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) içerisinde viskoz sıvı dolu olan çelik bir silindir kılıf ve piston ikilisinden oluşmakta olup genellikle sabit dirençlidir. Bu tez kapsamında yeni bir FVD tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin özgün yönü, pistonun strok mesafesi boyunca doğrusal hareketine devam ettikçe, sönümleyici tarafından üretilen direncin kademeli ve pasif olarak artmasıdır. Bir başka ifade ile, küçük deplasmanlarda daha az, büyük deplasmanlarda ise daha etkin biçimde devreye girip deprem enerjisi dönüştürmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında bir tasarım yapılmış ve bu tasarıma ait ilk prototip sönümleyici üretilmiştir. Ardından imkanlar dahilinde üzerinde deneyler yapılarak tasarım prensipleri doğrultusunda çalışabildiği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, tasarımın ve test yöntemlerinin geliştirilebilmesi yönünde öneriler de sunulmuştur.

Bilim Kodu	:	91130
Anahtar Kelimeler	:	Sönümleyici, viskoz sıvılı sönümleyici, yapısal çerçeve
Sayfa Adedi	:	93
Danışman	:	Doç. Dr. Eray ÖZBEK

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A NEW SEISMIC DAMPER FOR STRUCTURAL FRAMES

(M. Sc. Thesis)

İbrahim Utku DEMİRBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In structures whose load-bearing systems consist of structural frames, various solutions such as bracings and seismic isolators are employed to mitigate the additional structural responses that may arise from lateral loads such as earthquakes and wind. Recently, dampers have increasingly been adopted as one of the alternative solutions for this purpose. The use of dampers offers significant advantages in terms of seismic safety and cost-effectiveness. These devices reduce lateral displacements caused by seismic forces acting on the structure by dissipating energy, thereby minimizing the demand on structural elements. Consequently, the dimensions of load-bearing members can be reduced, leading to more economical designs. Dampers are categorized into three main groups based on their operational principles: passive, active, and semi-active systems. Among these, passive dampers can operate without any external energy source, which makes them both easier to implement in structural projects and more economical due to their low maintenance requirements and long service life. One type of passive damping system is the fluid viscous damper (FVD), which typically consists of a steel cylinder filled with viscous fluid and a piston, and operates with constant resistance characteristics. Within the scope of this thesis, a novel FVD design has been developed. The distinctive feature of the proposed system is that the resistance generated by the damper increases gradually and entirely passively as the piston continues its linear motion along the stroke distance. This property is intended to enable the damper to provide minimal resistance during small displacements and greater support during large displacements, thereby contributing more actively to structural performance. Within the scope of the study, a design was developed, and the first prototype of the damper was manufactured accordingly. Subsequently, experiments were conducted within available means to verify that the prototype functioned in accordance with the design principles. The obtained results were evaluated, and recommendations were presented for the improvement of both the design and testing methods.

Science Code	:	91130
Key Words	:	Damper, fluid viscous damper, structural frame
Page Number	:	93
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Eray ÖZBEK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi, deneyim ve desteğiyle yanımda olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Eray ÖZBEK'e, akademik rehberliği, yapıcı eleştirileri ve yönlendirmeleri için en içten teşekkürlerimi sunarım. Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yalnızca akademik anlamda değil, aynı zamanda hayatla ilgili pek çok konuda da yol gösterici olmuş; her zaman anlayışla yaklaşarak gelişimime katkı sağlamıştır.

Tez kapsamında geliştirilen yeni sönümleyici tasarımının temellerini atan, çalışmanın ilham kaynağı olan değerli hocam Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ'a, özgün fikirleri ve kıymetli yönlendirmeleri için gönülden teşekkürlerimi sunarım. Lisans eğitimimin ilk yıllarından bu yana bilgi birikimi ve yapıcı yaklaşımı ile birçok konuda rehberliğini ve desteğini esirgememiştir.

Deneysel çalışmaların planlanması ve yürütülmesinde, başta Arş. Gör. Ömer ALDEMİR olmak üzere; Öğr. Gör. Dr. Hüseyin KALKAN'a ve Arş. Gör. Dr. Meryem BÖCEK'e değerli emekleri ve destekleri için teşekkür ederim.

Geliştirilen yeni tasarımın prototip üretiminin gerçekleştirilmesi sürecinde emeği geçen, merhum Yüksel KAYA ve ekibine teşekkür ederim.

Bu süreçte desteğini esirgemeyen, fikir ve katkılarıyla motivasyonumu artıran, emeği geçen tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi, bu tez sürecinde de hiçbir koşul gözetmeksizin yanımda olan; sevgileri, sabırları, anlayışları ve sonsuz destekleriyle beni her zaman güçlü kılan aileme, yalnızca bu çalışmanın değil, bugüne kadar attığım her adımın arkasındaki en büyük güç oldukları için minnettarım. Varlıklarıyla bana koşulsuz bir güven ve huzur alanı sunan kıymetli babama, anneme ve kardeşime en derin teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

RESİMLERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. AMAÇ VE KAPSAM 3

3. YAPISAL SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER 5

3.1. Pasif Sönümleyici Sistemleri 5

3.1.1. Yer değiştirmeye bağlı sönümleyiciler 6

3.1.2. Hıza bağlı sönümleyiciler 15

3.1.3. Diğer pasif sönümleyiciler 19

3.2. Aktif Sönümleyici Sistemleri 22

3.2.1. Yapay kuvvet üreten sistemler 22

3.2.2. Gerçek zamanlı sensör-algılayıcı sistemleri 23

3.3. Yarı-Aktif Sönümleyici Sistemleri 23

3.3.1. Manyetoreolojik ve elektroreolojik sönümleyiciler 24

Sayfa

3.3.2. İnerter tabanlı elektromanyetik sönümleyiciler 25

3.4. FVD'lerin Tarihsel Gelişimi..... 26

3.5. FVD'lerin Tasarım Testleri 27

3.5.1. Tip testleri 27

3.5.2. Fabrika testleri 30

3.5.3. Üçüncü taraf testleri..... 31

3.6. FVD'lerin Tasarım ve Geliştirilmesine Yönelik Geçmişte Yapılan Çalışmalar 35

4. FVD TASARIMI..... 39

4.1. TS EN 15129'a Göre Tasarım ve Malzeme Sınırlamaları 39

4.1.1. İşlevsel gereklilikler..... 39

4.1.2. Malzeme özellikleri 40

4.1.3. Tasarım gereklilikleri..... 41

4.2. Yeni Tasarım 42

4.2.1. Kullanılan malzemeler..... 43

4.2.2. Yeni tasarım FVD'nin ölçüleri 44

4.2.3. Yeni tasarım FVD'nin kapasite kontrolleri 46

5. DENEYSEL ÇALIŞMA..... 51

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 63

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 69

KAYNAKLAR 71

Sayfa

EKLER..... 75

EK-1. 1. deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler..... 76

EK-2. 2. deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler..... 81

EK-3. 3. deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler..... 87

ÖZGEÇMİŞ..... 93

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. ADAS 8

Resim 3.2. TADAS 8

Resim 3.3. UMYD 10

Resim 3.4. BRB 11

Resim 3.5. Pall tipi sönümleyici 13

Resim 3.6. SBC tipi sönümleyici 14

Resim 3.7. Katmanlı kauçuk sönümleyici 17

Resim 3.8. Polimerik blok sönümleyici 18

Resim 3.9. Viskoz sıvılı sönümleyici 19

Resim 3.10. Ayarlı kütle sönümleyici 20

Resim 3.11. Ayarlı sıvı sönümleyici 21

Resim 3.12. Manyetoreolojik sönümleyici 24

Resim 3.13. Elektroreolojik sönümleyici 25

Resim 4.1. Yeni tasarım FVD 42

Resim 4.2. Yeni tasarım FVD bileşenleri 43

Resim 4.3. Yeni tasarım FVD sistemde kullanılan manometre 44

Resim 4.4. Yeni tasarım FVD'nin ölçüleri 45

Resim 4.5. Piston kafası net alanı 47

Resim 4.6. Maksimum piston genliği ve burkulma boyu 48

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Çelik levhalar 51

Resim 5.2. Taşıyıcı zincir (a) ve zincir kilidi (b) 52

Resim 5.3. Çelik kutu profil (a) ve kuvvet kolu (b) 52

Resim 5.4. Deney düzeneği işaretlemeleri 53

Resim 5.5. Deney düzeneği 54

Resim 5.6. Deney düzeneği (Laboratuvar) 55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.1. Deplasman-zaman grafiği (1. Deney) 56

Şekil 5.2. Basınç-zaman grafiği (1. Deney) 56

Şekil 5.3. Basınç-deplasman grafiği (1. Deney) 56

Şekil 5.4. Deplasman-zaman grafiği (2. Deney) 57

Şekil 5.5. Basınç-zaman grafiği (2. Deney) 57

Şekil 5.6. Basınç-deplasman grafiği (2. Deney) 57

Şekil 5.7. Deplasman-zaman grafiği (3. Deney) 58

Şekil 5.8. Basınç-zaman grafiği (3. Deney) 58

Şekil 5.9. Basınç-deplasman grafiği (3. Deney) 58

Şekil 5.10. Kuvvet-deplasman grafiği (1. Deney) 59

Şekil 5.11. Kuvvet-deplasman grafiği (2. Deney) 59

Şekil 5.12. Kuvvet-deplasman grafiği (3. Deney) 60

Şekil 6.1. Karşılaştırmalı deplasman-zaman grafiği 63

Şekil 6.2. Karşılaştırmalı basınç-zaman grafiği 64

Şekil 6.3. Karşılaştırmalı basınç-deplasman grafiği 65

Şekil 6.4. Karşılaştırmalı sönümlenen enerji grafiği 66

Şekil 6.5. Serbest düşme ve sönümleyici deplasmanları grafiği 67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Yapısal Enerji Sönümleyici Sistemler 5

Çizelge 4.1. FVD için tölerans sınırları (TS EN 15129 Tablo-6) 41

Çizelge 5.1. Sönümlenen enerji hesabı (1. Deney) 61

Çizelge 5.2. Sönümlenen enerji hesabı (2. Deney) 61

Çizelge 5.3. Sönümlenen enerji hesabı (3. Deney) 62

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°	Derece
°C	Santigrat derece
A	Kesit alanı
$\mathbf{A_{bütün}}$	Tüm alan
$\mathbf{A_{net}}$	Net alan
C	Sönüm katsayısı
D	Çap
$\mathbf{d_0}$	Piston genliği
$\mathbf{d_{th}}$	Deplasman büyüklüğü
E	Elastisite modülü
$\mathbf{E_d}$	Sönümlenen enerji
F	Üretilen sönüm kuvveti
$\mathbf{f_0}$	Frekans
$\mathbf{F_{cr}}$	Kritik burkulma gerilmesi
$\mathbf{F_e}$	Plastik burkulma gerilmesi
$\mathbf{F_f}$	Sürtünme kuvveti
$\mathbf{F_f}$	Sürtünme kuvveti
$\mathbf{F_{pre}}$	Cıvata ön yükü
$\mathbf{F_u}$	Maksimum gerilme kuvveti
$\mathbf{F_y}$	akma dayanımı
I	Atalet momenti
i	Atalet Yarıçapı
K	Rijitlik katsayısı
L	Uzunluk
$\mathbf{L_c}$	Burkulma boyu
$\mathbf{L_e}$	Etkili boyun

Simgeler	Açıklamalar
M_y	Akma momenti
n	Levha sayısı
N	Newton
N	Normal kuvvet
n_b	Cıvata sayısı
p	Kuvvet
P_n	Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı
r	Yarıçap
s	Saniye
t	Cidar kalınlığı
T	Çevrim süresi
t_d	Tasarım reaksiyonu toleransı
T_n	Karakteristik çekme kuvveti dayanımı
v	Göreli hız
α	Hız üssü
γ	Kesme şekil değiştirmesi
γ_v	Güvenilirlik katsayısı
Δ	Göreli deplasman
Δ_p	Plastik şekil değiştirme miktarı
ε_p	Plastik şekil değiştirme
θ_p	Plastik dönme
λ	Narinlik oranı
μ	Sürtünme katsayısı
π	Pi sayısı
$\sigma_{çevresel}$	Çevresel basınç
σ_{em}	Emniyet gerilmesi
σ_y	Akma gerilmesi
τ	Kesme gerilmesi
Ω	Güvenlik katsayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
ADAS	Ek sönümleme ve rijitlik cihazı
ASTM	American Society of Testing and Materials
BRB	Burkulması önlenmiş çelik çaprazlar
cm	Santimetre
ÇYHY	Çelik Yapılar Hakkında Yönetmelik
EN	European Norm
ER	Elektroreolojik
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FVD	Viskoz sıvılı sönümleyici
GKT	Güvenlik Katsayıları ile Tasarım
GPa	Gigapascal
Inc.	Şirket
ISO	International Organization for Standardization
Kgf	Kilogram-kuvvet
kN	Kilonewton
lb	Libre
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
MR	Manyetoreolojik
SBC	Oval delikli civatalı
SUNY	State University of New York
TADAS	Üçgen ek sönümleme ve rijitlik cihazı
TLD	Ayarlı sıvı sönümleyici
TMD	Ayarlı kütle sönümleyici
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UBRB	Bağlanmamış burkulması önlenmiş çelik çaprazlar
UMYD	U- şekilli metalik akma sönümleyici

1. GİRİŞ

Depremler, yıkıcı etkilere sebep olabilen doğal afetlerdir. Ülkemiz de bu afetten sıkça etkilenen bir deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Gerçekleşen depremler yapılarımızı oldukça büyük dinamik yüklemelere maruz bırakmaktadır ve bu yüklemeler yapıların zaman içinde yıpranmasına, taşıyıcı sistem elemanlarında plastik deformasyon oluşmasına ve hatta göçmelere sebep olabilmektedir. Yıkılmalar sebebiyle oluşan can ve mal kayıpları ülkemize ekonomik ve sosyal çok ciddi zararlar vermektedir. Bu zararların azalmasını sağlayıp, mümkünse oluşmasına engel olmak amacıyla yapıların deprem davranışlarının iyileştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar mühendislerce yapılmaktadır.

Geleneksel yapı tasarım yaklaşımlarında, depreme dayanıklılık esas olarak yapı elemanlarının dayanım ve rijitliğini artırmaya yönelik çözümler üretilmektedir. Ancak, bu yöntemler yapı maliyetlerini artırmakta ve bazı durumlarda depreme karşı optimum çözümler sunamamaktadır (Chopra, 2001: 612-615).

Bu nedenle, yapıların dinamik yükler altında daha teknolojik enerji dönüştürebilen sistemlerle desteklenmesi gerekliliği doğmuştur. Oluşan bu gereklilik neticesinde ortaya çıkan güçlendirme yöntemlerinden birisi sönümleyiciler kullanılarak yapıların sismik performanslarını arttırmaktır. Yapılara dahil edilen bu sistemler, sismik enerjiyi kontrollü bir şekilde dağıtıp dönüştürerek yapı elemanlarının aşırı yüklenmesini önlemekte ve göçme riskini azaltmaktadır (Constantinou ve Symans, 1992). Söz konusu sönümleyici sistemleri, pasif, aktif ve yarı-aktif sönümleyiciler olmak üzere çalışma prensiplerine bağlı olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır (Housner ve diğ., 1997).

Pasif sönümleyiciler, diğer gruplardan farklı olarak dışarıdan bir enerji kaynağına gereksinim duymadan, yalnızca yapının hareketinden kaynaklanan enerjiyi dönüştürerek sönümleme sağlayan sistemlerdir. Pasif sönümleyiciler, yapıların tasarım aşamasında planlanıp uygulanabileceği gibi, mevcut yapılara sonradan da uygulanabilmektedir. Kolay uygulanabilirliği, bakım ihtiyacının düşük olması ve uzun ömürlü performans sunmaları sebebiyle birçok açıdan yapısal maliyete katkı sağladığı için, son yıllarda daha yaygın tercih edilmeye başlanmıştır.

Pasif sönümleyici sistemlerden biri olan viskoz sıvılı sönümleyiciler (Fluid viscous

dampers-FVD), içerisinde yüksek viskoziteli sıvı dolu bir piston mekanizmasından oluşmaktadır. Sistem içerisinde bulunan yüksek viskoziteli sıvılar, hidrolik direnç oluşturarak enerjiyi sönümler. Geleneksel tasarımlarda oluşan direnç genellikle sabittir (Makris ve Constantinou, 1991).

Bu çalışmada yeni bir FVD tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin özgünlüğü, pistonun doğrusal hareketine piston genliği mesafesi boyunca devam etmesi ile birlikte sönümleyici tarafından üretilen direncin kademeli ve pasif olarak artmasıdır. Bu özellik ile birlikte, oluşan küçük ötelenmelerde daha az, büyük ötelenmelerde ise daha fazla direnç göstererek yapıya etkiyebilecektir. Özgün tasarımın ilk prototipi üretilmiş ve üzerinde Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında imkanlar dahilinde testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda yeni tasarımın etkinliği ölçülmüş ve geliştirilmesi yönünde öneriler verilmiştir.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Viskoz sönümleyici sistemler üzerine yapılmış birçok akademik ve deneysel çalışma olmasına rağmen, piston genliği boyunca direnç kuvvetini kontrollü şekilde kademeli artıran pasif sistemler literatürde oldukça sınırlı yer almaktadır. Güncel çalışmalarda çoğunlukla sabit karakteristikli sönümleyicilerin performans analizleri yapılmakta; dinamik davranışlarda değişken direnç yapısı sunan yeni tasarımlar yeterince ele alınmamaktadır. Bu sebeple, tez çalışmasında geliştirilen özgün FVD tasarımı, literatürdeki önemli bir boşluğa yönelik araştırma sunmayı amaçlamaktadır.

Klasik FVD'lerde direnç kuvveti genellikle sabit ya da giriş hızına bağlı olarak belirli bir matematiksel modelle tanımlanırken, bu tez kapsamında geliştirilen sistemde direnç, sadece hıza değil, aynı zamanda pistonun konumuna (yani piston genliği içindeki ilerlemesine) de bağlı olarak değişmektedir. Bu sayede küçük deplasmanlarda daha az etki edip daha az bir sönümleme sağlarken, yüksek deplasmanlarda enerji sönümleme kabiliyetinin pasif olarak artıp daha fazla sönümleme sağlayarak yapının dinamik yüklemelere karşı davranışın iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

Tez kapsamında, öncelikle literatürdeki sönümleyici sistemlerinin sınıflandırmaları belirtilmiş, ardından bu sınıflandırmalar pasif, aktif ve yarı-aktif sistemler başlıkları altında ayrıntılı olarak aktarılmıştır. Çalışma prensipleri, uygulama yöntemleri, avantajları ve dezavantajları gibi farklı konulara değinilmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında, dördüncü bölümde detaylı olarak bahsedilecek olan yeni tasarım FVD'nin bir adet örneği üretilmiştir. Yukarıda bahsi geçen amaçlar doğrultusunda, bu örnek üzerinde Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarının olanakları dahilinde birkaç deney yapılmıştır.

Söz konusu deneyler;

a) Strok (piston genliği) belirleme testi
b) Ani yükleme testidir.

Çalışma sonunda deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek yeni tasarım FVD'nin

etkinliği incelenmiş, klasik tasarım FVD'ler ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaların neticesinde yeni tasarımın avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar ortaya konulmuştur. Tasarımın geliştirilmesi için daha sonra yapılabilecek çalışmalar adına önerilerde bulunulmuş ve yeni çalışmalara farklı bakış açıları sağlamaya çalışılmıştır.

3. YAPISAL SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER

Deprem etkilerine karşı yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla geliştirilen sönümleme sistemleri son zamanlarda yapı mühendisliği uygulamalarında temel bir önlem yöntemi olarak benimsenmiştir. Bu sistemlerin ana amacı, deprem süresince yapılara etkiyen kuvvetler sonucu oluşan enerjileri sönümleyerek yapısal elemanların zorlanmasını azaltarak can ve mal kayıplarını en aza indirgemektir. Tez kapsamında bu bölüm içerisinde, öncelikle yapısal sönümleyici sistemlerinin sınıflandırılmasından ve her bir sönümleyici türünden kısaca bahsedilecektir. Daha sonra yeni bir tasarım için seçilmiş olan viskoz sıvılı sönümleyiciler üzerinde daha detaylı bir şekilde durularak, tarihsel gelişimleri ve literatürdeki geçmiş çalışmalar aktarılacaktır. Yapısal sönümleyici sistemler, çalışma prensipleri baz alınarak üç ana başlıkta sınıflandırılmıştır. Bu başlıklar Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere, pasif, aktif ve yarı-aktif sönümleyicilerdir (Housner ve diğ., 1997). Her başlıktaki sistem türleri, farklı teknoloji seviyeleri, enerji gereksinimleri ve uygulama alanlarına göre yapılarda tercih edilmektedir.

Çizelge 3.1. Yapısal Enerji Sönümleyici Sistemler

YAPISAL ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER											
PASİF							AKTİF		YARI-AKTİF		
Yer Değiştirmeye Bağlı		Hıza Bağlı		Diğer			Yapay Kuvvet Üreten	Gerçek Zamanlı Sensör Algılayıcı Sistemler	Manyeto reolojik	Elektror eolojik	İnerten Tabanlı Elektromanyetik
*Metalik	*Sürtünmeli	*Viskoelastik Katı	*Viskoz Sıvılı	*TMD	*TLD	*Yeniden Merkezleme Sistemleri					
ADAS	*Pall Tipi*	*Katmanlı Kauçuk*									
TADAS	*SBC Tipi*	*Polimerik Blok*									
UMYD											
BRB											

3.1. Pasif Sönümleyici Sistemleri

Pasif sönümleyici sistemler, dışarıdan bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan deprem sonucu yapıda oluşan enerjiyi doğrudan mekanik veya fiziksel yöntemlerle sönümleyen sistemlerdir. Bu sistemler, uygulama kolaylığı, düşük maliyet, güvenilirlik ve bakım gereksiniminin azlığı gibi avantajları nedeniyle son yıllarda yapı mühendisliğinde yaygın şekilde tercih edilmektedir (Christopoulos ve Filiatrault, 2006: 1-35; Soong ve Dargush, 1997: 1-20). Literatürde pasif sönümleme sistemleri genellikle üç temel grup şeklinde

incelenmektedir (Soong ve Dargush, 1997: 15-25).

- Yer değiştirmeye bağlı sönümleyiciler
- Hıza bağlı sönümleyiciler
- Diğer pasif sistemler

Aşağıda bu gruplar alt başlıklar hâlinde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1.1. Yer değiştirmeye bağlı sönümleyiciler

Yer değiştirmeye bağlı sönümleyiciler, yapıya gelen deprem yükleri sonucunda meydana gelen göreli kat ötelemeleri ile kendiliğinden aktif hâle gelir ve oluşan enerjiyi bu deformasyon yoluyla sönümler (Soong ve Dargush, 1997: 25-45).

Metalik sönümleyiciler

Metalik sönümleyiciler, oluşan sismik enerjinin sönümlemesini malzemenin plastik şekil değiştirme özelliğinden faydalanarak gerçekleştirirler. Bu sönümleyicilere histerik sönümleyiciler adı da verilmektedir. Göreli kat ötelemeleri sonucu aktif hale gelen bu sönümleyiciler, tekrarlı yüklemelere maruz kaldıklarında şekil değiştirerek önemli miktarda enerji sönümleme kabiliyeti gösterir (Soong ve Dargush, 1997: 15-55). Çoğunlukla simetrik formda şekillendirilmiş çelik levhalar kullanılarak üretilen bu sistemler, çevrimsel yüklemelere karşı yüksek mukavemet gösterirler ve yapı sistemine ilave rijitlik kazandırmakla birlikte sünek davranış özelliklerini de artırarak yapı performansını iyileştirirler. Yaygın kullanılan metalik sönümleyici türleri aşağıdaki gibidir:

ADAS (Added damping and stiffness device)

ADAS (Ek Sönümleme ve Rijitlik Cihazı), sismik yükler altında yapıların davranışını iyileştirme amacıyla tasarlanmış, çelik levhaların plastik şekil değiştirmesi prensibine dayanan pasif bir enerji sönümleyicidir. İlk olarak 1970'li yılların sonunda Whittaker ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiş, 1980'li yıllarda ise çeşitli yapılar üzerinde deneysel uygulamalarla test edilmiş ve başarıyla uygulanmıştır (Whittaker, Bertero, Alonso ve Thompson, 1989).

ADAS, genellikle bir çerçeve sistemi içerisine yerleştirilmiş ve X formunda şekillendirilmiş simetrik çelik levhalardan oluşan bir sönümleme mekanizmasıdır (Resim 3.1). Bu şeklin tercih edilme sebebi, sistemin hem pozitif hem de negatif yöndeki yüklemelere karşı simetrik ve dengeli bir performans ortaya koymasını sağlamaktır.

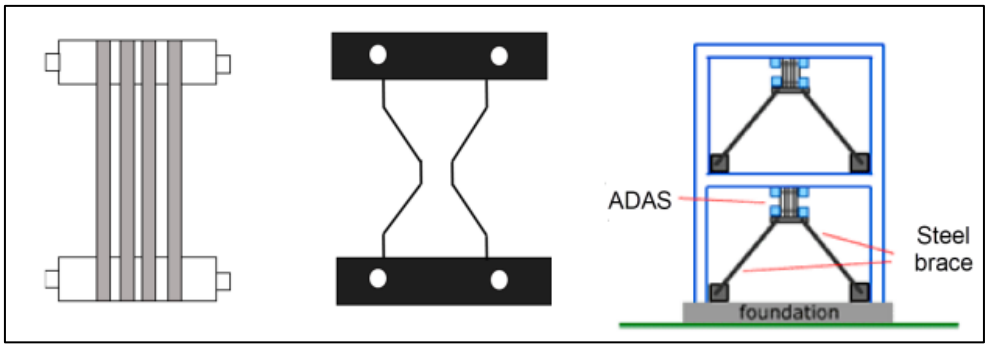
Çalışma prensibi bakımından basit ancak oldukça etkilidir. Yapısal çerçeveler arasında meydana gelen göreli kat ötelenmesi sonucunda ADAS elemanlarında eksenel gerilme ve şekil değiştirmeler oluşur. Oluşan şekil değiştirmeler elastik bölgeyi aşarak plastik bölgeye ulaşır, böylece sistem dışarıdan bir enerjiye gereksinim duymadan sadece malzeme özelliğiyle sismik enerjiyi sönümler. Çevrimsel yükleme boyunca oluşan eğri, sönümlenen enerjiyi gösterir.

Sönümlenen enerji, levha sayısına, kesit alanına, etkili boyuna ve levhanın akma dayanımına ile plastik şekil değiştirmesine doğrudan bağlıdır. Eşitlik 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$E_d = n * \sigma_y * \varepsilon_p * A * L_e \quad (3.1)$$

E_d: Sönümlenen enerji
n: Levha sayısı
σ_y: Akma gerilmesi
ε_p: Plastik şekil değiştirme
A: Kesit alanı
L_e: Levhanın etkili boyunu göstermektedir.

ADAS, yüksek döngü dayanımına sahip olduğu için artçı sarsıntıların oluşabileceği durumlarda güvenilir bir uygulamadır. Ancak büyük enerji sönümlemeleri sırasında levhalarda oluşan plastik şekil değiştirmelerden sonra levhaların değiştirilmesi gerekebilir. Bunun haricinde bakım ihtiyacı oldukça az olan ADAS hem kolay uygulanabilirliği hem de teorik olarak modellemesi yapılabilip, geçerliliği kanıtlandığı için günümüzde hâlâ tercih edilen sistemlerden biridir (Whittaker ve diğ., 1989).

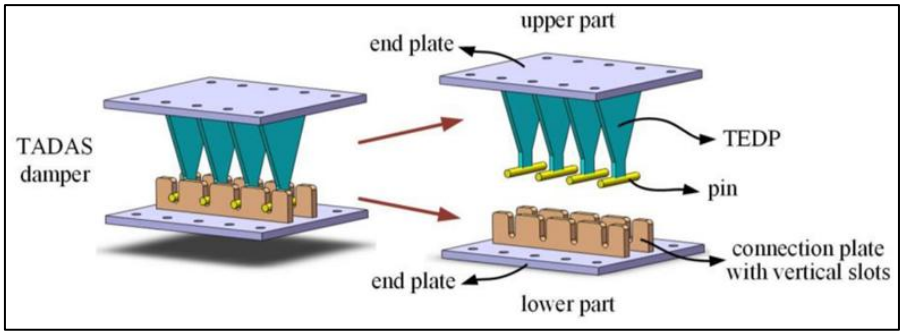


Resim 3.1. ADAS (Titirla, 2023)

TADAS (Triangular added damping and stiffness device)

TADAS (Üçgen Ek Sönümleme ve Rijitlik Cihazı), ADAS sisteminin geometrik olarak geliştirilmiş bir türevidir. 1990'lı yılların başında Tsai ve çalışma arkadaşları tarafından önerilen bu sistem, yapının deprem yükleri altındaki davranışını iyileştirmek amacıyla önceki tasarımdan daha etkin ve kontrollü plastik şekil değiştirme sağlayacak şekilde geliştirilmiştir (Tsai, Chen, Hong ve Su, 1993). TADAS'ın temel farkı, enerji sönümleyen X şeklindeki çelik levhaların eşkenar veya dik üçgen geometrili olarak düzenlenip, genellikle tabanları aşağıda olacak şekilde çerçeve içerisine yerleştirilmiş olmasıdır (Resim 3.2).

Yapılan bu yerleşim sayesinde, yatay yönde gelen deprem kuvvetleri levhanın eksenel doğrultusunda dağıtılır ve levha boyunca homojen plastik şekil değiştirme sağlanır. Çalışma prensibi, ADAS sistemiyle neredeyse aynıdır ve benzer olarak sönümlenen enerji yine 3.1'deki eşitlik ile hesaplanır. Bugüne kadar yapılan deneysel ve analitik çalışmalar, TADAS sistemlerinin de yapıların sismik performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Tsai ve diğ., 1993).



Resim 3.2. TADAS (Li, Wang, Li ve Cao, 2023)

UMYD (U-shaped metallic yielding damper)

UMYD (U-Şekilli Metalik Akma Sönümleyici), yapının göreli kat ötelemesi sırasında bükülerek çalışır ve bu bükülme yoluyla sismik enerjiyi sönümler (Resim 3.3). UMYD sistemleri ADAS ve TADAS'tan farklı olarak doğrusal eksenel deformasyon yerine eğilme deformasyonu ile enerji tüketen mekanizmalardır. Bu özelliği ile moment taşıyıcı çerçeve sistemlerinde, kolon-kiriş birleşim bölgelerine yerleştirilerek çerçevenin sünekliğini artırıp, hasar oluşmadan önce enerjinin büyük kısmının dönüştürülmesini sağlar. Sönümlenen enerji Eşitlik 3.2 ile hesaplanır. Bu formül, her bir U profilli levhada oluşan plastik eğilme bölgesindeki moment-dönme ilişkisi ile ilgilidir (Ebadi Jamkhaneh, Ebrahimi ve Shokri Amiri, 2019).

$$E_d = \sum(M_y * \theta_p) \tag{3.2}$$

E_d: Sönümlenen enerji
M_y: Akma momenti
θ_p: Plastik dönme miktarı

UMYD sistemler, U profilli çelik levhaların dikey veya yatay düzlemde yerleştirilmesi ile oluşur. Levhalar doğrudan çerçeve elemanlarına bağlanabilir, bu sebeple hem mevcut yapıların performans güçlendirmelerinde hem de yeni yapıların tasarımında kullanılabilir.
Ebadi Jamkhaneh ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda, UMYD sistemlerinin kullanılmış olduğu geleneksel çerçeve sistemlerine kıyasla yatay deplasmanı önemli ölçüde azalttığı ve plastik mafsal oluşumunu sınırladığı tespit edilmiştir (Ebadi Jamkhaneh ve diğ., 2019).



Resim 3.3. UMYD

BRB (Buckling-restrained braces)

BRB (Burkulması Önlenmiş Çelik Çaprazlar), yer değiştirmeye bağlı metalik sönümleyiciler arasında yer alan önemli sistemlerden biridir. BRB'ler, basınç altında da simetrik olarak deformasyon yapacak bir şekilde tasarlanmış olduğu için klasik çelik çaprazlardan ayrılmaktadır. BRB sistemler, temel olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Ana bileşen, yük taşıyan ve enerji sönümleyen çelik çekirdektir (Resim 3.4). İkinci bileşen, çelik çekirdeğin basınç altında burkulmasını engelleyen, genellikle beton dolgu veya çelik borudan oluşan burkulmayı önleyici kılıftır. Son bileşen ise eksenel deformasyonun serbestçe gerçekleşmesini sağlamak amacıyla çelik çekirdek ile dış kılıf arasındaki sürtünmeyi azaltan ayırıcı tabakadır. Sistemde bir araya gelen bileşenler sayesinde çekirdekteki çelik elemanın hem basınç hem de çekme yükleri altında akmaya zorlanarak plastik deformasyon oluşturması ile enerji sönümlenir. Bu davranış ile BRB'ler de metalik sönümleyici sınıfına dahil olmaktadır (Soong ve Dargush, 1997: 35-60). BRB sistemlerinde enerji, çekirdek çeliğin sünek akması sonucu oluşan plastik dönme ve şekil değiştirme yoluyla tüketilir ve Eşitlik 3.3 ile hesaplanır.

$$E_d = \sum(F_y * \Delta_p) \tag{3.3}$$

E_d: Bir yük döngüsünde tüketilen enerji

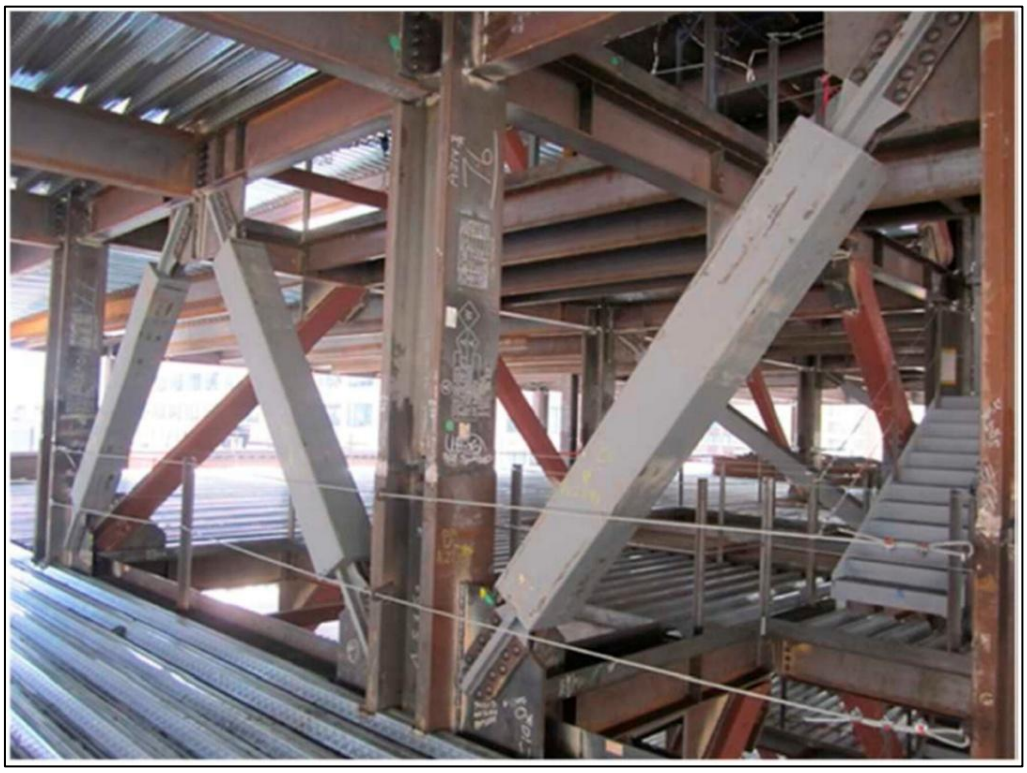
F_y: Çelik çekirdeğin akma kuvveti

Δ_p: Plastik şekil değiştirme miktarı

Literatürde BRB sistemlerinin özellikle yüksek katlı yapılarda, köprülerde ve endüstriyel tesislerde hem yeni tasarımda hem de güçlendirme çalışmalarında etkin biçimde kullanıldığı gösterilmiştir. Watanabe ve çalışma arkadaşları tarafından Japonya'da geliştirilen Unbonded (bağlanmamış) BRB (UBRB) sistemleri, bu alandaki ilk başarılı örneklerden biri olarak kabul edilmektedir (Watanabe, Hitomi, Saeki, Wada ve Fujimoto, 1988).

Deneysel ve analitik çalışmalar, BRB sistemlerinin geleneksel çapraz sistemlere kıyasla daha fazla enerji sönümleyebildiğini, daha az kalıcı deformasyon oluşturduğunu ve daha kontrollü bir histerik davranış sergilediğini göstermektedir (FEMA, 2000: 3-37).

Bu nedenlerle BRB sistemleri, pasif enerji sönümleme amacı taşıyan yapılar için yüksek süneklik, düşük bakım gereksinimi ve üstün sismik performans sunan güvenilir çözümler arasında yer almaktadır.



Resim 3.4. BRB (Zhuge, Ma ve Zeng, 2022)

Sürtünmeli sönümleyiciler

Sürtünmeli sönümleyiciler, birbirine temas eden iki yüzey arasındaki sürtünme kuvvetiyle enerji sönümleme sağlar. Sistem, bir yük altında belirli bir sürtünme kuvvetini aşınca kayma hareketiyle enerjiyi dağıtır. Hem yatay hem de düşey kuvvetlerin kontrolünde etkili olduğu için çok katlı yapılarda sıkça tercih edilmektedir (Pall ve Marsh, 1982; Soong ve Dargush, 1997: 57-65).

Pall tipi sönümleyici

Bu sönümleyici sistemi, 1980'li yılların başında A. S. Pall tarafından geliştirilmiş ve ilk olarak Kanada'daki kamu binalarında uygulanmıştır (Pall ve Marsh, 1982). Pasif sönümleyici sistemler içerisinde basit ama etkili olması ile literatürde önemli bir yer edinmiştir.

Pall tipi sönümleyicinin temel çalışma prensibi, birbirine paralel konumlandırılmış çelik plakalar ve bunların arasına yerleştirilen çelik dolgu levhaların sürtünmesi üzerine kurulmuştur. Yapıya etkiyen ek kuvvetler neticesinde çerçeveler arasında oluşan göreli yatay deplasman oluşması ile kendiliğinden aktif hale gelirler. Plakalar arasındaki hareket sayesinde oluşan sürtünme kuvveti ile meydana gelen sismik enerji ısıya dönüştürülerek sönümlenir.

Pall tipi sönümleyici, sismik yüklerden bağımsız olarak kullanılan malzeme çiftinin özelliklerine bağlı sabit bir sürtünme kuvveti üretir. Söz konusu sönümleyici genellikle kolon ve kiriş elemanları arasında, çapraz veya diyagonal biçimde yerleştirilmiş olan bir bağlantı sisteminin içerisine entegre edilir (Resim 3.5). Oluşturulan bu bağlantılar, sabit sürtünme kuvvetini aşmadıkça hareket etmemekte, ancak sürtünme kuvveti aşıldığında levhalar arasında kontrollü bir kayma gerçekleştirir. Bu sayede yapı, belirli bir noktaya kadar rijit davranışına devam edebilirken, bu eşiğin aşıldığı durumlarda sistemin devreye girmesi ile sönümleme yapabilmektedir. Pall tipi sönümleyicilerin en temel hesaplaması, Coulomb sürtünmesi yasasına dayanır (Eşitlik 3.4).

$$F_f = \mu * N \qquad (3.4)$$

F_f: Sürtünme kuvveti

μ: Sürtünme katsayısı (genellikle 0,3–0,4 aralığında)

N: Normal kuvvet (cıvata sıkma kuvveti ya da plaka basıncı)

Bir döngüsel yüklemede sönümlenen enerji ise Eşitlik 3.5'le hesaplanabilmektedir.

$$E_d = 4 * F_f * \Delta \quad (3.5)$$

E_d: Bir tam döngüde sönümlenen enerji

Δ: Maksimum göreli deplasman



Resim 3.5. Pall tipi sönümleyici (Shao, Pall ve Soli, 2006)

SBC tipi sönümleyici (Slotted bolted connection)

SBC (Oval Delikli Cıvatalı Bağlantı) tipi sönümleyici sistemi, ilk olarak Fitzgerald ve çalışma arkadaşları tarafından deneysel olarak incelenmiş ve özellikle çelik yapılarda deprem performansını iyileştirme amacıyla önerilmiştir (Fitzgerald, Anagnos, Goodson ve Zsutty, 1989). Klasik cıvatalı çelik bağlantı detaylarının, sönümleme oluşturacak şekilde yeniden tasarlanması ile SBC tipi sönümleyiciler geliştirilmiştir.

Bu sistemin çalışma prensibi, oval delik içeren çelik levhalar ile bu levhaları bir arada tutan yüksek dayanıma sahip cıvataların, yükleme altında oval delik içerisinde kısıtlı derece kaymasına izin vermesi ve neticesinde bağlantı düzlemlerinde sürtünme kuvvetinin oluşup, enerjinin ısıya dönüştürülerek sönümlenmesi mantığına dayanır (Resim 3.6). Bu sistemler hem çekme hem de kayma kuvvetleri altında çalışabilmektedir. Bileşen elemanların arasında oluşan kontrollü sürtünme kuvveti, cıvataların belirli bir sıkma kuvveti bağlantıya dahil edilmesi ile sağlanır.

Pall tipi sönümleyicilerde olduğu gibi SBC tipi sönümleyicilerde de enerji sönümleme kapasitesi, öncelikle sabit sürtünme kuvvetine bağlıdır. Bu kuvvet Coulomb sürtünmesi prensibi ile hesaplanır (Eşitlik 3.4). Bu sistemde birden fazla cıvata bulunduğu için, toplam sürtünme kuvveti Eşitlik 3.6 ile ifade edilir:

$$F_f = n_b * \mu * F_{pre} \quad (3.6)$$

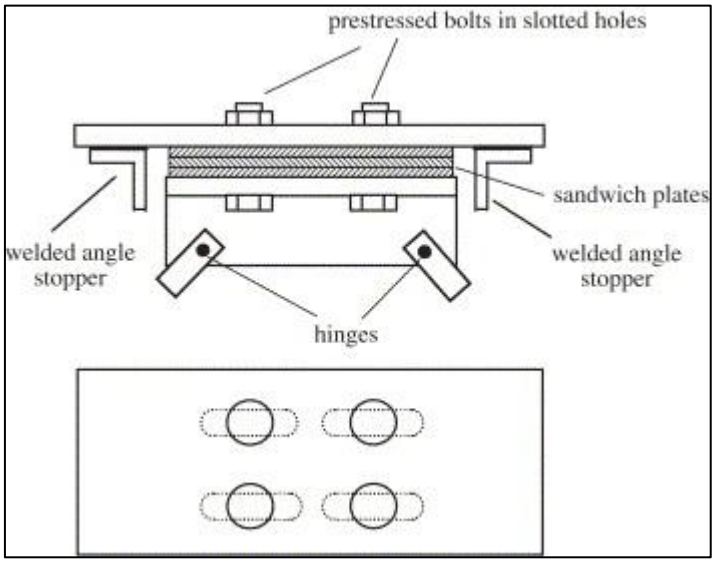
n_b: Cıvata sayısı
F_{pre}: Cıvataların ön çekme kuvveti

Enerji sönümlemesi ise, her bir yükleme döngüsünde sistemin yaptığı mekanik iş ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.7).

$$E_d = 2 * F_f * \Delta \quad (3.7)$$

E_d: Tüketilen enerji
Δ: Göreli kayma mesafesi

SBC sisteminde yarık boyu, maksimum Δ değerini sınırlayan fiziksel parametredir. Bu nedenle sistemin sönümleyebileceği enerji miktarı yarık uzunluğuyla doğrudan ilişkilidir (Fitzgerald ve diğ., 1989).



Resim 3.6. SBC tipi sönümleyici (Law, Wu ve Chan, 2006)

Geliştirilmiş pall tipi sürtünme sönümleyici

Klasik Pall tipi sönümleyici sisteminin tasarım ve performans açısından incelenip optimize edilmesi ile Geliştirilmiş Pall tipi sönümleyiciler literatüre girmiştir. Bu sistem, Wu ve çalışma arkadaşlarının, klasik tasarımda gözlemlemiş oldukları bazı sınırlayıcı faktörleri ortadan kaldırmak amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda, klasik düzlemsel yerleşim yerine, yükün eşit dağılmasını sağlayan geometrik düzenleme yapılmış, kayma bölgeleri simetrik şekilde tasarlanmış, yükleme döngülerinde enerji sönüm kapasitesinin azalması engellenmiş ve hem düşük deplasman hem de düşük kuvvet karşısında da aktif hale gelmesini sağlamışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Geliştirilmiş Pall Tipi sönümleyicinin klasik sisteme göre %20 – 40 oranında daha fazla enerji sönümlediği ve yükleme döngüsü sayısı arttıkça bu oranın muhafaza edildiği gözlemlenmiştir (Wu, Zhang, Williams ve Ou, 2005).

.

Bu sönümleyici de klasik sönümleyici gibi Coulomb sürtünmesi ilkesine (Eşitlik 3.4) dayanmakla birlikte, yüzey temas alanlarının sayısı ve konumu daha etkili kullanılmaktadır. Enerji sönümlemesi ise Eşitlik 3.7'ye benzer olarak yapılan değişiklikler sonucunda Eşitlik 3.8'de görüldüğü üzeredir (Wu ve diğ., 2005).

$$E_d = 4 * F_f * \Delta \tag{3.8}$$

F_f: Sürtünme kuvveti
E_d: Tüketilen enerji
Δ: Maksimum kayma mesafesi

3.1.2. Hıza bağlı sönümleyiciler

Pasif sönümleyici türlerinin ikinci sınıfı olan hıza bağlı sönümleyiciler, deprem kuvvetleri etkisi ile yapıda oluşan hareketler sırasında meydana gelen göreli hızlara karşı, bu hızlarla orantılı olarak direnç kuvveti oluşturan sistemlerdir. Bu sistemler, viskoelastik katı sönümleyiciler ve viskoz sıvılı sönümleyiciler olarak iki ana başlıkta gruplandırılmaktadır (Soong ve Dargush, 1997: 49-55).

Viskoelastik katı sönümleyiciler

Viskoelastik katı sönümleyiciler, sistemde kullanılan malzemelerin hem viskoz hem de elastik davranışlar göstermesi ile sönümleme yapabilen pasif sistemlerdir. Bu sistemlerde kullanılan malzemeler genellikle elastomerik polimerlerdir. Söz konusu sistemler hem deformasyon sırasında hem şekil değiştirir hem de iç sürtünme kuvveti oluşturarak enerjiyi sönümler. Bu iki etki sayesinde uygulanmış olduğu yapılarda hem bir miktar rijitlik artışı sağlanabilir hem de titreşim enerjisi azaltılabilir (Mahmoodi, Robertson, Yontar, Moy ve Feld, 1987). Viskoelastik katı sönümleyiciler de üretim şekline göre, katmanlı kauçuk sönümleyiciler ve polimerik blok sönümleyiciler olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

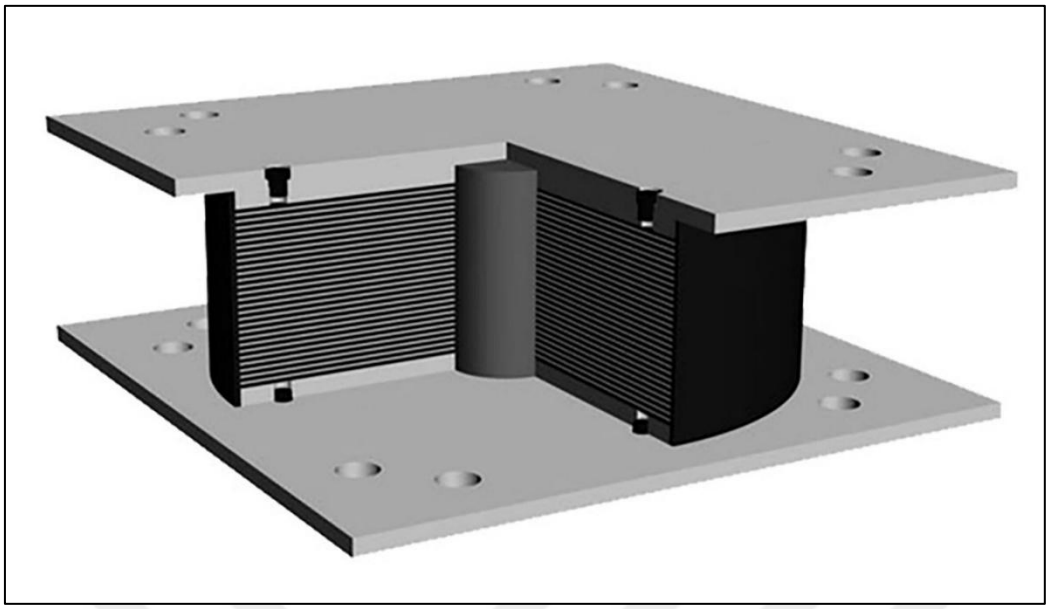
Katmanlı kauçuk sönümleyiciler

Kauçuk esaslı viskoelastik tabakalar ve ince çelik levhaların sıra sıra yerleştirilerek oluşturulan sistemlerdir (Resim 3.7). Bu sistemler, genellikle iki yapısal eleman arasında yatay doğrultuda konumlandırılarak kullanılır. Yapıya etki eden sismik kuvvetler altında bu katmanlarda, kesme deformasyonu oluşur ve deformasyon sırasında ortaya çıkan iç sürtünme ile enerjiyi sönümler (Soong ve Dargush, 1997: 85-95).

Çelik levhalardan oluşan ara katmanlar, dengeli deformasyon oluşumunu ve yükün daha geniş alana dağılmasını sağlar. Kullanılan kauçuk katmanlar rijit olmamasına karşın deformasyon kapasitesine sahiptir. Katmanların bir araya gelmesi ile oluşan sistem hem esnek davranış gösterirken hem de yeniden merkezleme kapasitesi oluşturması ile uygulandıkları yapıların kalıcı deformasyonlarını kısıtlar (Wang, Pan, Zhou ve Huang, 2020).

Düşük genlikli ve tekrarlı yüklere karşı oldukça verimli olmalarının yanı sıra sessiz çalışan bu sistemler, uzun ömürleri ve mecburi durumlar hariç bakım gerektirmemesi sebebiyle altyapı sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Katlar arasında oluşan göreli hareketi kısıtlamak amacıyla Dünya Ticaret Merkezi kulelerinde katmanlı kauçuk sönümleyiciler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan rapora göre, yapı titreşimlerinin ve rüzgâr etkilerinin azaldığı, kullanıcıların ise konforunun arttığı gözlemlenmiştir (Mahmoodi ve diğ., 1987).



Resim 3.7. Katmanlı kauçuk sönümleyici

Polimerik blok sönümleyiciler

Polimerik blok sönümleyiciler, katmanlı kauçuk sönümleyicilerin aksine birden fazla bileşenden oluşmak yerine tek parça halinde kalıplara dökülen viskoelastik malzemeden oluşan sistemlerdir (Resim 3.8). Bu sistemler genellikle izolatör olarak veya lokal sönümleyici olarak küçük ölçekli yapılarda kullanılmaktadır. Oluşturulan bloklar silindirik ya da dikdörtgen şekillerden oluşturulmaktadır. Blokların yük taşıma kapasitesi kullanılan malzemenin sertliğine göre farklılık gösterir ve bu malzemede deformasyon sırasında oluşan iç sürtünme ile enerjiyi sönümler (Xu, Xu, Guo, Dong, Ge ve Xu, 2021). Üretiminin kolay olması ve maliyetinin düşük olmasıyla beraber, düşük sıcaklıklarda viskoz özelliğinin zayıflaması, uzun süreli tekrarlı yüklemelerde performansının azalması ve yüksek genlikli hareketlere uygun olmaması gibi olumsuzluklara da sahiptir. Polimerik blok sönümleyicilerde deformasyon çoğunlukla kesme formunda oluşmaktadır ve sönümlediği enerji Eşitlik 3.9 ile hesaplanabilir (Soong ve Dargush, 1997: 85–90).

$$E_d = \int_0^t \tau(t) * \gamma(t)\, dt \qquad (3.9)$$

$\tau(t)$: Zamanla değişen kesme gerilmesi

$\gamma(t)$: Zamanla değişen kesme şekil değiştirmesi

E_d: Sönümlenen enerji



Resim 3.8. Polimerik blok sönümleyici

Viskoz sıvılı sönümleyiciler (FVD)

Viskoz sıvılı sönümleyiciler (Fluid viscous dampers – FVD), pasif sistemler içerisinde yüksek enerji sönümleme kapasitesi ile son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan piston ve silindir kılıftan oluşan sistemlerdir (Resim 3.9). Bu sistemlerde silindir içerisine hava boşluğu olmadan yerleştirilen yüksek viskoziteli sıvıların, yapıda oluşan göreli yer değiştirme sırasında pistonda bulunan kılcal açıklıklardan (orifis) geçmeye zorlanması ile direnç kuvveti oluşturulur. Bu geçiş sırasında viskoz sıvı içerisinde oluşan laminer veya türbülanslı akış sayesinde yüksek miktarda enerji sönümlenir (Berquist ve diğ., 2022). Ortaya çıkan bu direnç kuvveti hız ile doğrudan orantılıdır ve Eşitlik 3.10 ile hesaplanabilir.

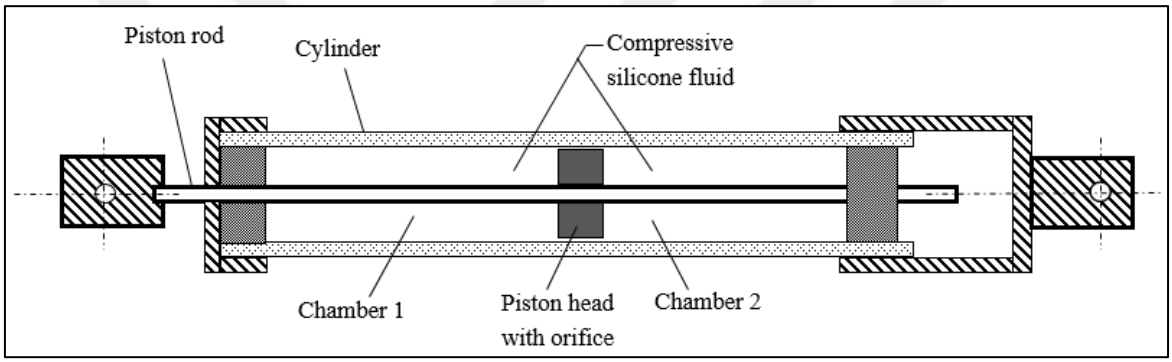
$$F = C * v^{\alpha} \tag{3.10}$$

F: Üretilen sönüm kuvveti
C: Sönüm katsayısı
v: Göreli hız
α: Hız üssü ($0,3 \leq \alpha \leq 1,0$)

Bu formülde C değeri, sönümleyicinin geometrik özelliklerine, kullanılan sıvının viskozitesine ve orifisin kesitine bağlı olarak belirlenir. Yapı içerisinde sönümleyicinin iki ucu arasındaki hız farkı ile göreli hız bulunur. Sönümleyici sistemin doğrusal viskoz

davranışında α değeri 1'e eşittir. Hız üssü değeri 1'e eşit olan sistemlerde oluşan direnç kuvveti göreli hıza doğrusal olarak bağlıdır (Makris ve Constantinou, 1991). Hız üssü değeri 1'den küçük olan sistemlerde ise sistem doğrusal olmayan bir davranış gösterir ve enerji sönümlemesinin daha geniş hız aralıklarında yayılmasını sağlayıp, sönümleyicinin daha yumuşak çalışmasını sağlar.

Viskoz sıvılı sönümleyiciler, yüksek enerji sönümleme kapasiteleri, geniş hız aralıklarında çalışabilmeleri, doğrusal ve doğrusal olmayan modellemelere yatkınlığı, çevresel etkilere karşı dirençli yapısı ve oldukça az bakım gerektirmesi gibi avantajları sayesinde yeni yapıların tasarımında ve mevcut yapıların güçlendirilmesinde tercih edilmektedir.



Resim 3.9. Viskoz sıvılı sönümleyici (Wang, 2017)

Tez konusu kapsamında tasarlanıp geliştirilecek olan sönümleyici türü, yukarıdaki avantajlar ve literatürdeki bazı boşluklar sebebi ile viskoz sıvılı sönümleyici olarak seçilmiştir. Bu sistemlerin, bölüm 3.4'te tarihsel gelişiminden ve bölüm 3.5'te geçmişteki çalışmalarından, literatürdeki boşluklardan ayrıca bahsedilecektir.

3.1.3. Diğer pasif sönümleyiciler

Yer değiştirmeye ve hıza bağlı çalışan sistemler haricindeki pasif sönümleyiciler bu gruba girmektedir. Bazı sistemler yapının doğal frekansına bağlı dinamik davranışlar veya plastik deformasyonların oluşmasını engelleyen elastik özellikler sayesinde enerjileri sönümler. Bu gruptaki sistemler özellikle köprü, gökdelen ve hassas teknolojik yapılar gibi titreşim kontrolü gereksinimi duyan yapılarda tercih edilir. Grup içerisinde, ayarlı kütle sönümleyiciler, ayarlı sıvı sönümleyiciler ve yeniden merkezleme sistemleri olmak üzere üç başlık altında ayrılmaktadırlar.

Ayarlı kütle sönümleyiciler (Tuned mass dampers - TMD)

Yapının rezonans frekansı ile uyumlu şekilde ayarlanmış olan bir kütle, yay ve sönümleyici elemandan oluşan sistemlerdir. Ayarlı kütle sönümleyicilerin çalışma prensibi, yapının hareket doğrultusuna zıt doğrultuda hareket eden bir kütlenin, genliği azaltarak oluşan enerjiyi sönümlemesi mantığına dayanır.

Çoğunlukla yapıların en üst katına, yapının doğal frekansına ayarlanmış şekilde yerleştirilen sistemler serbest bırakılır. Yapıda meydana gelen dinamik etkiler sonucunda pasif olarak kendiliğinden devreye girer ve sönümleme gerçekleştirir (Kareem, 1990). Bu sistemin en bilinen örneklerinden birisi Taipei 101 gökdeleninde kullanılmıştır (Resim 3.10).

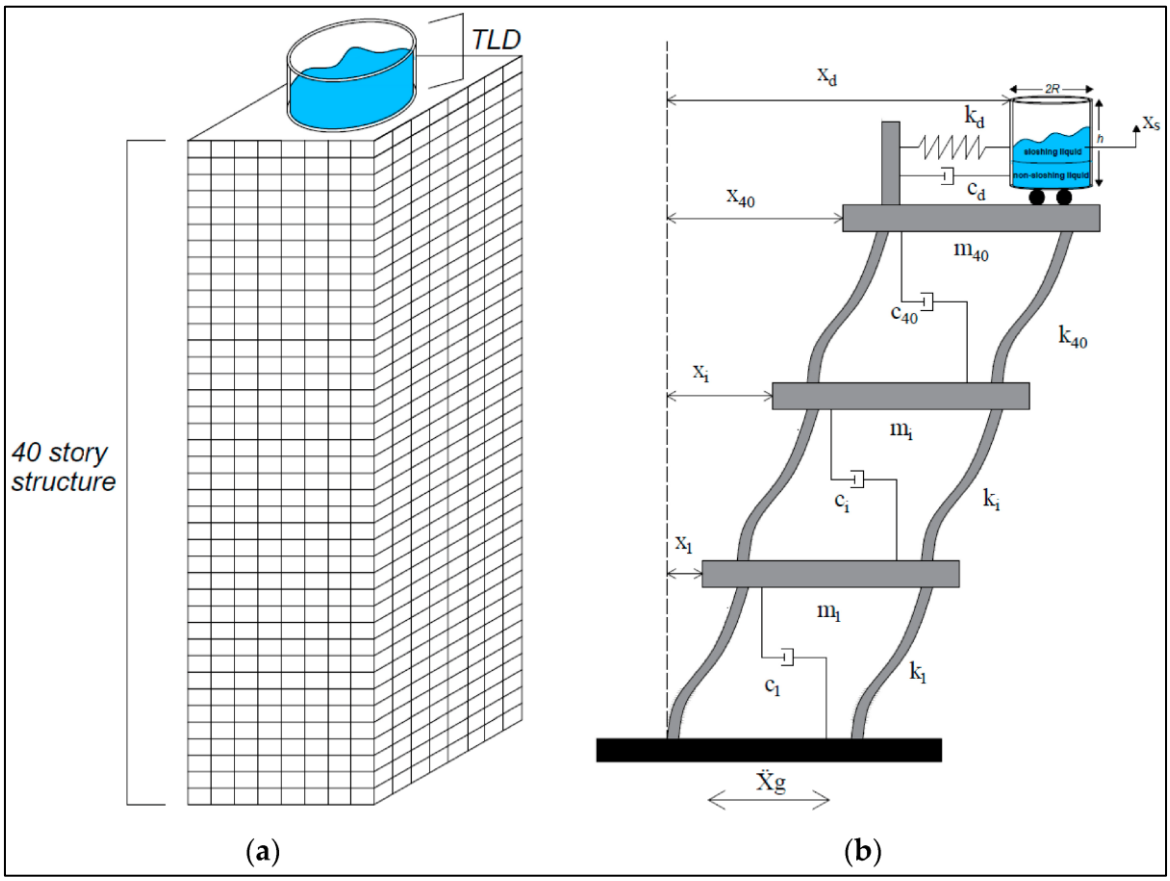


Resim 3.10. Ayarlı kütle sönümleyici

Ayarlı sıvı sönümleyiciler (Tuned liquid dampers - TLD)

Ayarlı kütle sönümleyicilerin çalışma mantığına benzer olarak çalışan bu sistemlerde katı kütleler yerine, bir hazne içerisine konulan sıvının yapıdaki hareket doğrultusuna zıt doğrultuda dalgalanma hareketi yapması (Resim 3.11) ile enerji sönümlemesi sağlanır (Sun, 1991).

Uygulanacak yapının doğal frekansına göre, sistemde kullanılacak olan sıvı türü, hazne boyutu, sıvı hacmi ve sıvı derinliği ayarlanır. Sönümleme büyük ölçüde dalgaların hazne kenarlarına çarpması ve sıvı içi sürtünme ile sağlanmaktadır.



Resim 3.11. Ayarlı sıvı sönümleyici (Ocak, Bekdaş, Niğdeli, Kim ve Geem, 2022)

Yeniden merkezleme sistemleri

Pasif olarak kendiliğinden yeniden merkezleyici kuvvet üretebilen bu sistemler, yapılarda deprem sonrasında kalıcı deplasman meydana gelmesini ortadan kaldırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu sistemler, çoğunlukla yay mekanizmaları, ardgermeli çelik çubuklar ve daha özel bağlantılar ile oluşturulur.

Yeniden merkezleme sistemlerinin en gelişmiş ve bilinen örneklerinden biri kendiliğinden merkezlenen çaprazlardır. Sistemde yay, ardgermeli çelik çubuk gibi elastik elemanlar ile sürtünme tipi sistemler gibi plastik enerji sönümleyicileri bir arada kullanılır. Sırası ile elastik elamanlar yeniden merkezleme sağlayarak yapının orijinal durumuna geri gelip kalıcı yer değiştirme olmasını önlerken, diğer bileşen oluşan enerjiyi sönümler.

Farklı konfigürasyonlar uygulanabilecek olan yeniden merkezleme sistemleri üzerine Chou ve Chen tarafından geliştirilmiş olan çift çekirdekli kendiliğinden merkezlenen çaprazlar, örnek verilebilir. Hem yeniden merkezleme yapabilen hem de yüksek enerji sönümü sağlayabilen bu pasif hibrit sistemler, hastane, okul ve veri merkezleri gibi önemli yapılarda uygulanmaktadır (Chou ve Chen, 2015).

3.2. Aktif Sönümleyici Sistemleri

Yapıya etki eden dinamik yükler sonucunda yapıda oluşan hareketi kontrol etmek amacıyla geliştirilmiş olan bu sistemler, pasif sönümleyici sistemlerden farklı olarak dışarıdan bir enerji kaynağına ihtiyaç duyan sistemlerdir. Bu sistemlerin temel çalışma prensibi, yapıya etki eden kuvvetlerin eş zamanlı olarak algılanması ve değerlendirilmesi sonrasında, dış enerji kaynağı sayesinde karşı kuvvetler üretilmesini sağlayarak yapı davranışının modifiye edilmesi mantığı üzerine kurulmuştur.

Aktif sönümleyici sistemlerin ilk sınıflandırması, yapısal mühendislikte "kontrollü sistemler" kavramını başlatan Yao (1972) tarafından yapılmıştır. Aktif sistemler, sensörler, kontrol ünitesi ve aktüatörler olmak üzere genel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır. Yapıdan gelen hız, ivme ve deplasman gibi veriler sensörler ile toplanır. Daha sonra kontrol ünitesi, sensörlerden elde edilen verilerin analizi yaparak, dinamik etkiye karşı verilebilecek en uygun karşı kuvveti hesaplar. Son olarak hesaplanan bu karşı kuvvetler, aktüatörler tarafından uygulanarak yapısal kontrol gerçekleştirilir.

3.2.1. Yapay kuvvet üreten sistemler

Yapı elamanlarına doğrudan kuvvet uygulayan cihazların kullanıldığı sistemlerdir. Yapıya aktüatörler tarafından uygulanan kuvvet, yapı üzerinde bulunan sensörlerden gelen verilerin analiz edilmesi ile hesaplanır (Soong ve Spencer, 2002). Kullanım alanları genellikle gökdelenler gibi yüksek ve rüzgâr kuvvetine karşı duyarlılığı olan, ağır köprüler ve havalimanı terminalleri gibi yüksek performans gerektiren yapılardır. Bahsi geçen yapılara destek sağlayan bu sistemlerde, çoğunlukla hidrolik, pnömatik veya elektromekanik aktüatörler görev almaktadır. Bunların içinde, yüksek ivmeli sistemlerde oluşabilen büyük deplasman ve kuvvetlere karşı uygulanacak tepkiyi sağlayabildiği için en çok hidrolik aktüatörler tercih edilmektedir (Preumont, 2011).

Yapılarda yüksek hassasiyetle kontrol sağlaması, çok modlu titreşimleri eş zamanlı bastırabilmesi ve gerçek zamanlı olarak sadece hedefe yönelik kontrol oluşturması gibi avantajları olmasına karşın, yüksek maliyeti, sisteminin karmaşık olması, dışarıdan bir enerji kaynağına tamamen bağımlı olması ve enerji kesintisi durumunda işlevsiz kalabileceği gibi dezavantajları da mevcuttur.

3.2.2. Gerçek zamanlı sensör-algılayıcı sistemleri

Yapay kuvvet üreten sistemlerin çok daha gelişmiş yüksek hızlı dijital formu olarak tanımlanabilen bu sistemler yüksek performanslı mikro denetleyiciler ve adaptif kontrol algoritmaları sayesinde, yapı sisteminden sensörler yardımı ile toplanan verileri gerçek zamanlı olarak işleyip değerlendirebilmektedir. Özellikle fuzzy logic, neural network ve genetic algortihm gibi yapay zekâ tabanlı algoritmalar son zamanlarda bu sistemlerde yayılmaya başlamıştır (Spencer ve Nagarajaiah, 2003). Genetic algorithm, çok sayıda değişken parametre üzerinde analiz yaparak sistemin en uygun yanıtını bulmaya çalışmaktadır (Preumont, 2011).

Bu algoritmalar, gerçek zamanlı verilerin hızlı bir şekilde analiz edilmesine ve doğru kararların alınmasına imkân tanımaktadır. Milisaniyeler içerisinde tüm süreçleri gerçekleştirebilen bu sistemler oldukça hassas ve sonuca yönelik kontrol imkânı sunmalarına rağmen bazı önemli sınırlılıklara sahiptir. Bunlar, diğer sistemde de olduğu gibi enerji bakımından tamamen dışarıya bağımlı olması, yüksek maliyeti, karmaşık yazılım ve donanımı sahip olması, en önemlisi hatalı bir veri gelmesi veya aktüatörlerce verilecek yanıtın gecikmesi durumunda yapının dengesinin bozulması riskidir (Soong ve Dargush, 1997: 155-165).

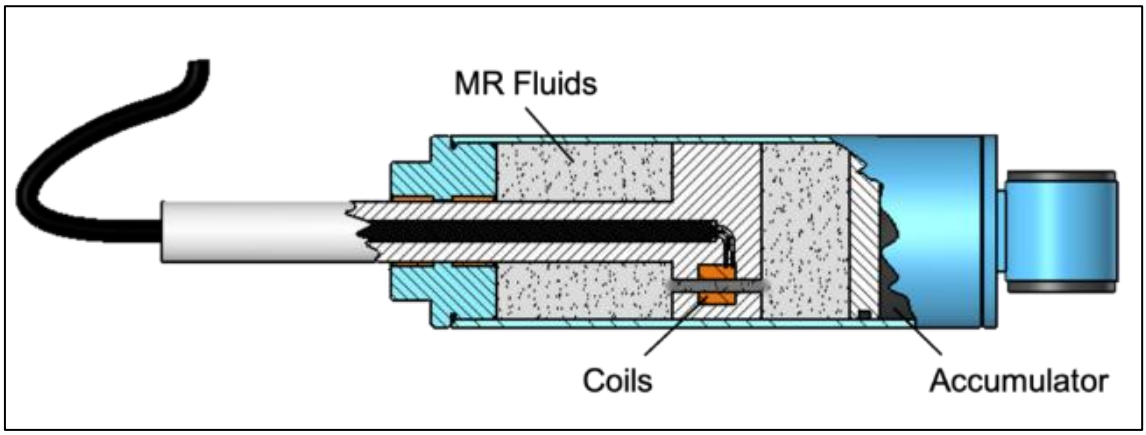
3.3. Yarı-Aktif Sönümleyici Sistemleri

Bu sistemler, pasif ve aktif sönümleyici sistemlerin avantajlarını birleştiren hibrit sönümleyicilerdir. Enerji sönümleme mekanizması pasif çalışma temeline dayansa da sistem davranışı dışarıdan bir enerji kaynağı kullanılarak aktif çalışma davranışı göstermesi sağlanabilir. Buradaki aktif çalışma davranışı sadece kontrol sinyalinin oluşturulmasından ibarettir, doğrudan bir kuvvet üretimi söz konusu değildir (Preumont, 2011).

Bu sayede, yarı-aktif sistemler dışarıdan gereken enerji miktarı bakımından aktif sistemlere göre daha uygun olurken, dış enerjinin kesilmesi gibi durumlarda pasif sistemler gibi çalışabilmesi yeteneği ile dinamik etkilere karşı direnç sağlamaya devam edebilir. Bu sistemin aktif sistemlere göre daha az kompleks olması sebebiyle bakım maliyetleri de azalmaktadır (Spencer ve Nagarajaiah, 2003). Ancak bu sistemlerde de kontrol algoritmasının oldukça hassas olması gerekmektedir. Sistemin optimizasyonu yapılmadığında dinamik etkilere karşı ortaya çıkan direnç yetersiz olabilir. Yarı-aktif sönümleyici sistemler, manyetoreolojik ve elektroreolojik, inerter tabanlı elektromanyetik sönümleyiciler olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir.

3.3.1. Manyetoreolojik ve elektroreolojik sönümleyiciler

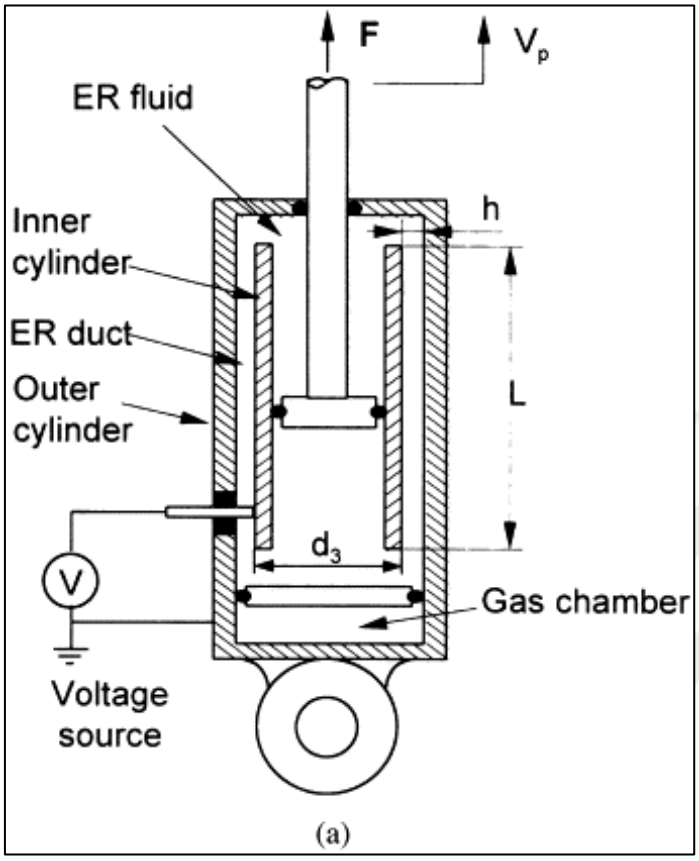
Yarı-aktif sistemlerin en yaygın türlerinden biri manyetoreolojik (MR) ve elektroreolojik (ER) sönümleyiciler olarak gözlenmektedir (Resim 3.12 ve Resim 3.13). Bu sönümleyicilerde temel çalışma prensibi, manyetik veya elektrik alan uygulanarak sönümleyici içerisinde bulunan sıvının viskozitesinin gerçek zamanlı olarak değiştirilmesi mantığı üzerine kuruludur. MR sönümleyicilerdeki sıvıların içerisinde süspansiyon halinde ferromanyetik tanecikler bulunur. Manyetik alan uygulandığında sıvı içerisindeki tanecikler hızlanır, böylece sıvı akmaya karşı daha fazla direnç gösterir ve bunun bir sonucu olarak sönümleme kuvveti artar.



Resim 3.12. Manyetoreolojik sönümleyici

Benzer şekilde ER sönümleyicilerde sıvı içerisinde bulunan dielektrik tanecikleri, uygulanan elektrik alan ile hizaya girer ve sıvının akış özelliğini anlık olarak değiştirerek sönümleme kuvvetini artırır. ER sıvıları daha uygulanan alana daha hızlı tepki gösterir ancak sıcaklık,

nem ve yaşlanma gibi çevresel şartlara karşı MR sıvılara kıyasla daha hassastırlar (Liu, Zhang ve Spencer, 2001).



Resim 3.13. Elektroreolojik sönümleyici (Park, Choi ve Suh, 1999)

3.3.2. İnerter tabanlı elektromanyetik sönümleyiciler

Klasik viskoz sönümleyicilerden farklı olarak bu sistemler, sistemdeki ivme bileşenine bağlı olarak direnç üreten inerter elemanlar içerir. İnerter eleman, hareket eden başka bir bileşenin momentumunu artırarak ivmeye karşı tepki üreten bir mekanizmadır. Sistemdeki elektromanyetik bobinler, bu ivme farkına göre manyetik direnç üretirler. Sistem içeriği sırasıyla, genellikle paralel bağlantı kullanılarak birleştirilmiş olan yay, inerter ve elektromanyetik amortisör ile oluşturulmuştur. Böylece, sönümleme davranışı frekansa bağlı bir değişken haline getirilmiştir. Düşük frekansta sistem daha rijit bir davranış gösterirken, yüksek frekans mevcutken daha yumuşak ve sönümleyici bir tepki gösterir. Bu sistem ilk kez Shen ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve test edilmiştir (Shen, Long, Cai, Niyitangamahoro, Zhu, Li, ve Qiu, 2022).

3.4. FVD'lerin Tarihsel Gelişimi

Sıvı viskoz sönümleyiciler, güncel olarak yapı mühendisliği alanında dinamik enerjileri sönümlemek ve yapıların davranışını iyileştirmek amaçlı kullanılmasına karşın, bu sistemlerin tarihsel gelişimi askeri mühendislik ihtiyaçları doğrultusunda oluşmuştur. FVD'lerin ilk uygulamaları 19. Yüzyılın sonlarında büyük kalibreli askeri topların geri tepme kuvvetlerinin kontrol edilmesi amacıyla ortaya çıkmıştır.

İlk modern askeri top olarak kabul edilen 1897 model 75 mm'lik Fransız yapımı sahra toplarında bu teknoloji kullanılmıştır. Bu toplar, sahip olduğu gliserin bazlı viskoz sıvı içeren piston mekanizmaları sayesinde her atıştan sonra kendiliğinden batarya pozisyonuna dönebilmekte ve böylece atış sürelerini ciddi oranda azaltmakta başarılı olmuştur (Taylor Devices, 2019). 1.ve 2. Dünya Savaşları sırasında askeri alanda daha etkinliği ve yaygınlığı artan bu sistemler savaşlardan sonra otomotiv endüstrisinde süspansiyon sistemlerinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Soğuk Savaş Döneminde balistik füze ve nükleer sistemlerde kullanılmaya başlanmış ve bu sistemlerin askeri alandaki varlığı devam etmiştir.

Soğuk Savaş Döneminin 1990'lı yılların başında sona ermesi ile birlikte, savunma sanayisi kapsamında çalışma yürüten şirketlerin teknoloji uygulamalarını sivil sektöre yönlendirmesi hızlanmıştır. Askeri sönümleyicileri uzun yıllar üreten ve geliştirme yapan Taylor Devices Inc., bu kapsamda ilk deneysel uygulamalarını hastaneler, köprüler ve çok katlı yapılar üzerinde, SUNY Buffalo Üniversitesi ile ortak çalışmalar sonucunda ortaya koymuştur. Arrowhead Bölge Tıp Merkezi'nde, ilk büyük ölçekli uygulamalardan biri yapılmıştır. Bu uygulamada, 1219,20 milimetre (48 inç) genlik uzunluğuna ve 14234,31 kN (3 200 000 lb) kuvvet kapasitesine sahip 186 adet viskoz sıvılı sönümleyici kullanılmıştır. Kullanılan bu sönümleyiciler sayesinde mevcut yapıdaki etkin sönümleme oranı %35'e kadar artırılmış ve deprem süresince oluşan hasarların sınırlı düzeyde tutulabildiği gözlemlenmiştir (Berquist ve diğ., 2022). Bu uygulamadan sonraki süreçte yapılan onlarca proje neticesinde FVD'ler, yapı mühendisliğinde kabul görmüş bir pasif sönümleyici durumuna gelmiştir. Günümüzde hem yeni yapılarda hem de mevcut yapıların sismik rehabilitasyon projelerinde sıkça tercih edilmeye devam etmektedir.

3.5. FVD'lerin Tasarım Testleri

Yapı sistemlerinde güvenilir ve etkili bir şekilde kullanabilmek adına FVD'lere tasarım ve üretim sürecinde çok aşamalı testler tabi tutulmaktadır. Entegre edildiği yapıların performanslarını doğrudan etkilediği için bu sistemlerin, tahmin edilen sınırlar içerisinde beklenen davranışları sergilediğinin ve tasarım parametreleri ile paralel şekilde enerji sönümleyebildiğinin teyit edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda tabi tutulan testler, tip testleri, fabrika testleri ve üçüncü taraf testleri olarak üç ana grupta sınıflandırmak mümkündür (Taylor ve Constantinou, 1994 – Taylor Devices, 2019: 108-110).

3.5.1. Tip testleri

Tip testleri, tasarım aşamasında geliştirilmiş olan FVD prototiplerinin maksimum kapasite sınırlarında maruz kalabileceği tüm mekanik ve çevresel şartlara karşı nasıl davrandığının değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapılan bu testler, sistemin doğrusal veya doğrusal olmayan davranışlarını, hıza bağımlı sönüm davranışlarını ve yapısal bütünlüğünü inceleyerek doğrulanmasını hedeflemektedir (Feng, Ding ve Song, 2007).

Çekme-basınç döngüsel yükleme testleri

FVD'lerin yapısal performanslarının değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan testlerden biridir. Bu testler çekme ve basınç durumlarında, belirli bir hız ve deplasman aralığında sistemin nasıl bir enerji sönümleme davranışı ortaya koyduğunu gözlemlemek amacı ile yapılmaktadır (Makris ve Constantinou, 1991). Bu davranışı gözlemlemek için FVD'ler sinüzoidal, üçgen veya trapezoidal şeklindeki döngüsel deplasmanlara maruz bırakılmakta olup bu süreçte çoğunlukla hidrolik bir test sistemi kullanılmaktadır. Her döngüden sonra elde edilen histerezis döngüsü yani kuvvet-deplasman eğrisi, FVD'nin enerji sönümleme yeteneğini ile birlikte doğrusal veya doğrusal olmayan viskoz davranışının nicel olarak ortaya konulmasını sağlamaktadır. Söz konusu testler, özellikle aşağıdaki performans kriterlerinin ölçülmektedir:

- Histerezis eğrisinin alanı
- Maksimum çekme ve basınç kuvvetleri
- Rijitlik bozulması

- Plastik deformasyon eğilimi
- Döngüsel tekrarlarda performans kararlılığı.

Makris ve Constantinou (1991) tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan çekme-basınç testleri sonucunda elde edilen veriler ile geliştirilmiş olan "Kesirli Türev Maxwell Modeli", özellikle düşük döngülü sarsıntılarda FVD'lerin frekans ve hıza bağımlı davranışını başarılı bir şekilde çözümlemiştir. Bununla birlikte test sonuçlarında gözlemlenmiş olan histerezis döngüleri ile prototipin ön tasarımları ile büyük ölçekte korelasyon sağlanmıştır.

Benzer şekilde, Cavaleri ve diğerleri (2017) tarafından yapılan deneylerde, düşük hızlarda uygulanan çekme-basınç döngüsel yüklemeleri neticesinde klasik FVD modellerin yetersiz kaldığı ve gerçek sönümleyici davranışının geniş hız aralıklarında kayda değer farklılıklar gösterdiği ortaya konmuştur.

Taylor Devices Inc. (2019) tarafından yayımlanmış olan mühendislik kılavuzunda ise bu testlerin enerji sönümleme performansını değerlendirmesinin yanı sıra, sönümleyicinin iç bileşenlerinin tekrarlı yükler altındaki mekanik tutarlılığını değerlendirmede de kullanıldığına işaret edilmiştir.

Harmonik yükleme testleri

FVD'lerin frekans temelli davranışlarını değerlendirmek için kullanılan en önemli testlerden biridir. Bu test kapsamında sönümleyici, belirli genlik ve frekansta, periyodik kuvvet ve deplasmanlara maruz bırakılmaktadır. Bu sayede sönümleyicinin dinamik rijitliği ve sönümleme kapasitesi frekansa bağlı olarak ölçülebilir duruma gelmektedir (Makris ve Constantinou, 1991). Harmonik yükleme testleri, bu doğrultuda en uygun sönüm katsayısı (C) ve hız üssü (α) değerlerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Hız kontrollü ve kuvvet kontrollü olmak üzere iki farklı yöntemle uygulanabilmektedir. Hız kontrollü yöntemde piston, sabit genlikli ve belirli bir frekansta ileri geri hareket ettirilmesi sonucu elde edilen kuvvet-zaman eğrileri kullanılarak sönüm kuvveti hesaplanmaktadır. Kuvvet kontrollü yöntemde ise sönümleyici periyodik kuvvetlere maruz bırakılır ve hız, deplasman sonuçları kullanılarak sönüm kuvveti hesaplanır. Bu testlerde ölçülen en önemli büyüklüklerden biri, faz farkıdır. Pistonun deplasman eğrisi ile sönümleyicinin üretmiş olduğu kuvvet eğrisi arasındaki faz farkı, sönümleme davranışının frekansa olan

bağımlılığını doğrudan göstermektedir. Tam elastik bir sistemde bu fark 0° iken tam viskoz sistemde 90°'dir. FVD'lerde bu değer tipik olarak 20–70° aralığında olmaktadır (Makris ve Constantinou, 1991).

Yüksek hız darbe testleri

Bu testler, FVD'lerin ani ve yüksek dinamik etkilere karşı davranışını değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Yüksek hızlara karşı sönümleyicinin stabil davranış sergileyip sergilemediği bu testler ile belirlenir. Yüksek hız darbe testlerinde sönümleyici pistonuna tasarım hızlarının çok daha üzerindeki hızlar ile hareket verilerek, sistemin sızdırmazlığı, ani basınç artışlarına karşı tepkisi ve iç bileşenlerin dayanımı incelenmektedir (Taylor Devices Inc., 2019). Özellikle orifis yapılarının yüksek hızlarda hidrolik kilitlenme yapmadan çalışmaya devam edip etmediğinin gözlemlenmesini mümkün kılmaktadır. Bu kilitlenme olmadan orifisin çalışmaya devam etmesi önemli bir başarı kriteri olarak nitelendirilmektedir. Makris ve Constantinou (1991), yüksek hız darbe testlerinin FVD'lerde doğrusallıktan sapmaların hangi hız aralığında başladığını belirlemek için kullanıldığını vurgulamaktadır.

Termal performans testleri

FVD'lerin farklı çevresel sıcaklıklarda ortaya koyduğu davranışın değerlendirilmesi amacıyla yapılan testlerdir. Sönümleyicilerin içerisinde viskozitesi sıcaklığa karşı duyarlı sıvılar kullanılmaktadır. Hu, Yang, Meng ve Hu (2023), sönümleyicilerin soğuk ortamlarda daha sert davranış sergilerken, sıcak ortamlarda ise daha yumuşak bir davranış sergilemesi nedeni ile sönümleyici sıvısının vizkozitesindeki değişimlerin performansta sapmalara neden olabileceği için enerji sönümleme kapasitesinin sıcaklık değişimlerinde korunup korunmadığının testler ile doğrulanması gerektiğini belirtmiştir. Uygulanan test kapsamında sönümleyici, genellikle -40 °C ila +70 °C arasında değişen sıcaklıklarda döngüsel yüklemeye maruz bırakılmaktadır. Testten hemen öncesinde sistemin, sıcaklık odasında belirli bir süre bekletilerek termal dengeye ulaşması sağlanmaktadır. Termal dengeye ulaşan sisteme standart hız ve deplasmanlarda döngüsel çekme-basınç yüklemesi uygulanarak histerezis eğrileri oluşturulur. Bu eğrilerdeki alan değişimi, sıcaklık ile sönümleme kapasitesi arasında ilişkiyi vermektedir.

3.5.2. Fabrika testleri

Fabrika testleri, üretimi tamamlanmış olan her bir sönümleyicinin kalite kontrolü amacıyla yapılmakta olan seri testlerdir. Üretim kaynaklı hata olasılıklarını en aza indirgemek ve sönümleyicilerin tasarım kriterlerine uygun çalıştığını belgelemek amacıyla uygulanmaktadırlar (Taylor Devices Inc., 2019: 17-21)

Histerezis döngüsü ölçümü

Sönümleyicilerin belirli bir hızda ileri geri hareket ettirilmesi ile elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi oluşturulur. Bu eğrinin alanı ile sönümleyicinin bir döngüdeki absorbe ettiği enerji hesaplanır. Ayrıca başlangıç davranışını, tekrarlayan yüklerde ne ölçüde koruyabildiği ölçülür. Bulunan değerler ilgili standartlar tarafından belirlenen aralıkta olmalıdır.

Kuvvet–hız eğrisi ölçümü

Sönümleyicinin pistonuna farklı hızlarda hareket uygulanarak, her hızda ürettiği kuvvet ölçülmektedir. Eşitlik 3.10'da bulunan parametrelerin doğrulanmasını sağlamaktadır.

Sıvı sızdırmazlık testi

Yüksek basınç altında sönümleyici gövdesinde sızıntı olup olmadığı kontrol edilmektedir. Bu test, cihazın uzun süreli kullanımda sıvı kaçırma veya conta aşınması gibi olasılıkları belirlemek açısından kritik öneme sahiptir (Feng, Ding ve Song, 2007).

Çalışma sıcaklığı testleri

Sönümleyicinin -40 °C ile +70 °C aralığında çalışma performansı gözlemlenmektedir. Sönüm davranışının sıcaklık ile beraber ciddi oranda değişmediğini doğrulamak için yapılan testlerdir (Taylor Devices, 2019: 19-21).

3.5.3. Üçüncü taraf testleri

Araştırma kuruluşları ve bağımsız laboratuvarlarca, üretici firmaların ortaya koymuş olduğu sönümleyicilerin beyan edilen performansların tarafsız olarak doğrulanması ve ilgili standartlara uygunluğunun belgelenmesi için yapılan testlerdir.

ASTM (American Society of Testing and Materials) E21216 ve ISO (International Organization for Standardization) 16670 gibi uluslararası standartlar, bu testlerin prosedürlerini belirli adımlar ve tanımlarla sınırlandırmaktadır. Bu sayede test sonuçları farklı proje ve üretici firmalar arasında karşılaştırılabilir hale gelmektedir. Türk Standartları Enstitüsü'nde (TSE) ise TS EN 15129 standardı tüm bu tasarım testlerini sınırlamaktadır. Bu standardın 7.4 bölümünde genel, tip testleri ve fabrika üretim kontrolü olmak üzere üç başlıkta sınırlamalar belirtilmektedir (TSE, 2020; ISO, 2003; ASTM International, 2011)

Genel

Standarda göre genel testler, sönümleyiciye etki eden toplam enerjinin, deprem sırasında sönümleyici tarafından absorbe edilen enerjinin iki katını geçmemesi kriterine göre test gruplarına ayrılmalıdır. Sönümleyiciye büyük oranda enerji etki edeceği için, sönümleyici üzerinde art arda testler yapılarak aşırı ısınmasının önlenmesi amacıyla test programı yapılırken dikkat edilmelidir. Bir test grubu yapıldıktan sonra sönümleyicinin belirlenen çalışma sıcaklığına kadar geri soğumasına izin verilmelidir. Sönümleyici bu sıcaklığı aştığında test yapılmaması gerekmektedir (TSE, 2020).

Tip testleri

Standardın 7.4.2 başlığına göre tip testleri, yeni bir sönümleyicinin sahip olduğu yük kapasitesinin veya tasarım hızının daha önce test edilmiş olan bir sönümleyiciden ± %20'den daha fazla olması durumunda yapılmaktadır. Önceki testlerin geçerli olması için, konsept tasarım ve malzemelerin önceden kullanılan malzemeler ile aynı olması gerektiği belirtilmektedir. Yapılacak olan kayıtların, testten 5 dakika öncesinde başlayıp testten 15 dakika sonrasına kadar devam etmesi gerekmektedir (TSE, 2020).

Basınç testi

FVD üzerine cihazın maksimum tasarım yükünün %125'ine karşılık gelen bir iç basınç uygulanmakta ve bu basınç değeri 120 saniye boyunca sabit tutulmaktadır. Yapılan bu testin amacı, uygulanan basınç süresince cihazda bir sıvı sızıntısı, fiziksel hasar veya performans azalmasının oluşup oluşmadığını gözlemlemektir (TSE, 2020).

Düşük hız testi

Bu test ile sönümleyicinin termal genleşmeler altında ortaya çıkabilecek eksenel tepkisi değerlendirilmektedir. Test kapsamında yapılan yükleme iki şekilde uygulanabilmektedir:

Sıfırdan başlayarak d_{th} kadar, ardından -d_{th} kadar deplasman uygulanarak sıfır olacak şekilde tam tersinir bir deplasman çevrimi uygulanmaktadır. Bu çevrim süresince hız sabit tutulmakta ve $0{,}01\ \frac{mm}{s} \leq v1 \leq 0{,}1\ \frac{mm}{s}$ aralığında seçilmektedir. Deplasman çevrimi boyunca sönümleyicinin oluşturduğu reaksiyon kuvveti, cihazın tasarım kuvvetinin %10'unu geçmemelidir veya tasarım şartnamesinde belirtilmiş ise daha düşük bir sınır kullanılması gerekmektedir.

İkinci uygulama şeklinde ise cihaz üzerine, tasarım kuvvetinin %10'una denk sabit bir kuvvet uygulanmakta ve ilk seçenekteki gibi tam tersinir çevrimsel deplasmanlar gerçekleştirilmektedir. Kaydedilen ortalama hız (v) Eşitlik 3.11 ile hesaplanmaktadır ve bu değerin $0{,}01\ \frac{mm}{s}$'nin üzerinde olması beklenmektedir.

$$v = \frac{2(|dth|+|-dth|)}{T} \tag{3.11}$$

d_{th}: Deplasman büyüklüğü
T: Çevrim süresi

d_{th} değeri tasarım şartnamesinde tanımlanmalıdır, ancak hiçbir durumda 10 mm'den daha küçük olmaması gerekmektedir. Test süresince eksenel kuvvetin ve deplasmanın sürekli olarak kaydedilmesi gerekmektedir ve ortam sıcaklığının 23 ± 5 °C aralığında olduğunda test gerçekleştirilmektedir (TSE, 2020).

Yapısal yasa testi

Bu testin amacı sönümleyicinin karakteristik kuvvet-hız eğrisinin elde edilmesidir. Bölüm 3.1.2'de daha önce verilmiş olan Eşitlik 3.10 ile parametreler belirlenmektedir Test kapsamında üç tam tersinir eksenel deplasman çevrimi gerçekleştirilmektedir. Uygulanan hızlar içerisinde en az, cihazın maksimum tasarım hızının %1, %25, %50, %75 ve %100 oranları bulunması gerekmektedir. Cihaza ait belirli bir hız için reaksiyon kuvveti ile ikinci çevrimin pozitif ve negatif kuvvet eksenlerinin kesişimlerinin mutlak değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

Tasarımda belirlenen en yüksek ve en düşük sıcaklıklarda da bu testin tekrar yapılması gerekmektedir. Böylece, sıcaklık değişiminin sönümleyicinin oluşturduğu tepki kuvvetine etkisi değerlendirilebilmektedir. Aynı sıcaklık aralığında veya daha geniş bir sıcaklık aralığında benzer sönümleyiciler üzerinde yapılmış test sonuçları varsa, bu testin tekrar yapılması zorunlu tutulmamaktadır (TSE, 2020).

Sönümleme verimliliği testi

Bu testin yapılma amacı, cihazın enerji sönümleme kapasitesini ve reaksiyon kararlılığını değerlendirmektir. Eşitlik 3.12'deki türde beş harmonik tam deplasman çevrimi uygulanmaktadır.

$$d(t) = d_0 * \sin(2\pi * f_0 * t) \tag{3.12}$$

d_0: Piston genliği
f_0: Frekans

Eğer beş çevrim test kapasitesinin üzerinde ise, test gruplar halinde gerçekleştirilebilmektedir. Ancak grup başına en az üç sürekli çevrim yapılmalıdır ve her bir çevrim grubu arasında sönümleyici için soğutma yapılmaması gerekmektedir. Yapısal yasa testinde belirlenmiş olan tepki kuvvetinin tasarım toleransının içinde olması ve enerji sönümlemesinin minimum tasarım değerinden büyük olması gerekmektedir (TSE, 2020).

Rüzgâr yükü çevrim testi

Sönümleyicinin, rüzgâr yüklerinin sebep olduğu düşük frekanslı ve tekrar eden titreşimlere karşı gösterdiği tepki kararlılığını ve dayanımını belirlemek amacıyla, rüzgâr etkilerinin kritik olduğu durumlarda bu test yapılmaktadır. Cihaz tasarım şartnamesinde verilen bir frekans ve deplasman için 200 çevrimsel yükleme boyunca test edilmektedir. Test süresince sönümleyicinin sıcaklığının sürekli ölçülmesi, cihazın herhangi bir noktada sıkışmaması, kitlenmemesi ve kırılmaması gerekmektedir. Ayrıca test tamamlandıktan sonra bir sıvı sızıntısı oluşmaması beklenmektedir (TSE, 2020).

Conta aşınma testi

Yapılan bu testin amacı, sönümleyicinin öngörülen tasarım ömrü boyunca termal etkilerden dolayı meydana gelecek deplasmanlara karşı, cihaz içerisinde yer alan sızdırmaz contaların özelliklerini koruyup korumayacağını belirlemektir. Sönümleyici, oluşması beklenen maksimum termal deplasmana eşit bir genlikte 10 000 çevrim boyunca test edilmektedir. FVD'ler genellikle düşük hızlarda da yüksek bir enerji sönümleme kapasitesine sahip oldukları için, cihaz içerisinde aşırı ısı birikimi oluşmadan testi gerçekleştirmek adına orifis sistemi baypas edilebilmektedir. Alternatif olarak, bu test için viskoz sıvı sistemden tamamen veya kısmen çıkarılabilmektedir. Conta aşınma testi tamamlandıktan sonra sönümleme verimliliği testi yapılmaktadır (TSE, 2020).

Piston genliği (Strok) belirleme testi

Piston genliği belirleme testinin kapsamı, sönümleyicinin tasarım deplasmanını karşılayabilmesini sağlamaktır. FVD'ye bir tam piston genliği çevrimi uygulanmaktadır. Bu test için sistemde viskoz sıvı bulunup bulunmaması fark etmemektedir. Sönümleyicinin tasarım değerinden en az 1 mm eksik piston genliği sağlaması gerekmektedir (TSE, 2020).

Fabrika üretim kontrolü

Fabrika üretim kontrolü testleri, basınç testi, düşük hız testi, yapısal yasa testi ve sönümleme verimliliği testini içermektedir. Bunlardan basınç testinin tüm ürünler için yapılması gerekirken, diğer testler her üretim partisinde sadece bir cihaz üzerinde

gerçekleştirilmektedir. Bir üretim partisi, aynı yapısal yasaya ve piston genliği hariç aynı tasarım detaylarına sahip en fazla yirmi cihazdan oluşabilmektedir. Üretim partisi içerisinden bir ürüne yapılacak testler için, piston genliği en büyük olan cihaz seçilmektedir. Söz konusu tüm testlerin ortam sıcaklığında yapılması gerekmektedir (TSE, 2020).

FVD'lerin farklı koşullarda güvenli çalıştığını belgelemek ve yapı performansına olan katkısını artırmak için çok aşamalı test süreçleri uygulanmaktadır. Tip testleri sistemin sınır performansını, fabrika testleri üretim kalitesini, üçüncü taraf testleri ise ulusal/uluslararası geçerliliğini güvence altına almaktadır. Bu testlerin bütünsel olarak uygulanması hem mühendislik tasarımının doğruluğunu hem de saha uygulamasının sürdürülebilirliğini sağlamaktadır.

3.6. FVD'lerin Tasarım ve Geliştirilmesine Yönelik Geçmişte Yapılan Çalışmalar

Dinamik etkilere karşı etkili bir sönümleme sağlayan FVD'lerin, tasarımı davranışları, modellenmesi ve deneysel olarak test edilmesi üzerine yapılmış çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır.

Makris ve Constantinou'nun geliştirmiş olduğu Kesirli Türev Maxwell Model'i, FVD'lerin viskoz akışkan davranışlarına bağlı dinamik tepkileri matematiksel olarak modelleyen öncü bir çalışmadır. Bu model, klasik doğrusal modellerin yetersizliklerine karşı geliştirilmiş ve FVD'lerin frekansa bağımlı doğrusal olmayan davranışlarını çok daha iyi bir şekilde ifade etmiştir, ancak bu model sönümleyicide oluşan direncin strok mesafesine bağlı olarak değiştiği durumları açıklamada eksik kalmaktadır (Makris ve Constantinou, 1990; Makris ve Constantinou, 1991).

Symans ve Constantinou'nun (1999) FVD'lerin deneysel olarak performanslarını değerlendirmek amacıyla yapmış olduğu çok katlı yapı modelleri, sarsma tablasında test edilmiş ve farklı zemin hareketleri altında sistemlerin enerji sönümleme verimliliği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FVD'lerin hem elastik hem plastik bölgelerde performansı iyileştirdiği ve yüksek tekrarlı yüklemeler altında dayanımlarını koruyabildiğini ortaya koymuştur.

Sıcaklık ve degradasyon etkilerini gözlemlemek amacıyla Hu ve diğerleri (2023), viskoz

sıvılı sönümleyicilerde yağ sızıntısı ve termal etkenlerin performans üzerindeki etkileri incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda sönümleyicinin zamanla viskozitesinin azaldığı ve bu durumun histerezis eğrisinde boşluklar oluşturduğu, dolayısıyla enerji kayıplarının olduğu görülmüştür. Yüksek hızlı darbe testleri ve termal testler ile sönümleyicilerin ömrü boyunca nasıl bir davranış sergileyeceği deneysel olarak doğrulanmıştır.

Ataei ve Anaraki (2018), yaptıkları çalışmada degradasyon etkilerini incelemiştir ve sönümleyicilerin iç yapılarında meydana gelen viskozite değişimlerinin ve sızdırmazlık özelliğinin azalmasının enerji sönümleme kapasitesini azalttığını tespit etmiştir. Aynı zamanda, sönümleyicinin çalışması esnasında sönüm kuvvetinin kendiliğinden değişmesi gibi yenilikçi davranışları kapsayan tasarımların gerekliliğine dikkat çekmektedir.

Yan, Alam, Shu ve Qin (2023), klasik FVD tasarımlarını geliştirerek kendini merkezleme yeteneğine sahip hibrit sönümleyiciler geliştirmiştir. Geliştirilen bu sönümleyicide yay mekanizması kullanılarak deprem sonrası kalıcı deplasmanların azaltılması amaçlanmıştır. Yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olması ile birlikte bu sistemler, yapının göçme sonrası toparlanma kapasitelerini de artırmaktadır.

Taylor Devices Inc. (2019) tarafından yayımlanan mühendislik rehberinde, FVD’lerin Avrupa Birliği'nde kullanılabilmesi için EN 15129 standardına (TSE için TS EN 15129) uygun tasarım gereklilikleri, test prosedürleri ve tasarım parametrelerinin belirlenme süreci kapsamlı şekilde açıklanmıştır. Bu standart ile, FVD'lerin piston genliği kapasitesi, sönüm katsayısı (C), hız üssü (α) ve çalışma sıcaklığı aralıkları gibi teknik ayrıntılar detaylandırılmıştır.

Yapılan çalışmaların sonuçları doğrultusunda klasik FVD sistemlerin bazı sınırlamaları olduğu görülmektedir. Bu sınırlamaların başında pistonun her konumunda sistemdeki sönümleme karakterinin sabit olması gelmektedir. Bir diğer deyişle, piston konumu ne olursa olsun, aynı hız altında aynı direnç kuvvetinin üretmesi beklenmektedir. Fakat yapısal davranış dinamik ve değişken olduğu için bu sabit davranış her zaman istenen performansı vermekte zorlanmaktadır.

Literatürde bu sorunlara alternatif olarak yarı-aktif sönümleme sistemleri veya orifis

geometrisinin adaptif hale getirilmesi gibi çözümler önerilmiştir. Bu gibi çözümler maliyetleri artırmakta ve daha fazla bakım gereksinimi oluşturmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı, pistonun konumuna ve hızına bağlı olarak değişen bir direnç profiline sahip yeni nesil FVD tasarımlarına talep gelişmiştir.

4. FVD TASARIMI

Bu başlık altında öncelikle TS EN 15129 standardına göre FVD sistemlerin tasarım sınırlamalarından bahsedilecektir. Ardından, tez kapsamında yeni tasarlanmış olan özgün sistemin malzeme, ölçü ve hesaplamaları detaylıca açıklanacaktır.

4.1. TS EN 15129'a Göre Tasarım ve Malzeme Sınırlamaları

Standardın 7. bölümünde hıza bağlı sönümleyicilerin tasarım gereksinimleri ve testleri üzerinde durulmaktadır. FVD sistemler için bahsi geçen testlere, tez içerisinde 3.5.3 üçüncü taraf testleri başlığında değinilmektedir. Bu başlık altında ise tasarım sınırlamalarından bahsedilmektedir (TSE, 2020).

4.1.1. İşlevsel gereklilikler

FVD'nin tasarım şartnamesinde verilmiş olan toleranslar içinde, çekme veya basınç tepki kuvveti üretmesi gerekmektedir. Bu kuvvet, şartnamede belirtilen yapısal yasaya uygun olarak, maksimum tasarım hızının en az iki kademe altında kalan hız aralıklarında da geçerli olmak zorundadır.

Sönümleyicinin, belirtilen enerji seviyelerinde performans azalması veya servis ömründe bir kayıp olmadan çalışması gerekmektedir. Oluşan tepki kuvveti yalnızca sönümleyici uçları arasındaki göreli hıza bağlı olmalı ve strok pozisyonuna göre değişiklik göstermemesi gerekmektedir.

Sıcaklık değişimleri, yaşlanma ve aşınma gibi etkenler sonucunda meydana gelebilecek olan kuvvet değişimleri tasarım şartnamesinde sınırlandırılmak zorundadır.

Tasarım strok mesafesinin belirlenmesinde, termal ve sismik deplasmanlar, uzun vadeli etkiler gibi etmenler göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ancak hiçbir durumda strok köprüler için 50 mm'den, binalar için 25 mm'den daha az olamamaktadır. Sönümleyicinin uçlarında küresel mafsallar bulunması gerekmektedir. Bu mafsallar ile iletilen yük sönümleyiciye eksenel etki etmeli ve istenmeyen eğilme momentlerini önlemektedir.

Küresel mafsalların dönme kapasitesi, canlı yük etkileri, deprem sonucu oluşan deplasmanlar ve montaj sırasındaki hizalama hatalarından kaynaklanabilecek ek durumlara göre tasarım şartnamesinde sınırlandırılmak zorundadır. Dönme kapasitesinin her durumda en az ±2° olması ve Clevis plakalarının veya diğer montaj bileşenlerinin tasarlanan dönmeye engel olmaması gerekmektedir (TSE, 2020).

4.1.2. Malzeme özellikleri

Genel

Standartta, kullanılacak olan malzemelerin her türlü sıcaklık etkilerine göre uyumlu olacak şekilde seçilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Malzemeler

Bu standarda göre FVD'lerin, EN 10025, EN 10083, EN 10088, EN 10210, EN 10297, ISO 14737 ve ISO 1083 standartlarından birine uygun demir esaslı malzemelerden imal edilmesi gerekmektedir.

Aktif yüzeyler

Piston kolunun tüm aktif yüzeyi, paslanmaz çelikten veya korozyona karşı koruma ve aşınma direnci sağlamak amacıyla uygun şekilde nikel/krom kaplama yapılarak üretilmesi gerekmektedir.

Viskoz sıvı

Sönümleyicide kullanılan viskoz sıvının, toksik ve yanıcı olmayan, kimyasal olarak inert olması gerekmektedir. Eğer silikon bazlı bir sıvı kullanılmaktaysa, yukarıdaki özelliklerin deneysel olarak gösterilmesi şartı koşulmaktadır (TSE, 2020).

4.1.3. Tasarım gereklilikleri

Genel

FVD'lerin, servis yüklerinin sonucunda plastik deformasyon oluşmayacak ve nihai yükler altında herhangi bir hasar meydana gelmeyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. En olumsuz kombinasyonlar altında oluşabilecek maksimum iç basınca dayanabilir olması durumu aranmaktadır. Cihazların, esas eksenlerine dik yönde, en büyük sismik ivmeye dayanacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. İvme verisinin bulunmadığı durumlarda, cihazlar esas eksenlerine dik yönde en az kendi ağırlığının iki katı bir yük ile birlikte en büyük eksenel yüke dayanacak şekilde tasarım kabulü yapılmaktadır.

Viskoz sıvının termal genleşmesi sonucu oluşabilecek aşırı iç basınç artışını engelleyecek düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Eğer bu duruma karşı doğrudan direnç gösterecek bir tasarım mevcut değilse, bu etkiyi önlemek amacıyla akümülatör veya benzeri bir düzenek sisteme dahil edilmektedir. Öngörülen servis koşulları altında beklenen servis ömrü süresince bakım gerektirmeyecek şekilde tasarım ve imalat yapılması şartı aranmaktadır. Tip testleri ile elde dilmiş olan karakteristik parametrelerin deneysel değerleri ile tasarım değerleri arasındaki maksimum farkların, Tablo 2'de verilmiş olan tolerans sınırları içerisinde kalması gerekmektedir (TSE, 2020).

Çizelge 4.1. FVD için tölerans sınırları (TS EN 15129 Tablo-6)

Tasarım Parametreleri	(1) Temin	(2) Sıcaklık (*)
	FVD	
F	±15 %	±5 %
H	- 15 %	- 5 %
(*) Sıcaklık aralığı –25 °C / +50 °C		
H = Her çevrimdeki enerji sönümlemesi		

Aşırı Hız

FVD'lerin tasarım kuvvetinin, Eşitlik 3.13 ile belirlenen güvenilirlik katsayısı ile çarpılarak büyütülmesi gerekmektedir.

$$\gamma_v = (1 + t_d)1{,}5^{\alpha} \quad (3.13)$$

t_d: Tasarım reaksiyonu toleransı

α: hız üssü

Burkulma

FVD sistemin piston kolunun, tamamen uzatılmış konfigürasyonda ve küresel mafsallarda %10 sürtünme katsayısı dikkate alınarak, güvenilirlik katsayı ile büyütülmüş olan tasarım yükü altında burkulma oluşmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Eğer deneysel veriler mevcut ise %10'dan daha küçük bir sürtünme katsayısı kullanılabilmektedir (TSE, 2020).

4.2. Yeni Tasarım

Bu başlık altında tez kapsamında tasarlanan FVD'nin (Resim 4.1) ölçüleri ve malzeme özellikleri aktarılacaktır.



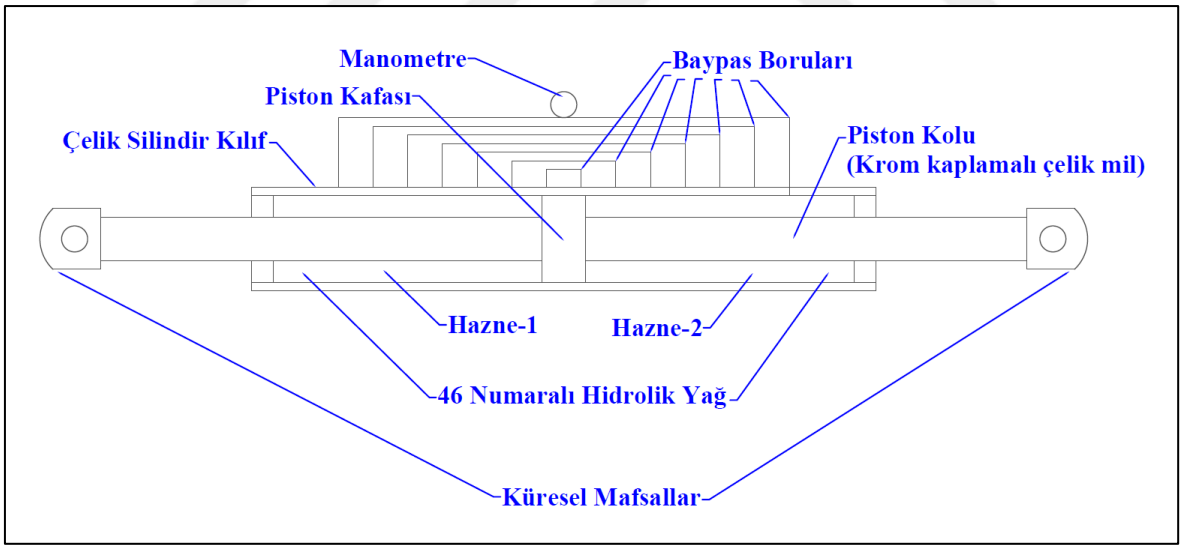
Resim 4.1. Yeni tasarım FVD

4.2.1. Kullanılan malzemeler

Yeni FVD sistemde (Resim 4.2) viskoz sıvı olarak 46 numaralı hidrolik yağ kullanılmaktadır. Bu yağ, endüstriyel alanlarda viskozitesi ve geniş çalışma sıcaklığı sebebi ile yaygın olarak tercih edilmektedir. Genel olarak 46 numaralı hidrolik yağın özellikleri aşağıdaki gibi belirtilmektedir (Totten,1999: 263-266).

- Düşük toksiklik
- Yüksek viskozite ve düşük akma noktası ile farklı sıcaklıklarda tutarlı çalışma
- Oksidasyon ve korozyona karşı direnç sağlama
- Aşınma önleme

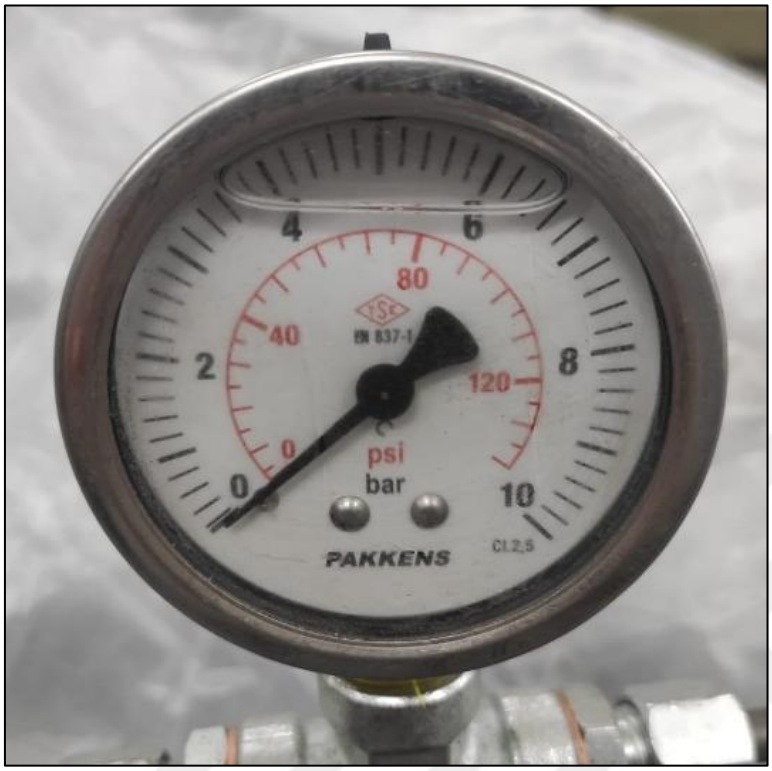
Silindir kılıf S235 sınıfı honlanmış, yani düşük hızlarda hassas bir şekilde taşlama işlemi yapılarak yüzey pürüzlülüğü minimize edilmiş çelik borudan, sönümleyici kolu krom kaplamalı S235 sınıfı çelik milden oluşmaktadır. Sistem içerisinde sızdırmaz conta ve sönümleyici kolunun her iki ucunda küresel mafsal kullanılmaktadır.



Resim 4.2. Yeni tasarım FVD bileşenleri

İç basınç değerlerinin gözlemlenmesi amacıyla analog bir manometre (Resim 4.3) sisteme dahil edilmiştir. Maksimum 10 bar basınca kadar okuma kapasitesine sahip olan bu manometrenin hassasiyet sınıfı CL 2,5'tir (±%2,5 sapma toleransı). Kullanılan manometre TS EN 837-1 standardına uygun olarak üretilmiştir. Bu standart, dairesel kadranlı, borulu yay elemanına sahip basınçölçerlerin yapısal özelliklerini tanımlamakta olup; cihazın

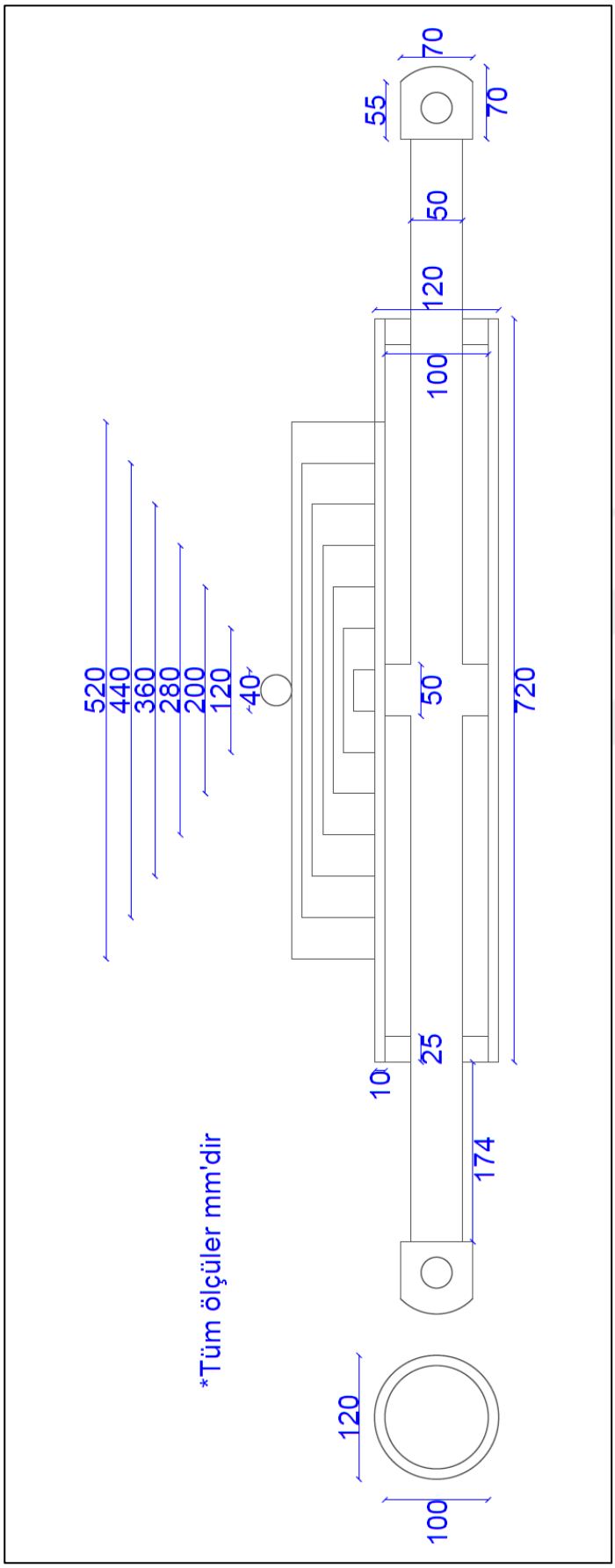
güvenli çalışma ve mekanik dayanım açısından uluslararası normlara uygunluğunu göstermektedir (TSE; 2008).



Resim 4.3. Yeni tasarım FVD sistemde kullanılan manometre

4.2.2. Yeni tasarım FVD'nin ölçüleri

Yeni tasarımda, geleneksel FVD tasarımından farklı olarak önceki başlıklarda da bahsedildiği üzere piston konumuna bağlı olarak kademeli şekilde direnç üretmesi amacıyla baypas boruları kullanılmaktadır. Toplam 7 adet 10 mm çapındaki borular 14 rekor ile simetrik olarak bağlanmaktadır. Boruların yatay uzunlukları en dıştan en içe sırası ile 520 mm, 440 mm, 360 mm, 280 mm, 200 mm, 120 mm ve 40 mm'dir. 10 mm et kalınlığına sahip silindir kılıfın boyu 720 mm, dış çapı 120 mm ve iç çapı 100 mm'dir. Krom kaplamalı piston kafası 50 mm genişlikte ve 100 mm yüksekliktedir. Piston genliği (strok mesafesi) toplam 348 mm'dir. Direncin en zayıf olduğu orta noktada konumlanmış durumda piston genlikleri her iki tarafta 174 mm olmaktadır. Silindir kılıfın alt ve üst ucunda 25 mm kalınlığında çelik plakalar bulunmaktadır. Piston kolunun her iki ucunda kullanılan küresel mafsalların boyutları ise 70x70 mm'dir (Resim 4.4).



Resim 4.4. Yeni tasarım FVD'nin ölçüleri

4.2.3. Yeni tasarım FVD'nin kapasite kontrolleri

Yeni tasarım FVD sistemin piston konumuna bağlı olarak sönümleme direncinin değişmesi sebebiyle Eşitlik 3.10'da verilmiş olan parametreler (sönüm katsayısı, göreli hız, hız üssü) bilinmediğinden, yapısal elemanların sınır dayanımları incelenerek kapasite kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda üç temel sınır durumu incelenmiştir. Tüm sistemde kullanılan çelik elemanlar S235 sınıfı çelikten imal edilmiştir. S235 sınıfı çelik için elastisite modülü (E) 200 GPa, akma dayanımı (Fy) 235 N/mm^2 ve maksimum gerilme kuvveti (Fu) 360 N/mm^2'dir. Hesaplamalarda, Çelik Yapılar Hakkında Yönetmelik (ÇYHY) (2016) Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yöntemi kullanılmıştır. GKT'ye göre akma ve burkulma durumları için güvenlik katsayısı (Ω) 1,67'dir.

<u>İç basınç etkisiyle çelik silindir kılıfın akması</u>

Kapalı dairesel sistemlerde sıvıların sıkıştırılması sonucunda çevresel basınç sistemin her noktasında eşit oluşmaktadır. Yeni tasarım FVD sisteminde bulunan viskoz sıvı, sıkışmaya karşı direnç göstermekle birlikte baypas boruları aracılığıyla piston kafasının arkasında kalan hazneye geçiş yapabilmektedir. Bu durum, yeni sistemde oluşan çevresel basıncın piston kafasına etki eden maksimum basınç değerinden daha az olacağını göstermektedir. Bununla birlikte, güvenli tarafta kalmak adına çevresel basınç, piston kafasına etki eden maksimum basınca eşit olduğu varsayımı ile hesaplamalar yapılmıştır. TS EN 1993-1-6 (2007) Standardına göre çelik silindirik borular için çevresel basınç Eşitlik 4.1'deki gibidir.

$$\sigma_{çevresel} = p_{maks} * \frac{r}{t} \quad (4.1)$$

$\sigma_{çevresel}$: Çevresel basınç

p_{maks} : Maksimum kuvvet

r : Silindir borunun yarıçapı

t : Silindir borunun cidar kalınlığı

Yeni tasarım için GKT yöntemine göre emniyet gerilmesi;

$$\sigma_{em} = \frac{F_y}{\Omega} = \frac{235\ \frac{N}{mm^2}}{1{,}67} = 140{,}7\frac{N}{mm^2}$$

t= 0,01 m

r= 0,05 m'dir.

Bu değerler eşitlik 4.1'de yerine konulduğunda;

$$p_{maks} = \frac{(140{,}7\ \frac{N}{mm^2} * 10^6\ \frac{mm^2}{m^2} * 0{,}01\ m)}{0{,}05\ m} = 28\ 140\ 000\ \frac{N}{m^2} = 281{,}4\ Bar$$

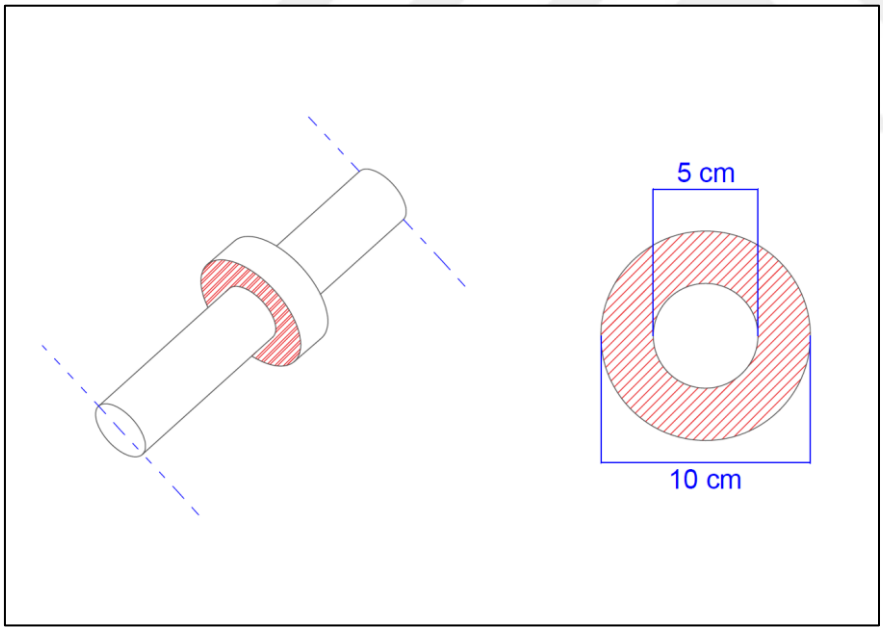
olmaktadır.

Sistemdeki sıvının piston kafasına etki ettiği net alan (Resim 4.5);

$A_{net} = \pi * 0{,}05\ m^2 - \pi * 0{,}025\ m^2 = 0{,}0059\ m^2$ olmaktadır.

Buradan çelik silindir kılıfın iç basınç sebebiyle akmasına neden olacak sınır kuvvet;

$F_{maks} = P_{maks} * A_{net}$ → $F_{maks} \cong 165$ kN olarak hesaplanmaktadır.

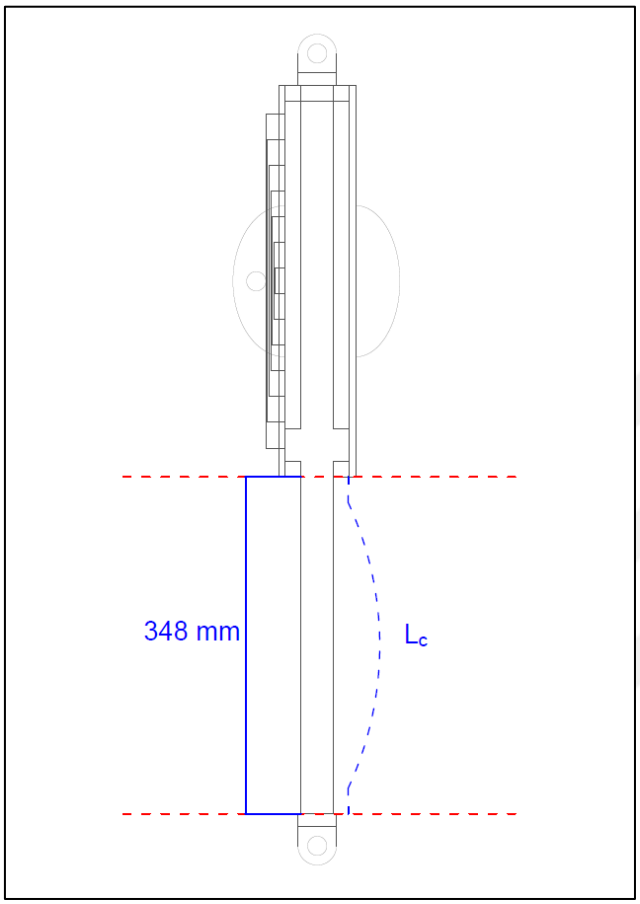


Resim 4.5. Piston kafası net alanı

Piston kolunun burkulması

Sisteme etki eden kuvvet, piston kolunda eksenel basınç oluşturmaktadır. TS EN 15129 (2020)'a göre burkulma tahkiki piston kolu maksimum açıklık (strok) konumunda yapılmalıdır. İlk olarak TS 648 (1980) çizelge 3'e göre iki ucu mafsallı durum için K=1 olarak alınmıştır, ancak TS EN 15129'a göre küresel mafsallarda %10 sürtünme oluştuğunun

göz önünde bulundurulması istenmektedir. Bu sebeple, K değeri 0,9 olarak belirlenmiştir. Maksimum strok konumu için L = 348 mm olmaktadır (Resim 4.6). Buradan burkulma boyu (L_c);



Resim 4.6. Maksimum piston genliği ve burkulma boyu

$L_c = K * L = 0,9 * 0,348\ m = 0,3132\ m$

Dolu silindir kesit için atalet momenti (I);

$$I = \pi * \frac{d^4}{64} = \pi * \frac{0,05\ m^4}{64} = 3,07 * 10^{-7}\ m^4$$

Net alan (A_{net}) ;

$$A_{net} = A_{bütün} = \pi * 0,05\ \frac{m^2}{4} = 0,00196\ m^2$$

Atalet yarıçapı (i);

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 0,0125\ m$$

Narinlik oranı (L_c/i);

$$\frac{Lc}{i} = \lambda = \frac{0{,}3132\ m}{0{,}0125\ m} = 25{,}06$$

Olarak hesaplanmıştır ve 200'den küçük gelmektedir.

Eğilmeli burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi (F_e);

$$Fe = \frac{\Pi^2 * E}{\lambda^2} = \frac{\Pi^2 * 200000\ \frac{N}{mm^2}}{25{,}06^2} = 3\ 143\ MPa$$

İnelastik-elastik burkulma için sınır narinlik ($\lambda_{sınır}$);

$$\lambda_{sınır} = 4{,}71 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4{,}71 * \sqrt{\frac{200 * 10^9}{235 * 10^6}} = 137{,}4$$

$\lambda < \lambda_{sınır}$ olduğuna göre inelastik burkulma oluşmaktadır. Bu durumda kritik burkulma gerilmesi (F_{cr});

$$F_{cr} = \left[0{,}658^{\frac{F_y}{Fe}}\right] * F_y = \left[0{,}658^{\frac{235}{3143}}\right] * 235 = 227{,}76\ \frac{N}{mm^2}$$

Buradan, karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı (P_n) GKT için;

$$P_n = F_{cr} * A_{bütün} = 227{,}76 * 10^6\ \frac{N}{m^2} * 0{,}00196\ m^2 = 446{,}41\ kN$$

GKT → $\frac{P_n}{\Omega} = \frac{446{,}41}{1{,}67} \cong 267\ kN$ olarak hesaplanmaktadır.

<u>Piston kolunun akması</u>

Piston koluna etki eden kuvvetin, piston kolunda akmaya sebep olması durumu için ÇYHY 2016 bölüm 3'e göre karakteristik çekme kuvveti dayanımı (T_n) GKT için;

$$T_n = F_y * A_{bütün} = 235 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 0{,}00196\ m^2 = 460{,}6\ kN$$

GKT → $\frac{T_n}{\Omega} = \frac{460{,}6}{1{,}67} \cong 275\ kN$

Olarak hesaplanmaktadır.

İncelenen bu üç durum arasında, iç basınç etkisiyle çelik silindir kılıfın akması durumunun kritik olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yeni tasarlanan FVD sistemin yapısal kapasitesinin yaklaşık 165 kN olduğu, yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkmaktadır.

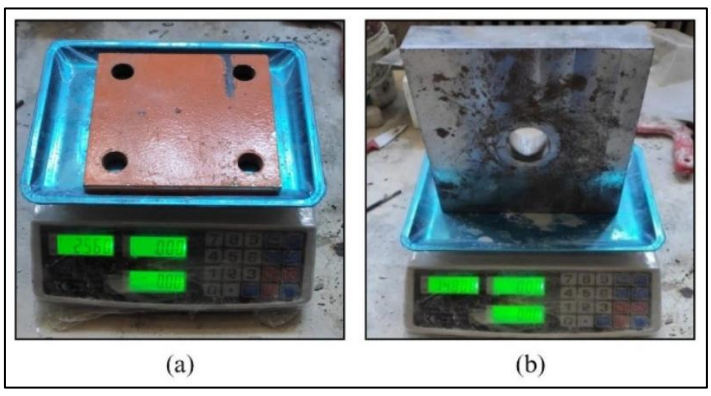
5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, geliştirilen özgün FVD prototipinin mekanik performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş olup, deney sistemi, yükleme düzeni ve ölçüm yöntemleri detaylı bir şekilde planlanmıştır.

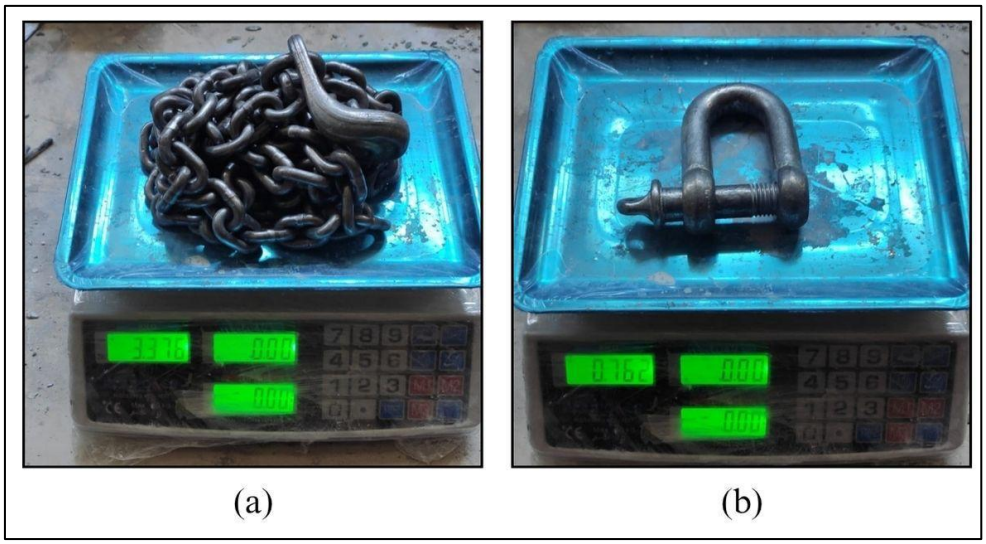
İlk olarak, yeni tasarlanmış olan FVD sistemine ait piston genliği belirlenmiştir. Bu amaçla, piston kolu üç kez tam strok konumuna kadar uzatılarak ölçüm yapılmıştır. Elde edilen ölçümler sonucunda sistemin genliği 348 mm olarak tespit edilmiştir. Bu değer, sistemin dinamik yükleme altında göstereceği maksimum çalışma mesafesini temsil etmektedir.

İkinci aşamada, sistemin dinamik tepkisini incelmek amacıyla darbe tipi yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, sistemin konuma bağlı direnç karakteristiğini gözlemlemek üzere piston kafası, direncin en düşük olduğu strok mesafesinin tam ortasında konumlandırılmıştır. Bu durumda piston kolunun başlangıç uzunluğu 174 mm olmaktadır. FVD sistem, çelik silindir kılıfın yanlarında yer alan kulaklara bir zincir bağlanmıştır. Bağlanan bu zincir ve mobil vinç yardımıyla FVD yeterli miktarda yükseltilmiştir. Dinamik yük oluşturmak amacıyla toplamda 175,73 kilogram-kuvvet (kgf) ağırlık aşağıdaki bileşenler kullanılarak sağlanmıştır:

- 16 adet 2,560 kgf'lık çelik levha (Resim 5.1.a)
- 4 adet 14,808 kgf'lık çelik levha (Resim 5.1.b)
- 1 adet 3,376 kgf'lık taşıyıcı zincir (Resim 5.2.a)
- 1 adet 0,762 kgf'lık zincir kilidi (mapa) (Resim 5.2.b)
- 2 adet 35,700 kgf'lık çelik kutu profil (Resim 5.3.a)

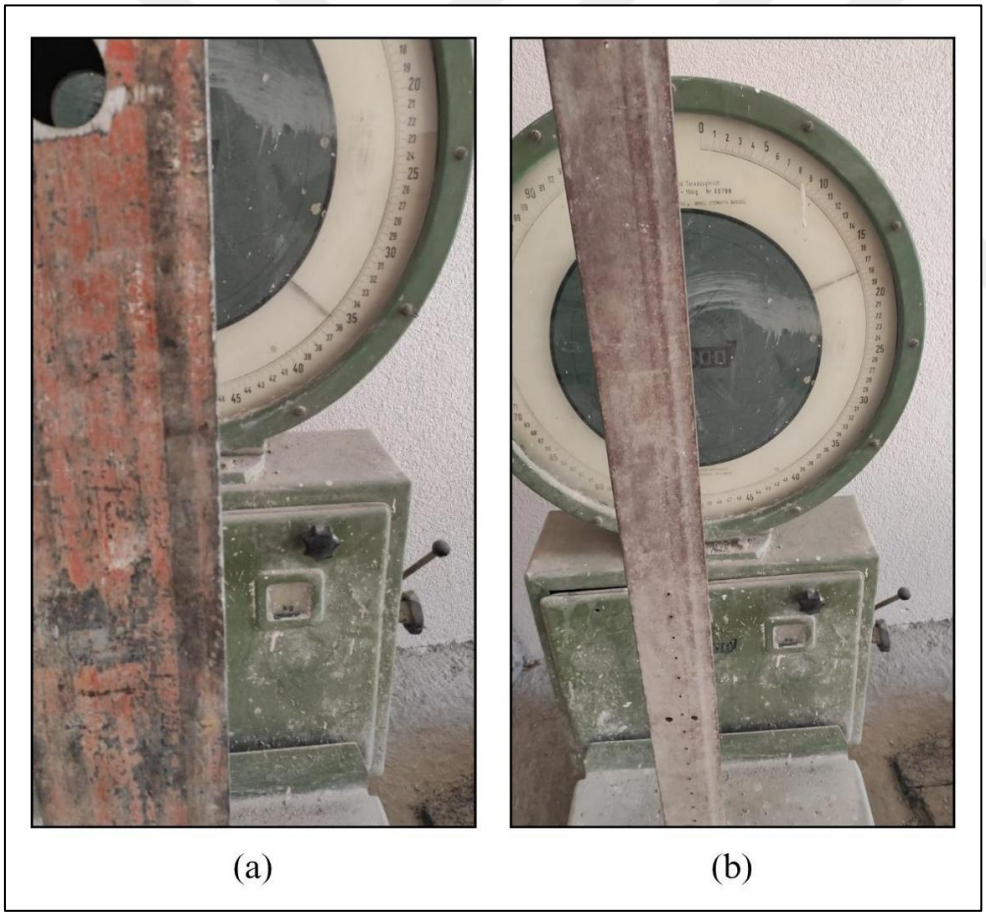


Resim 5.1. Çelik levhalar



(a) (b)

Resim 5.2. Taşıyıcı zincir (a) ve zincir kilidi (b)



(a) (b)

Resim 5.3. Çelik kutu profil (a) ve kuvvet kolu (b)

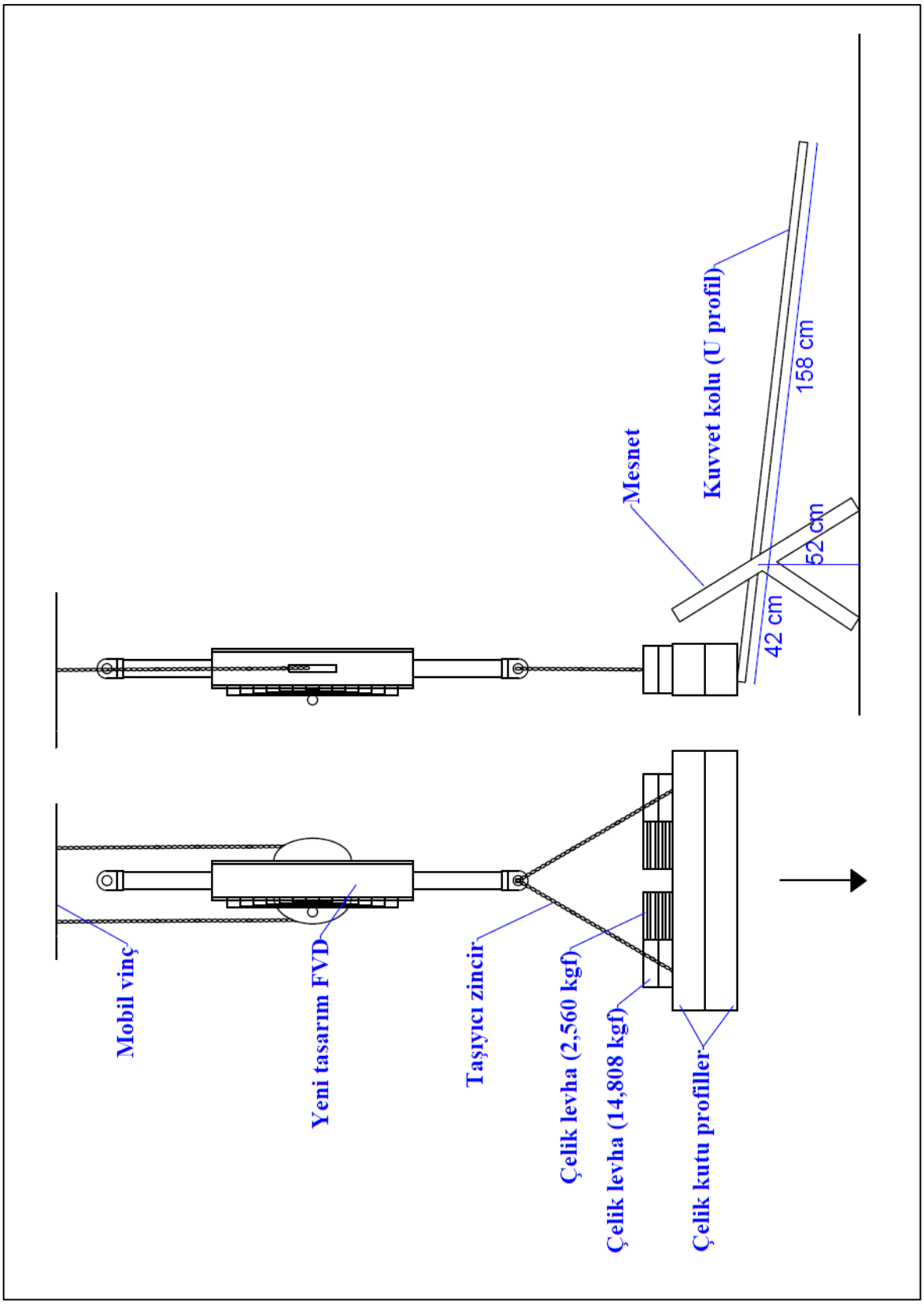
FVD sisteme yüklenen bu ağırlıkları serbest düşme hareketi ile dinamik bir şekilde yüklemek için bir mesnet ve kuvvet kolu kullanılmıştır. Kuvvet kolu olarak tercih edilen çelik U profilin ağırlığı ise 17,5 kgf olarak ölçülmüştür (Resim 5.3.b). Mesnetin diğer

tarafında kalan kuvvet kolunun ağırlığı sebebiyle, FVD sisteme etki eden dinamik yükleme ağırlığı momente bağlı olarak yaklaşık 150 kgf olmaktadır. Bu ağırlığa, kuvvet kolunun diğer tarafında karşıt bir ağırlık kullanılarak sistem denge haline getirilmiş ve ardından serbest bırakılarak dinamik yükleme testleri yapılmıştır. Yapılmış olan bu ilk çalışmalar ile, mesnetin konumu, ağırlıklar ve kuvvet kolunun deney düzeneği üzerindeki yerleşimi belirlenmiş ve işaretlenmiştir. Daha sonra bu işaretli konumlar (Resim 5.4) esas alınarak üç adet nizami dinamik yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.4. Deney düzeneği işaretlemeleri

Bir deney süresince, FVD sisteme bağlanacak olan yükler, ilk olarak iki adet kutu profil üzerine mobil vinç yardımı ile yerleştirilmektedir. Ardından piston konumu ortada ayarlanmış olan FVD sisteme yükü taşımayacak şekilde zincir ile bağlanmaktadır. Sonrasında mesnet ve kuvvet kolu yapılan işaretlemelere göre yerleştirilmektedir (Resim 5.5 – Resim 5.6). FVD sisteme bağlı olan fakat kutu profillerin taşıdığı ağırlıklar, U profilli kuvvet koluna dengeli bir şekilde aktarılmakta ve karşıt ağırlık ile sistem sabitlenmektedir. Daha sonra kutu profiller deney düzeneğinden uzaklaştırılmakta ve ağırlıkları FVD sisteme bağlayan zincir, yük taşımayacak şekilde gergin duruma getirilmektedir. Son olarak, karşıt ağırlık kaldırılarak deney düzeneği serbest bırakılmakta ve sönümleyici yüklenen ağırlıklar ile deplasman hareketini oluşturmaktadır.



Resim 5.5. Deney düzeneği

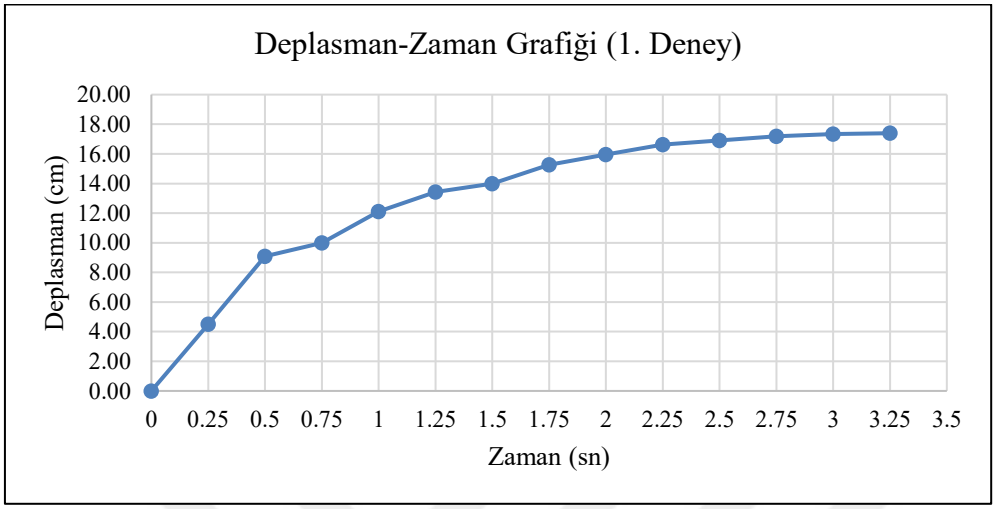


Resim 5.6. Deney düzeneği (Laboratuvar)

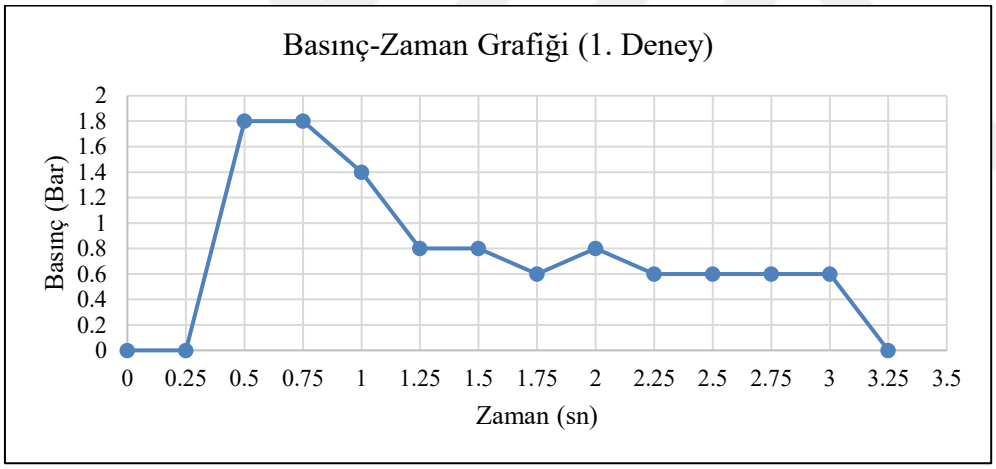
Deneylerin son aşaması, yüksek hızlı kamera ile 4 kat ağır çekimde kaydedilmiştir. Bu kayıtlar kullanılarak piston kolunun zamana bağlı deplasmanı ve FVD içerisinde oluşan basınç değişimleri dikkatle analiz edilmiştir. Kayıt edilen videolardan, her bir deney için hareketin gözlemlendiği ilk andan itibaren hareketin durduğu ana kadar, gerçekte 0,25 saniyeye tekabül edecek şekilde 1'er saniye aralıklarla ekran görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler AutoCAD yazılımına aktarılmış ve ölçümler yapılmıştır (EK-1 – EK-2 – EK-3).

AutoCAD ölçümlerinde sabit referans olarak piston kolunun bilinen 50 mm çapı kullanılmıştır. Görüntü üzerinden ölçülen piston kolu çapı ile referans arasında bulunan oran kullanılarak, görüntü üzerinden ölçülen piston kolunun uzunluğu gerçek uzunluğa dönüştürülmüştür. Aynı görüntülerde bulunan manometre okumaları ile de basınç değerleri her bir zaman adımında belirlenmiştir. Elde edilen deplasman ve basınç verileri kullanılarak

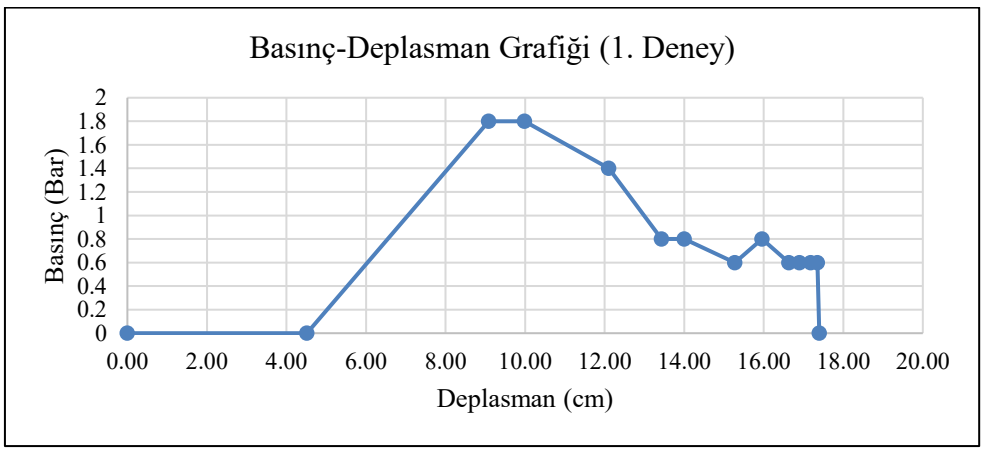
her bir deney için basınç-zaman, deplasman-zaman ve deplasman-basınç olmak üzere üçer grafik oluşturulmuştur (Şekil 5.1 – Şekil 5.9).



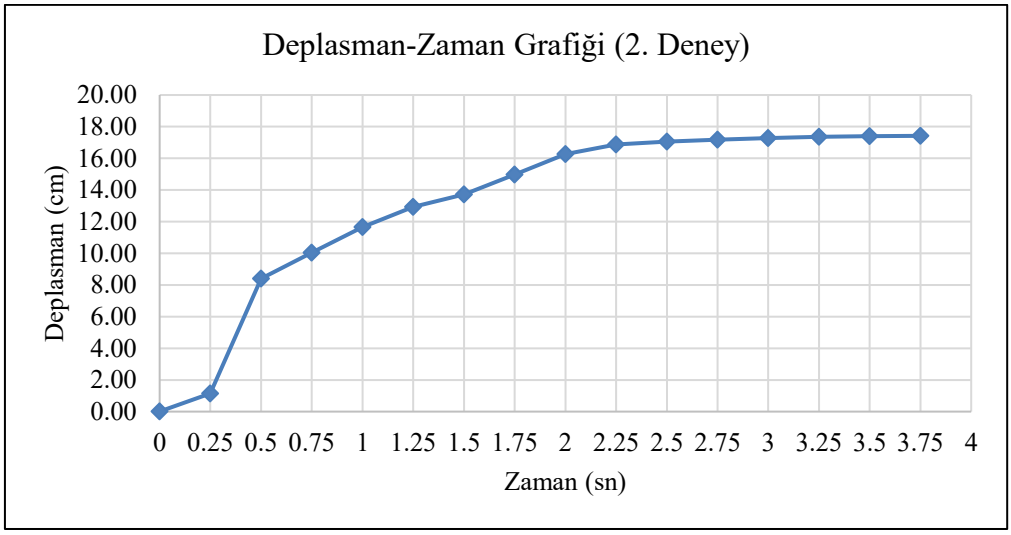
Şekil 5.1. Deplasman-zaman grafiği (1. Deney)



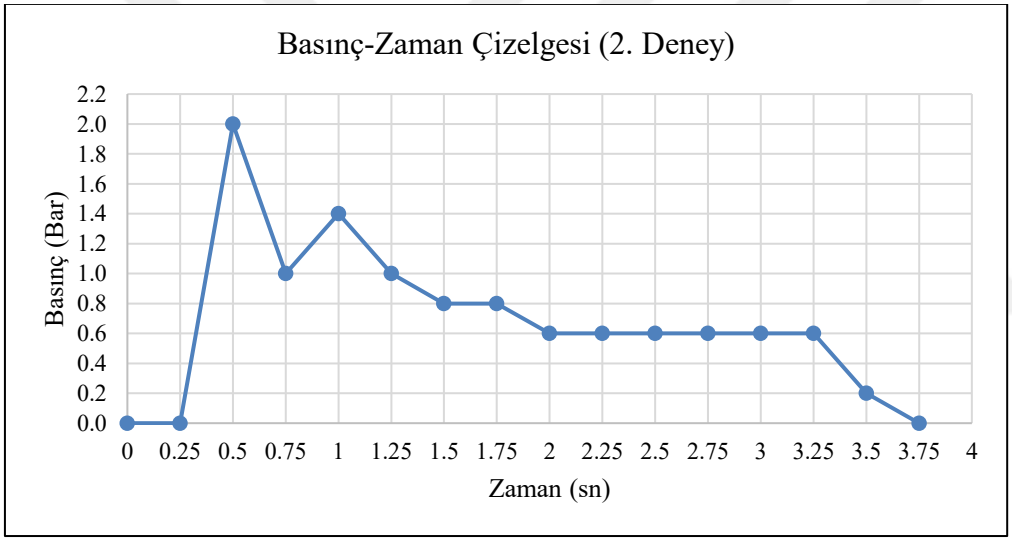
Şekil 5.2. Basınç-zaman grafiği (1. Deney)



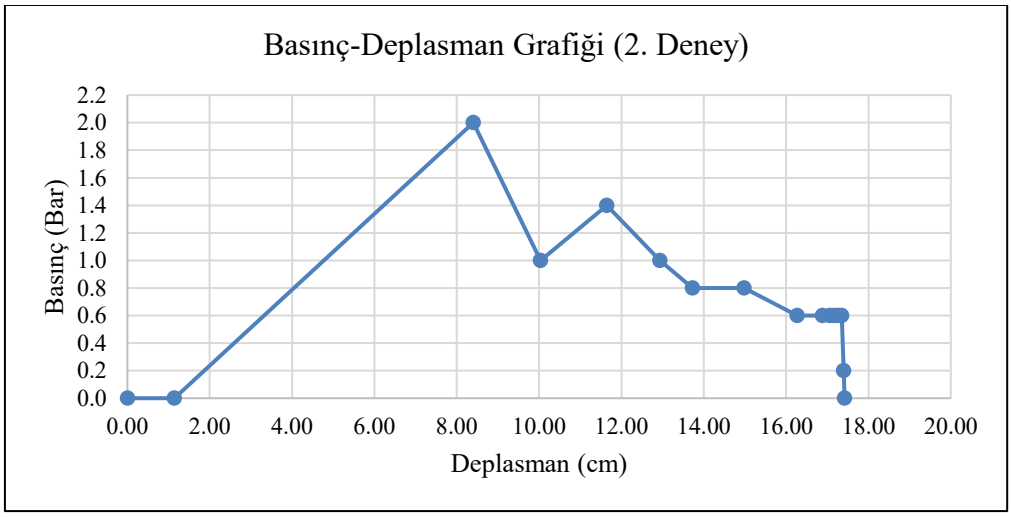
Şekil 5.3. Basınç-deplasman grafiği (1. Deney)



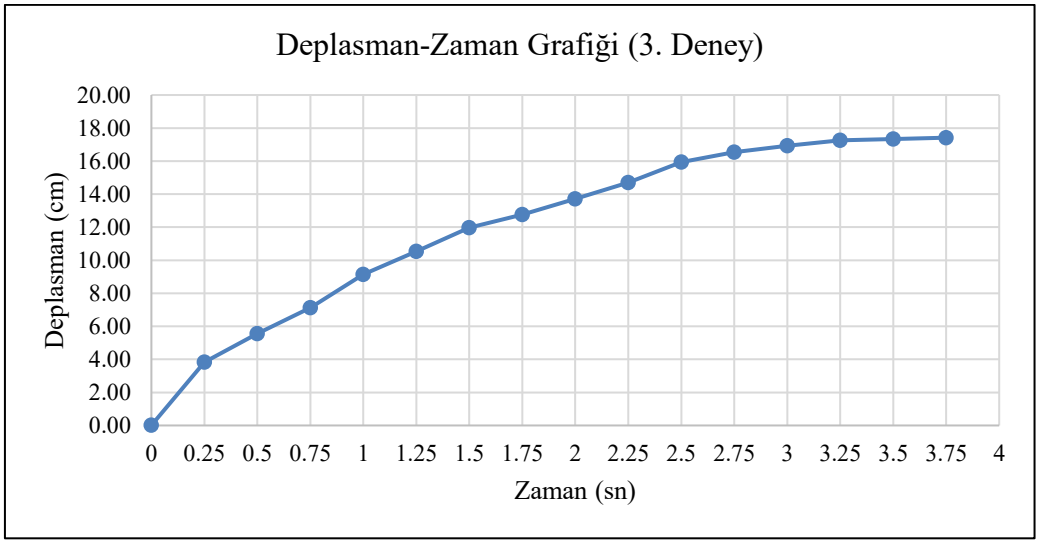
Şekil 5.4. Deplasman-zaman grafiği (2. Deney)



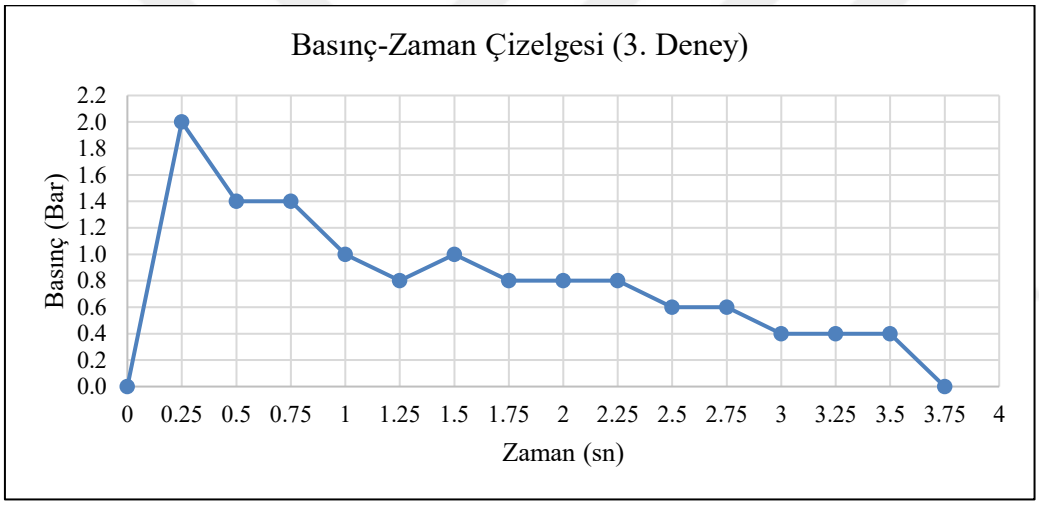
Şekil 5.5. Basınç-zaman grafiği (2. Deney)



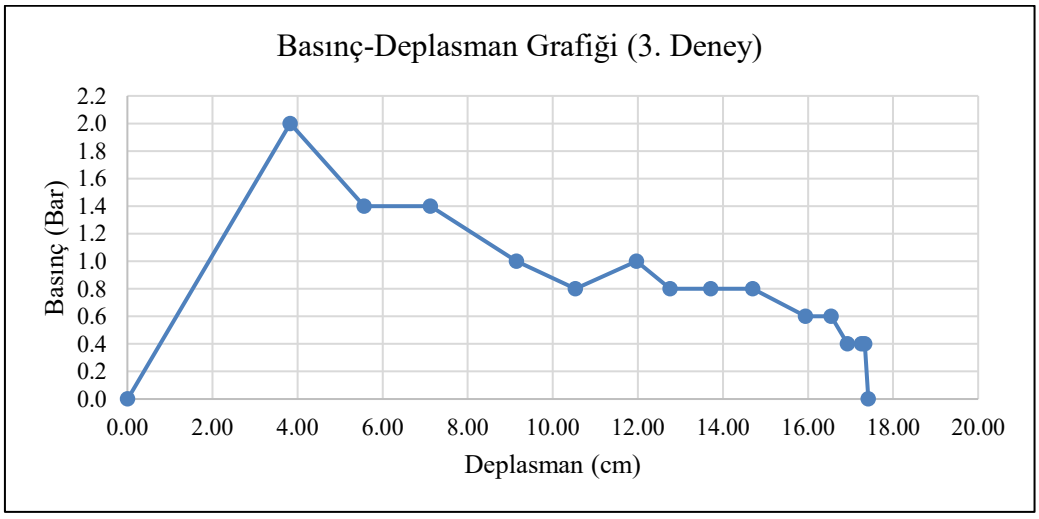
Şekil 5.6. Basınç-deplasman grafiği (2. Deney)



Şekil 5.7. Deplasman-zaman grafiği (3. Deney)



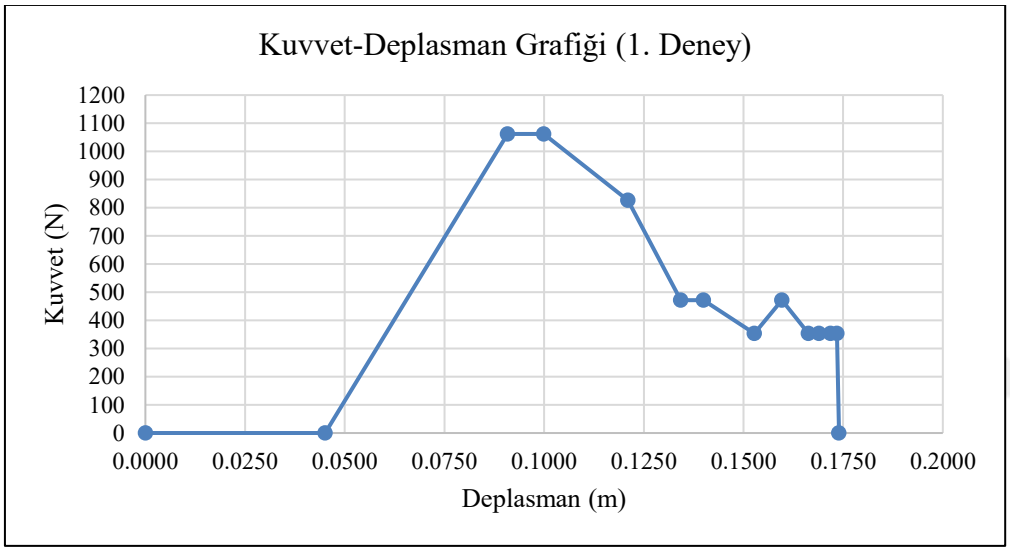
Şekil 5.8. Basınç-zaman grafiği (3. Deney)



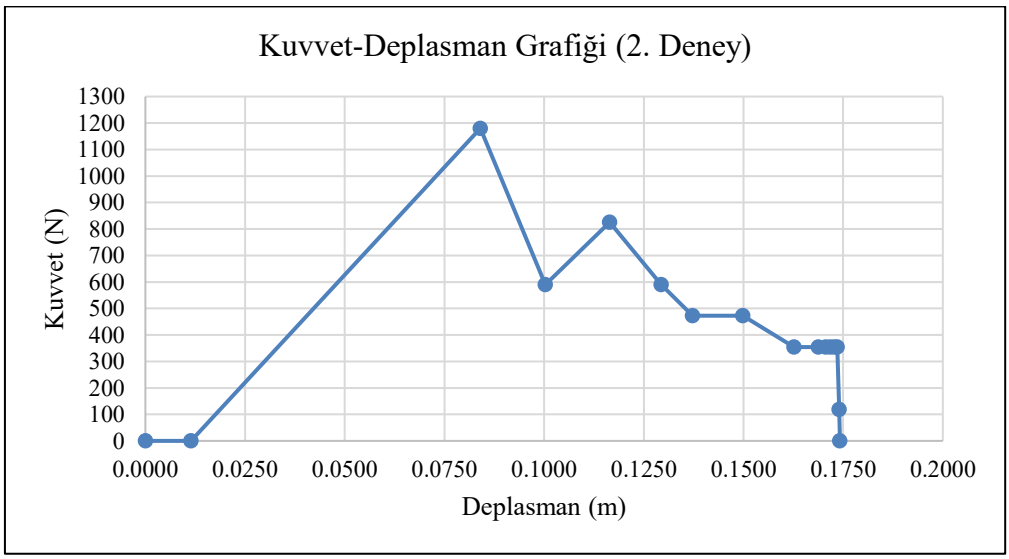
Şekil 5.9. Basınç-deplasman grafiği (3. Deney)

Son olarak, her deneyde sönümlenen enerjiyi hesaplayabilmek için Basınç-Deplasman Grafikleri kullanılarak Kuvvet-Deplasman Grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerdeki eğrilerin altında kalan alanlar hareket boyunca sönümlenen enerjiyi vermektedir. Basıncı oluşturan kuvvetler, Resim 4.4'te gösterilen net alana (0,0059 m^2) etkimektedir.

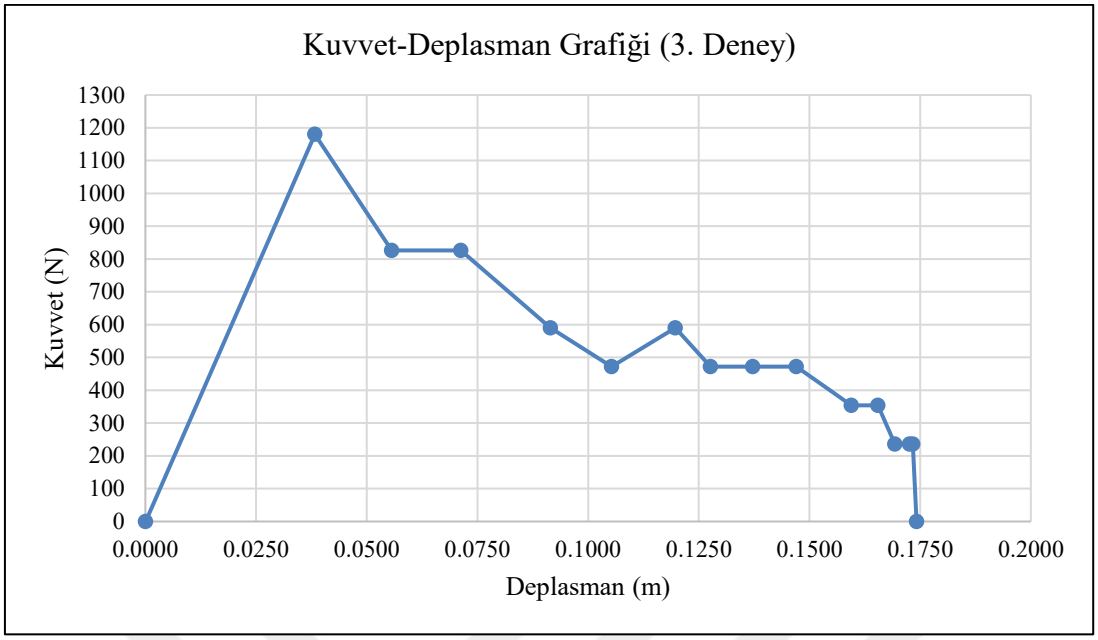
F = P * A eşitliği kullanılarak, her bir okumadan elde edilen basınç değerleri ve net alan çarpılarak etki eden kuvvetler hesaplanmıştır. Deplasman değerlerinin birimi de metreye dönüştürülmüş ve bu veriler kullanılarak Kuvvet-Deplasman Grafikleri elde edilmiştir (Şekil 5.10 – Şekil 5.12).



Şekil 5.10. Kuvvet-deplasman grafiği (1. Deney)



Şekil 5.11. Kuvvet-deplasman grafiği (2. Deney)



Şekil 5.12. Kuvvet-deplasman grafiği (3. Deney)

Grafikler oluşturulduktan sonra trapez integrasyon yöntemi (Eşitlik 5.1) ile her bir deney için eğrinin altında kalan alanlar, yani sönümlenen enerjiler Joule (J) biriminde hesaplanmıştır (Çizelge 5.1 - Çizelge 5.3).

$$E_d \cong \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} * |\Delta_{i+1} - \Delta_i| \right) \quad (5.1)$$

Ed: Sönümlenen enerji

F: Kuvvet

Δ: Deplasman

Çizelge 5.1. Sönümlenen enerji hesabı (1. Deney)

Deplasman (m)	Kuvvet (N)	Ortalama Kuvvet (N)	Mutlak Deplasman Farkı (m)	Alan (J)
0,0000	0	0	0,0451	0,00
0,0451	0	236	0,0458	24,29
0,0909	1062	472	0,0090	9,59
0,0999	1062	443	0,0211	19,95
0,1210	826	325	0,0133	8,62
0,1343	472	236	0,0057	2,68
0,1400	472	207	0,0127	5,26
0,1527	354	207	0,0069	2,85
0,1596	472	207	0,0067	2,78
0,1663	354	177	0,0026	0,93
0,1690	354	177	0,0029	1,01
0,1718	354	177	0,0016	0,58
0,1735	354	89	0,0005	0,09
0,1740	0		Toplam =	78,62

Çizelge 5.2. Sönümlenen enerji hesabı (2. Deney)

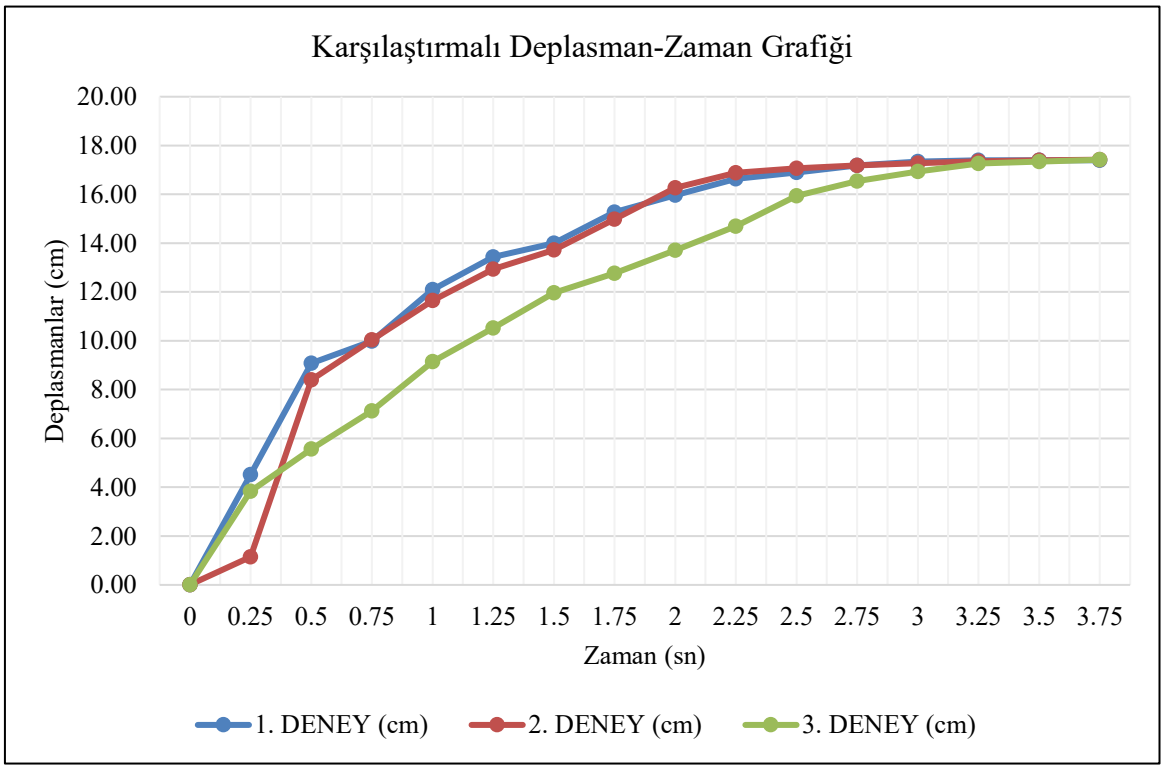
Deplasman (m)	Kuvvet (N)	Ortalama Kuvvet (N)	Mutlak Deplasman Farkı (m)	Alan (J)
0,0001	0	0	0,0114	0,00
0,0114	0	590	0,0726	42,84
0,0840	1180	885	0,0163	14,42
0,1003	590	708	0,0162	11,43
0,1165	826	708	0,0129	9,12
0,1294	590	531	0,0079	4,20
0,1373	472	472	0,0125	5,92
0,1498	472	413	0,0129	5,33
0,1627	354	354	0,0061	2,15
0,1688	354	354	0,0018	0,64
0,1706	354	354	0,0012	0,41
0,1718	354	354	0,0010	0,34
0,1728	354	354	0,0007	0,26
0,1735	354	236	0,0005	0,11
0,1740	118	59	0,0002	0,01
0,1742	0		Toplam =	97,20

Çizelge 5.3. Sönümlenen enerji hesabı (3. Deney)

Deplasman (m)	Kuvvet (N)	Ortalama Kuvvet (N)	Mutlak Deplasman Farkı (m)	Alan (J)
0,0001	0	590	0,0382	22,55
0,0383	1180	1003	0,0173	17,39
0,0556	826	826	0,0156	12,92
0,0713	826	708	0,0202	14,31
0,0915	590	531	0,0138	7,33
0,1053	472	531	0,0144	7,66
0,1197	590	531	0,0079	4,19
0,1276	472	472	0,0095	4,51
0,1372	472	472	0,0098	4,64
0,1470	472	413	0,0124	5,13
0,1594	354	354	0,0060	2,14
0,1655	354	295	0,0038	1,13
0,1693	236	236	0,0033	0,78
0,1726	236	236	0,0008	0,18
0,1734	236	118	0,0008	0,10
0,1742	0		Toplam =	104,96

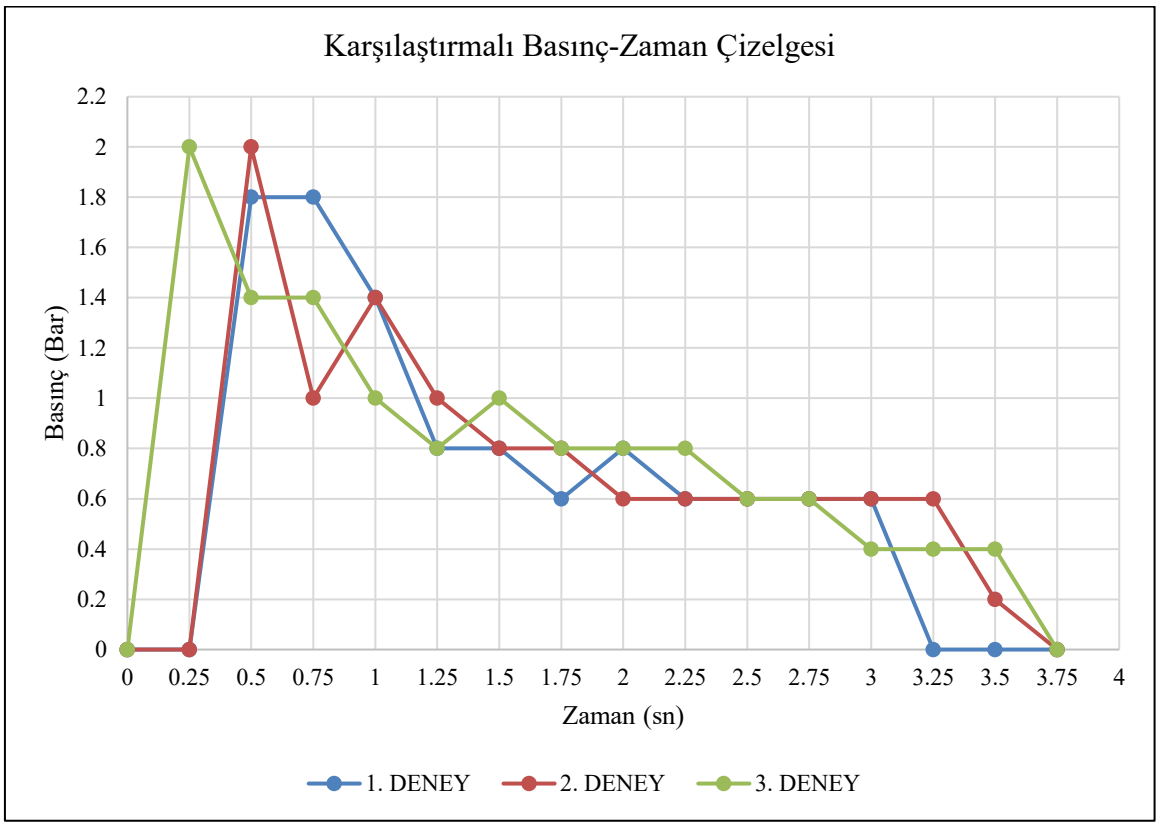
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yeni tasarım FVD deney esnasında ve sonrasında muhafaza edilirken dikkatlice takip edilmiş ve hiçbir yağ sızıntısı gözlemlenmemiştir. Cihaz, tüm piston genliği boyunca çalışmasına rağmen sızdırmazlık elemanları etkinliğini korumuş ve sistemin sorunsuz çalışmasını sağlamıştır. Gerçekleştirilen üç deneyin her birinde, FVD'nin dinamik yükleme karşısındaki deplasman ve basınç tepkileri 5. Bölümde aktarıldığı üzere incelenip grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Deplasman-zaman grafikleri incelendiğinde piston kolunun dinamik yükleme bağlı olarak giderek azalan bir şekilde deplasman yaptığı görülmektedir. Üç deneyde de benzer eğriler elde edilmiş olup, bu durum deney sisteminin tekrarlanabilirliğini ve FVD sistemin mekanik tutarlılığını göstermektedir (Şekil 6.1). Sadece üçüncü deney grafiği ilk iki deneyden biraz daha farklı oluşmaktadır. Bu durumun sebebi olarak deney düzeneği harekete geçtiği sırada FVD'nin zincirle bağlı olmasından kaynaklı bir miktar salınım yapması veya AutoCAD üzerinden ölçüm yapılırken küçük hataların kümülatif olarak bir fark yaratmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Özellikle deplasman ölçümlerinde ilk ve son ölçümlerden elde edilen değerlerin, bilinen minimum ve maksimum deplasman değeri olan 0 ile 174 mm'den farklı olması ikinci ihtimali güçlendirmektedir.



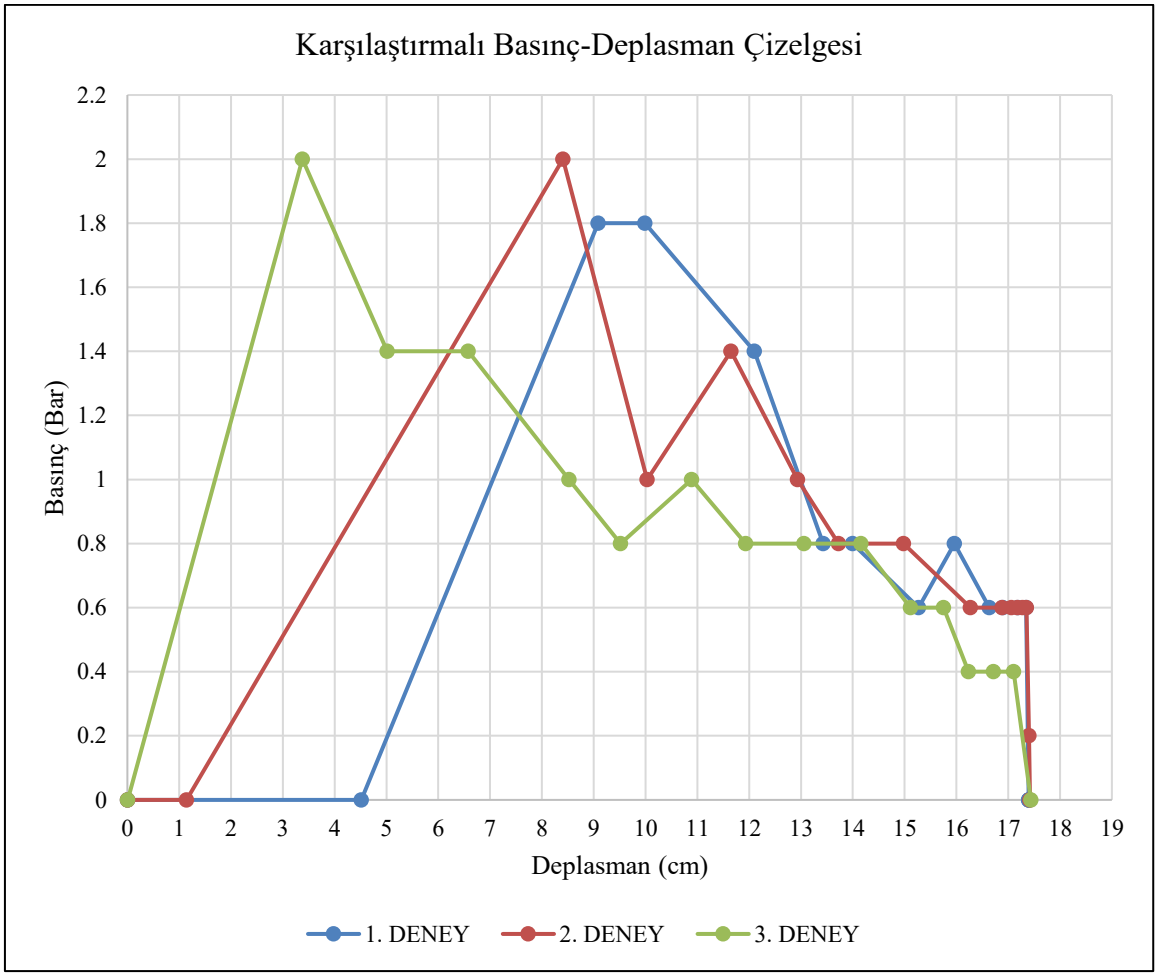
Şekil 6.1. Karşılaştırmalı deplasman-zaman grafiği

Manometre okumalarından elde edilen veriler doğrultusunda oluşturulan basınç-zaman grafiklerinde, pistonun hareketiyle birlikte iç basınçta ani artışlar meydana geldiği ve ardından FVD içerisindeki viskoz sıvının sönümleme etkisiyle birlikte basıncın yaklaşık 0,6 – 0,8 bar civarında dengelendiği gözlemlenmektedir (Şekil 6.2). Sistemin ilk tepkisi sonucu oluşan yüksek iç basınç pikleri, her deneyde yaklaşık 1,8 – 2,0 bar olarak ölçülmüştür. Bu durum, yeni FVD sistemin ilk enerji sönümleme kapasitesinin kararlı olduğunu göstermektedir.



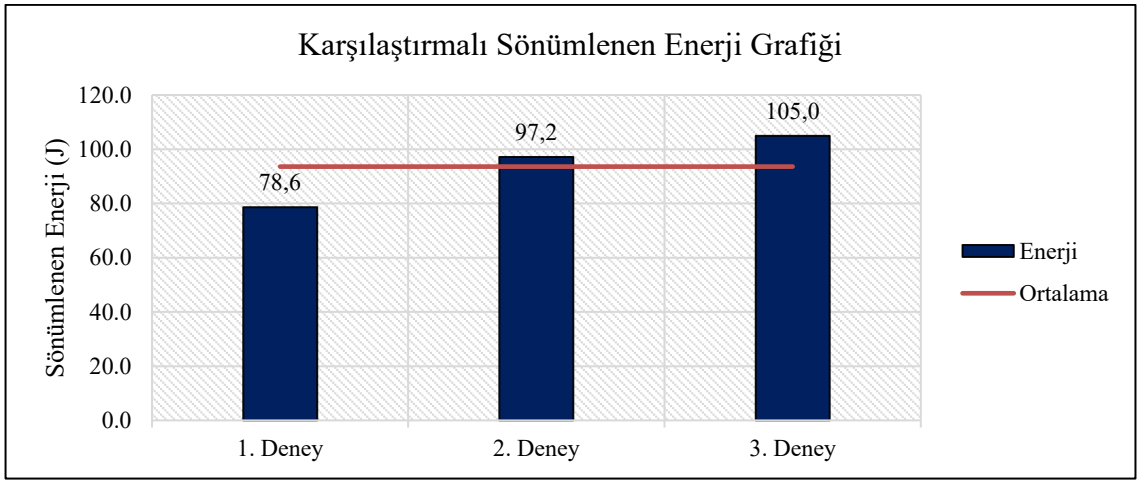
Şekil 6.2. Karşılaştırmalı basınç-zaman grafiği

Her bir deney için oluşturulan basınç-deplasman grafiklerinde, FVD sistemin karakteristik histerik davranışı gözlenebilmektedir. FVD'ye, laboratuvar imkanları dahilinde çevrimsel yükleme yapılamaması nedeniyle oluşan grafikler sadece tek yönlü elde edilebilmektedir (Şekil 6.3). Bu eğriler, piston kolu hareket ettikçe iç basıncın değiştiğini ve sistemin enerji sönümleme kapasitesini temsil eden kapalı çevrimler oluşturabileceğini göstermektedir. Söz konusu eğriler, sistemin piston konumuna bağlı olarak kademeli direnç artışı sağladığı ve her deneyde benzer şekilde tekrarladığını ortaya koymaktadır. Oluşan farklar, manometrelerin okunması sırasında yapılan ufak hatalardan veya manometrenin hassasiyetinden kaynaklı küçük gecikmelerden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.3. Karşılaştırmalı basınç-deplasman grafiği

Deneysel çalışma bölümünün son kısmında elde edilmiş olan Kuvvet-deplasman grafiklerinde eğrilerin altında kalan alanlar trapez yöntemi ile hesaplanmış ve her bir deneyde sönümlenen enerjiler değerleri elde edilmiştir. Joule cinsinden elde edilen bu değerler ve ortalama enerji sönümleme miktarı sütun grafiğinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 6.4). Sonuçlara göre deneylerde sırasıyla yaklaşık 78,6, 97,2 ve 105,0 J enerji sönümlenmiştir. Ortalama değer yaklaşık 93,6 J olmakla birlikte, sonuçlar arasında oluşan farkların basınç-zaman grafiği için bahsedilen durumlardan dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 6.4. Karşılaştırmalı sönümlenen enerji grafiği

Deneyler sonucunda elde edilmiş olan dört set verinin karşılaştırmalı grafiklerinde görüldüğü üzere gerek deplasman gerekse basınç davranışlarının oldukça benzer ve tutarlı olduğu görülmektedir. Bu durum deney düzeneğinin uygunluğunu ve kullanılabilir olduğunu, aynı zamanda yeni FVD sistemin farklı tekrarlarda da benzer performanslar gösterdiğini doğrulamaktadır.

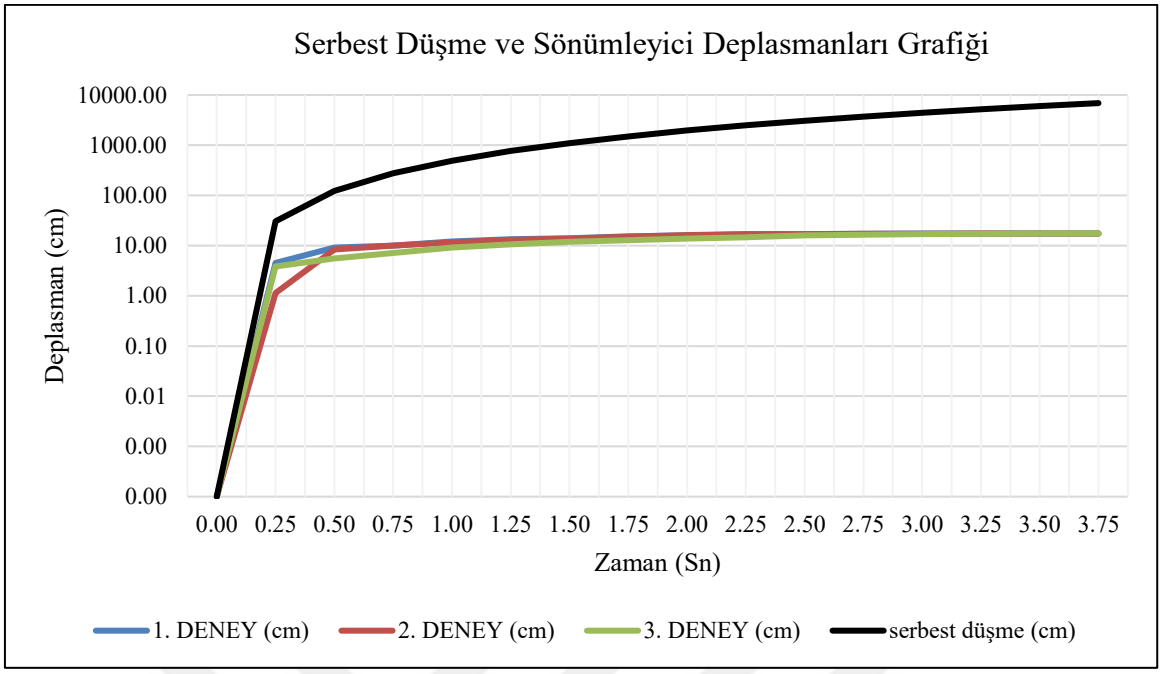
Yeni tasarım FVD, veri ve imkân eksikliği nedeni ile mevcut bir tasarım FVD ile doğrudan kıyaslanamadığı için, deneylerden elde edilen zamana bağlı deplasman eğrileri ile serbest düşme hareketiyle karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 6.5). Siyah renk ile gösterilen eğri, herhangi bir sönüm veya dış direnç bulunmaksızın yalnızca yerçekimi etkisinde serbest bırakılan bir kütlenin teorik olarak zamana bağlı olarak alacağı yolu (deplasmanı) ifade etmektedir. Bu eğri, Newton'un Eşitlik 6.1'de verilen serbest düşme denklemi ile hesaplanmış ve deneylerden elde edilen eğriler ile birleştirilerek karşılaştırmalı bir grafik oluşturulmuştur. Serbest düşme eğrisinin parabolik artan, deney eğrilerinin ise parabolik azalan olması sebebiyle; daha anlaşılır olması adına logaritmik ölçekle grafik son haline getirilmiştir.

$$\Delta = \frac{1}{2} * g * t^2 \qquad (6.1)$$

Δ: Deplasman

g: Yerçekimi İvmesi

t: Zaman



Şekil 6.5. Serbest düşme ve sönümleyici deplasmanları grafiği

Deney eğrileri ile serbest düşme eğrisi arasındaki belirgin fark, yeni tasarım FVD'nin hareketi ne derece yavaşlattığını ortaya koymaktadır. Aynı zaman aralığında, serbest düşme eğrisi çok daha yüksek deplasman değerlerine ulaşırken; sistemin dahil olduğu eğriler çok daha sınırlı deplasman oluşturmuştur. Bu durum, tasarımın mekanik enerjiyi başarıyla sönümlediğini açık bir şekilde göstermektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen deneysel bulgular, yeni tasarlanan FVD sistemin piston konumuna bağlı olarak kademeli direnç artışı gösteren bir profile sahip olduğunu ve klasik FVD sistemlerine göre yenilikçi bir yaklaşım ile sönümleme performansı sunduğunu göstermektedir. Kısıtlı imkanlar ve süre dahilinde tasarlanıp geliştirilen sistemin deney düzeneği geliştirilmeye açıktır. Mobil vinç yardımı ile yükseltilen FVD, dinamik yüklemeler sonucu ufak salınımlar yapmaktadır ve 6. Bölümde bahsedildiği üzere ölçümlerde ufak hatalara sebebiyet verebilmektedir. Daha doğru veriler elde edilmesi adına, sönümleyicinin sabitlenebileceği bir çerçeve sistem oluşturulması, basınç değerlerinin daha doğru okunabilmesi için 10 bar'lık CL 2,5 bir manometre yerine daha hassas bir manometre kullanılması, daha yüksek çözünürlüklü ve daha ağır çekim yapabilen bir kamerayla sabit kayıt yapılması, kuvvet kolu ve mesnet mekanizması yerine hidrolik kriko benzeri bir mekanizma ile dinamik yükleme yapılması, teorik olarak serbest düşme hareketiyle kıyaslamanın yanı sıra temin edilebilecek klasik tasarıma sahip başka FVD sistemlerle aynı şartlar altında karşılaştırılması mevcut aşama için önerilebilmektedir.

Tez kapsamında beklenen davranışı ortaya koyan yeni tasarımın, sistemdeki baypas borularının çapı ve sayısının sönümleme davranışına etkisi, farklı sıcaklıklar altındaki sistem davranışı, çevrimsel yüklemeler ile histeresiz eğrisinin tam oluşturulması gibi farklı deneyler ile etkinliği ve karakteristiğinin daha iyi gözlemlenebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM E2126-11: Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings. *ASTM*, West Conshohocken, 1–15.

2. Ataei, H., Anaraki, K. K. (2018). A proposed structural design method considering fluid viscous damper degradations. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(15), 1–15.

3. Berquist, M., De Pasquale, R., Frye, S., Gilani, A., Klembczyk, A., Lee, D., Loehr, T., McCormick, J., Smith, C. (2022). *Fluid viscous dampers: General guidelines for engineers including a brief history*. North Tonawanda: Taylor Devices Inc., 10–30.

4. Cavaleri, L., Di Trapani, F., Ferrotto, M. F. (2017). Experimental determination of viscous damper parameters in low velocity ranges. *Ingegneria Sismica*, 34(3), 77–89.

5. Chopra, A. K. (2001). Dynamics of structures: *Theory and applications to earthquake engineering* (2. baskı). Upper Saddle River: Prentice Hall, 612-615.

6. Chou, C.-C., Chen, Y.-C. (2015). Development of steel dual-core self-centering braces. *Earthquake Spectra*, 31(1), 247–272.

7. Christopoulos, C., Filiatrault, A. (2006). *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Pavia: IUSS Press, 1–35.

8. Constantinou, M. C., Symans, M. D. (1993). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *Structural Design of Tall Buildings*, 1(2), 93–110.

9. Ebadi Jamkhaneh, M., Ebrahimi, A. H., Shokri Amiri, M. (2019). Experimental and numerical investigation of steel moment resisting frame with U-shaped metallic yielding damper. *International Journal of Steel Structures*, 19(3), 806–818.

10. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356). *FEMA*, Washington, DC, 3–37.

11. Feng, Q., Ding, S., Song, J. (2007). Testing of fluid viscous damper. *Shanghai Research Institute of Materials*, Shanghai, 1–9.

12. Fitzgerald, T. F., Anagnos, T., Goodson, M., Zsutty, T. (1989). Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections. *Earthquake Spectra*, 5(2), 383–391.

13. Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Yao, J. T. P. (1997). Structural control: Past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897–971.

14. Hu, S., Yang, M., Meng, D., Hu, R. (2023). Damping performance of the degraded fluid viscous damper due to oil leakage. *Structures*, 48(1), 1609–1619.

15. International Organization for Standardization. (2003). ISO 16670: Mechanical properties of structural dampers—Dynamic characteristics tests. *ISO*, Geneva, 1–22.

16. İnternet: Ayarlı kütle sönümleyici resmi, URL: https://isaacantisismica.com/en/who-invented-mass-dampers/, Son Erişim Tarihi: 14.04.2025.

17. İnternet: Katmanlı kauçuk sönümleyici resmi, URL: https://fagosismikizolasyon.com/lrb-lead-rubber-bearing/, Son Erişim Tarihi: 14.04.2025.

18. İnternet: Manyetoreolojik sönümleyici resmi, URL: https://bohai.co/product/c-series, Son Erişim Tarihi: 14.04.2025.

19. İnternet: UMYD ve polimerik blok sönümleyici resmi, URL: https://engineeringdiscoveries.com/earthquake-resistant-systems-to-protect-buildings-from-damage/, Son Erişim Tarihi: 14.04.2025.

20. Kareem, A. (1990). Reduction of wind-induced motion utilizing a tuned sloshing damper. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, 725–737.

21. Law, S. S., Wu, Z. M., Chan, S. L. (2006). Analytical model of a slotted bolted connection element and its behaviour under dynamic load. *Journal of Sound and Vibration*, 292(3–5), 777–787.

22. Li, Z., Wang, J., Li, C., Cao, J. (2023). Optimum arrangement of TADAS dampers for seismic drift control of buildings using accelerated iterative methods. *Buildings*, 13(11), 2720.

23. Liu, Y., Zhang, Y., Spencer, B. F. (2001). MR damper modeling using phenomenological and semi-physical methods. *Engineering Structures*, 23(7), 872–881.

24. Mahmoodi, P., Robertson, L., Yontar, M., Moy, C., Feld, L. (1987). Performance of viscoelastic dampers in World Trade Center towers. *Dynamics of Structures*, ASCE, 1–24.

25. Makris, N., Constantinou, M. C. (1991). Fractional-derivative Maxwell model for viscous dampers. *Journal of Structural Engineering, 117*(9), 2708–2724.

26. Makris, N., Constantinou, M. C. (1991). *Viscous dampers: Testing, modeling and application in vibration and seismic isolation*. State University of New York at Buffalo, Buffalo, 1–65.

27. Ocak, A., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Kim, S., Geem, Z. W. (2022). Optimization of tuned liquid damper including different liquids for lateral displacement control of single and multi-story structures. *Buildings*, 12(3), 377.

28. Pall, A. S., Marsh, C. (1982). Response of friction damped braced frames. *Journal of Structural Division*, 108(6), 1313–1323.

29. Park, W. C., Choi, S. B., Suh, M. S. (1999). Material characteristics of an ER fluid and its influence on damping forces of an ER damper. Part II: Damping forces. *Materials ve Design*, 20(6), 325–330.

30. Preumont, A. (2011). *Vibration control of active structures: An introduction* (2. baskı). Dordrecht: Springer, 1–422.

31. Shao, D., Pall, A. S., Soli, B. (2006). *Friction dampers for seismic upgrade of a 14 story patient tower with a 36 foot tall soft story*. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, 4648.

32. Shen, W., Long, Z., Cai, L., Niyitangamahoro, A., Zhu, H., Li, Y., Qiu, C. (2022). An inerter-based electromagnetic damper for civil structures: Modeling, testing, and seismic performance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 173, 109070.

33. Soong, T. T., Dargush, G. F. (1997*). Passive energy dissipation systems in structural engineering*. New York: John Wiley ve Sons, 1–165.

34. Soong, T. T., Spencer, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243–259.

35. Spencer, B. F., Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845–856.

36. Sun, L. M. (1991*). Semi-analytical modeling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing* (Doktora tezi). University of Tokyo, Tokyo.

37. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2016). Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik (Resmî Gazete No: 29614). *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 1–139.

38. Taylor Devices Inc. (2019). *Fluid viscous dampers: General guidelines for engineers including a brief history*. North Tonawanda: Taylor Devices Inc., 1–181.

39. Taylor, D. P., Constantinou, M. C. (1994*). Test methodology and procedures for fluid viscous dampers used in structures to dissipate seismic energy.* North Tonawanda: Taylor Devices Inc., 1–44.

40. Titirla, M. D. (2023). A state-of-the-art review of passive energy dissipation systems in steel braces. *Buildings*, 13(4), 851.

41. Totten, G. E. (1999). *Handbook of hydraulic fluid technology*. Boca Raton: CRC Press, 263–266.

42. Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., Su, Y.-F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake Spectra*, 9(3), 505–528.

43. Türk Standartları Enstitüsü. (1980). TS 648:1980 – Çelik yapıların hesap ve yapım kuralları, *TSE*, Ankara, 1–49.

44. Türk Standartları Enstitüsü. (2007). TS EN 1993-1-6: Çelik yapıların tasarımı – Bölüm 1-6: Kabuk yapıların genel kuralları, *TSE*, Ankara, 1–49.

45. Türk Standartları Enstitüsü. (2008). TS EN 837-1: Basınç göstergeleri – Bölüm 1: Borulu yaylı – Genel özellikler, güvenlik gerekleri, testler, *TSE*, Ankara, 1–17.

46. Türk Standardları Enstitüsü. (2020). TS EN 15129:2020 – Sismik izolasyon sistemleri – Binalar için, *TSE*, Ankara, 44–51.

47. Wang, D., Pan, W., Zhou, X., Huang, Z. (2020). Performance and mechanical model of viscoelastic laminated composite dampers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020130.

48. Wang, S. (2017). *Enhancing seismic performance of tall buildings by optimal design of supplemental energy dissipation devices*, (Doktora tezi), University of California, Berkeley.

49. Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A., Fujimoto, M. (1988). *Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube*. Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 719–724.

50. Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Alonso, J. L., Thompson, C. L. (1989). Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements, *University of California*, Berkeley, 1–136.

51. Wu, B., Zhang, J., Williams, M. S., Ou, J. (2005). Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers. *Engineering Structures*, 27(8), 1258–1267.

52. Xu, Y., Xu, Z., Guo, Y., Dong, Y., Ge, T., Xu, C. (2021). Dynamic properties and energy dissipation study of sandwich viscoelastic damper considering temperature influence. *Buildings*, 11(11), 470.

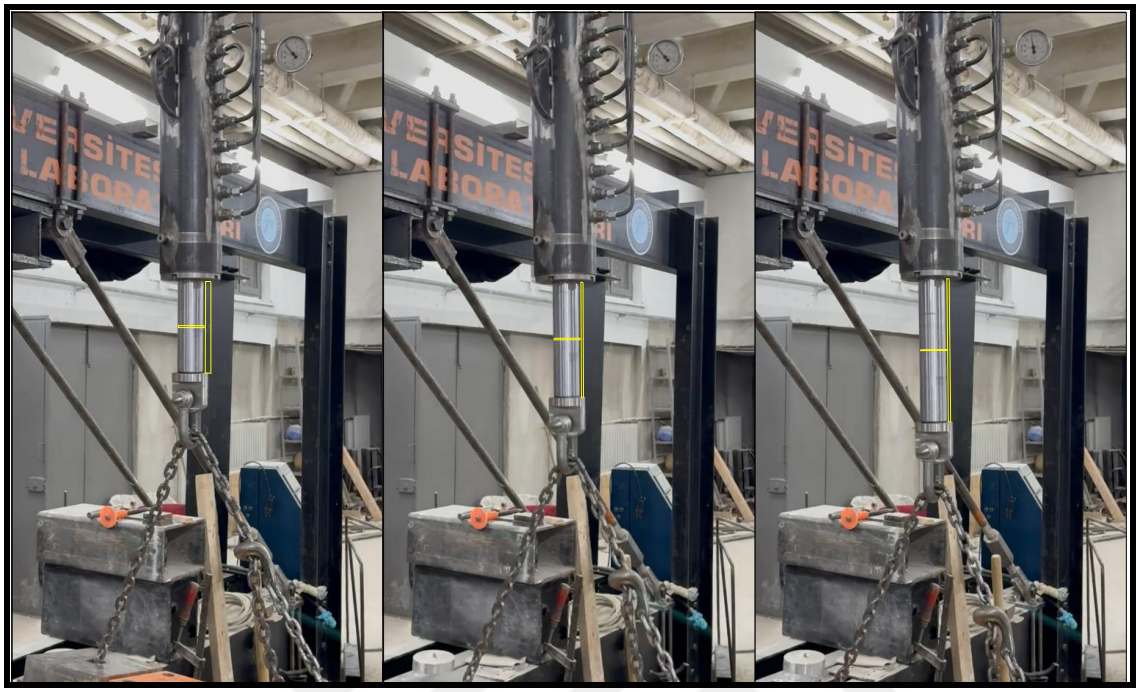
53. Yan, X., Alam, M. S., Shu, G., Qin, Y. (2023). A novel self-centering viscous damper for improving seismic resilience: Its development, experimentation, and system response. *Engineering Structures,* 279, 115632.

54. Yao, J. T. (1972). Concept of structural control. *Journal of the Structural Division*, 98(7), 1567–1574.

55. Zhuge, Y., Ma, X., Zeng, J. (2022). Recent progress in buckling restrained braces: A review on material development and selection. *Advances in Structural Engineering*, 25(7), 1549–1564.

EKLER

EK-1. 1. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

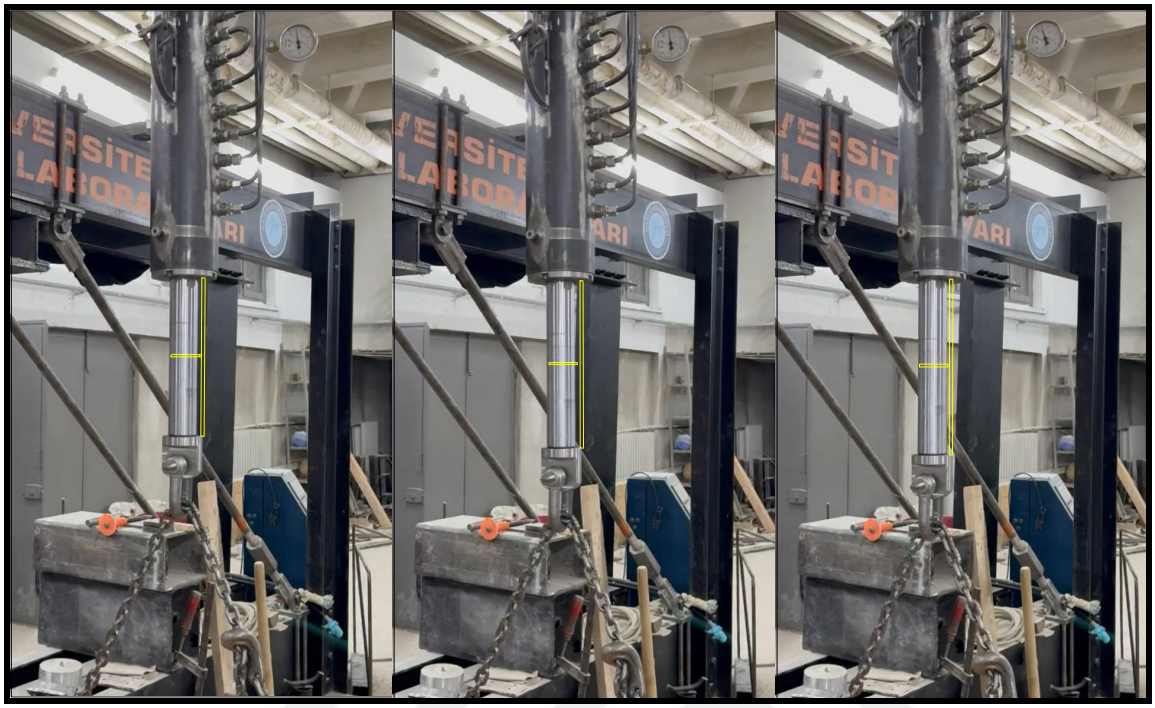


Resim 1.1. 1. Deney 1,2 ve 3 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 1.1. 1. Deney 1,2 ve 3 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

1		2		3	
Video (Sn)	13,89	Video (Sn)	14,89	Video (Sn)	15,89
t	0	t	0,25	t	0,5
d	115,36	d	114,88	d	118,31
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	401,4	L	503,45	L	626,74
Lgerçek (cm)	17,40	Lgerçek (cm)	21,91	Lgerçek (cm)	26,49
Deplasman (cm)	0,00	Deplasman (cm)	4,51	Deplasman (cm)	9,09
Basınç (Bar)	0,0	Basınç (Bar)	0,0	Basınç (Bar)	1,8

EK-1. (devam) 1. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 1.2. 1. Deney 4,5 ve 6 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 1.2. 1. Deney 4,5 ve 6 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

4		5		6	
Video (Sn)	16,89	Video (Sn)	17,89	Video (Sn)	18,89
t	0,75	t	1	t	1,25
d	124,81	d	122,5	d	123,11
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	683,71	L	722,82	L	759,11
Lgerçek (cm)	27,39	Lgerçek (cm)	29,50	Lgerçek (cm)	30,83
Deplasman (cm)	9,99	Deplasman (cm)	12,10	Deplasman (cm)	13,43
Basınç (Bar)	1,8	Basınç (Bar)	1,4	Basınç (Bar)	0,8

EK-1. (devam) 1. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 1.3. 1. Deney 7,8 ve 9 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 1.3. 1. Deney 7,8 ve 9 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

7		8		9	
Video (Sn)	19,89	Video (Sn)	20,89	Video (Sn)	21,89
t	1,5	t	1,75	t	2
d	126,17	d	123,35	d	123,31
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	792,31	L	806.02	L	822,75
Lgerçek (cm)	31,40	Lgerçek (cm)	32,67	Lgerçek (cm)	33,36
Deplasman (cm)	14,00	Deplasman (cm)	15,27	Deplasman (cm)	15,96
Basınç (Bar)	0,8	Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,8

EK-1. (devam) 1. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 1.4. 1. Deney 10,11 ve 12 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 1.4. 1. Deney 10,11 ve 12 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

10		11		12	
Video (Sn)	22,89	Video (Sn)	23,89	Video (Sn)	24,89
t	2,25	t	2,5	t	2,75
d	124,31	d	124,2	d	126,52
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	846,15	L	851,94	L	875,1
Lgerçek (cm)	34,03	Lgerçek (cm)	34,30	Lgerçek (cm)	34,58
Deplasman (cm)	16,63	Deplasman (cm)	16,90	Deplasman (cm)	17,18
Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,6

EK-1. (devam) 1. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

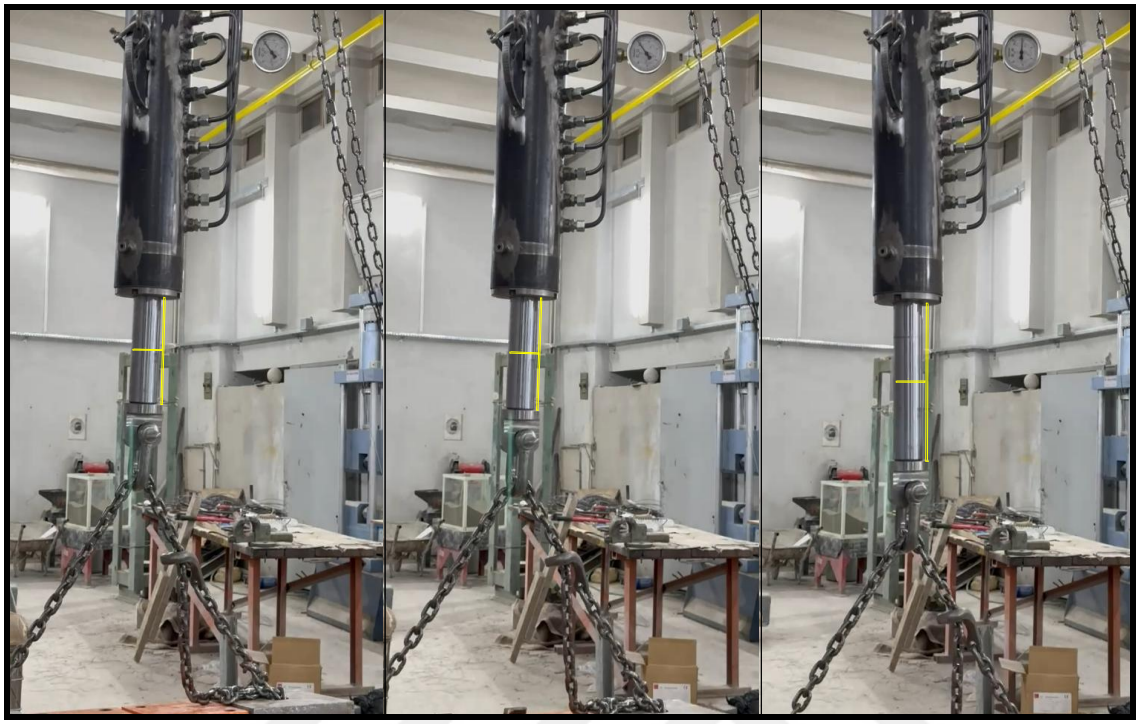


Resim 1.5. 1. Deney 13 ve 14 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 1.5. 1. Deney 13 ve 14 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

13		14	
Video (Sn)	25,89	Video (Sn)	26,89
t	3	t	3,25
d	127,69	d	127,89
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	887,39	L	890,01
Lgerçek (cm)	34,75	Lgerçek (cm)	34,80
Deplasman (cm)	17,35	Deplasman (cm)	17,40
Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0

EK-2. 2. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

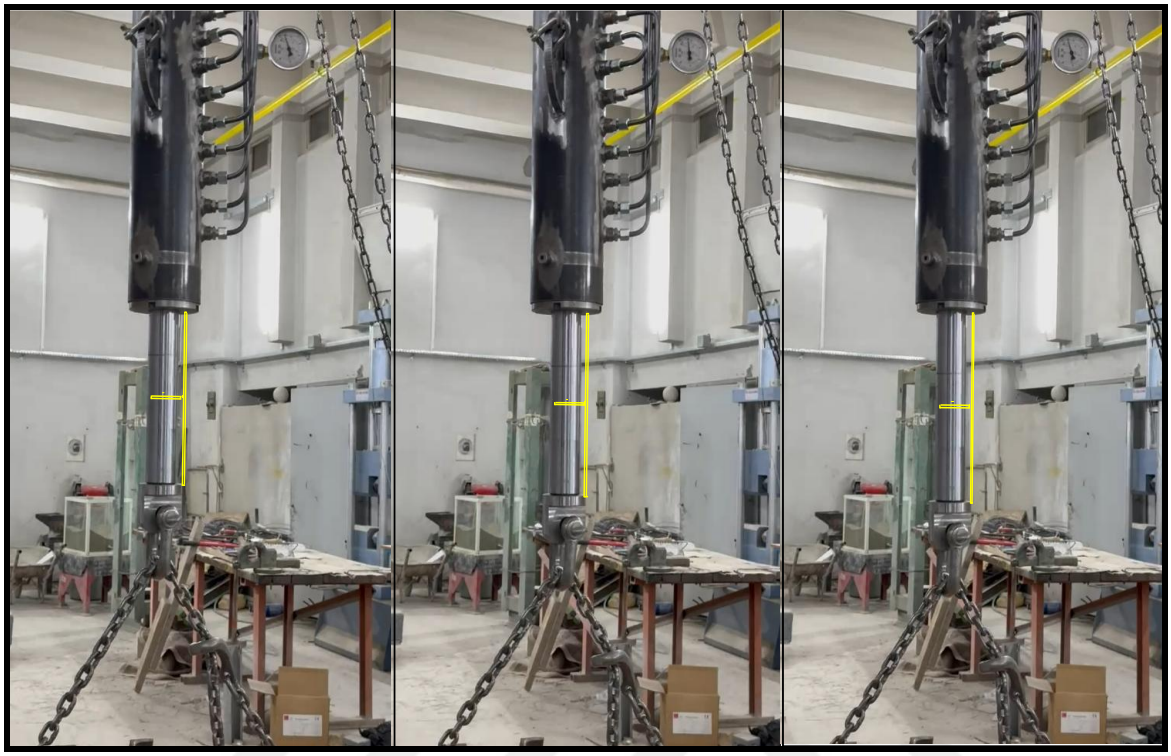


Resim 2.1. 2. Deney 1,2 ve 3 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 2.1. 2. Deney 1,2 ve 3 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

1		2		3	
Video (Sn)	6,2	Video (Sn)	7,2	Video (Sn)	8,2
t	0	t	0,25	t	0,5
d	128,8	d	126,78	d	128,61
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	448,03	L	470,18	L	663,73
Lgerçek (cm)	17,39	Lgerçek (cm)	18,54	Lgerçek (cm)	25,80
Deplasman (cm)	0,01	Deplasman (cm)	1,14	Deplasman (cm)	8,40
Basınç (Bar)	0,0	Basınç (Bar)	0,0	Basınç (Bar)	2,0

EK-2. (devam) 2. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

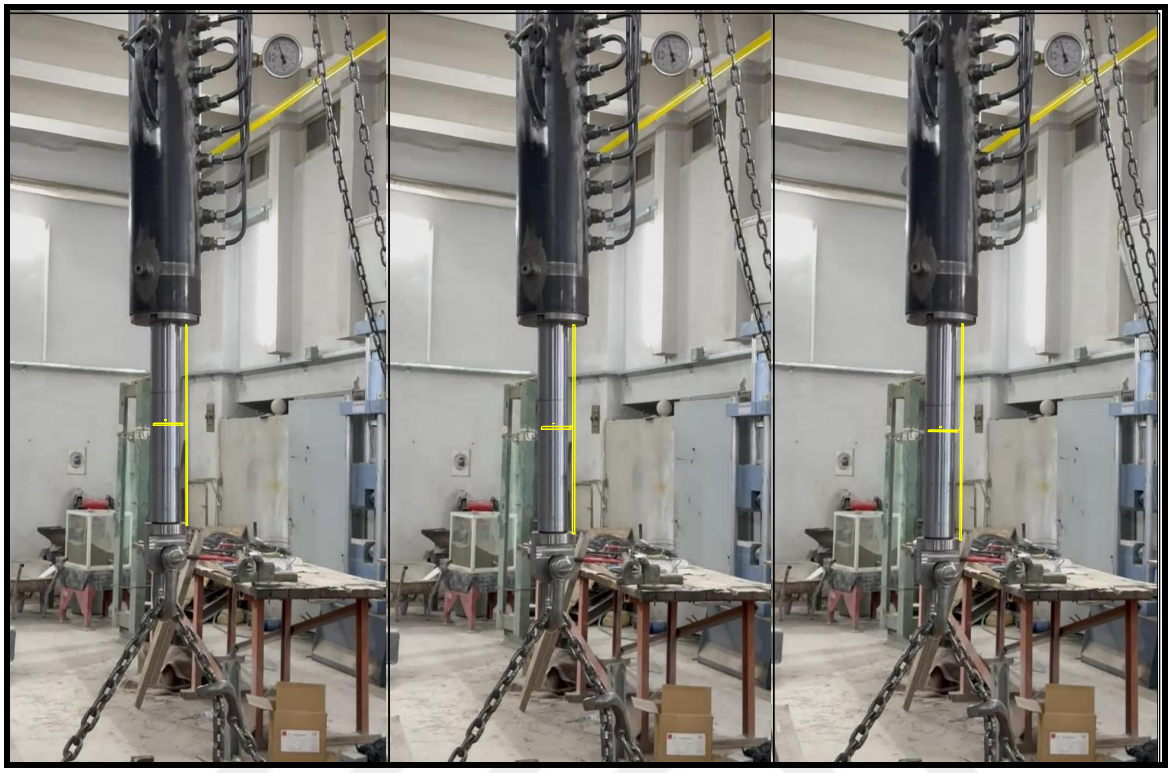


Resim 2.2. 2. Deney 4,5 ve 6 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 2.2. 2. Deney 4,5 ve 6 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

4		5		6	
Video (Sn)	9,2	Video (Sn)	10,2	Video (Sn)	11,2
t	0,75	t	1	t	1,25
d	128,2	d	128,3	d	127,22
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	703,38	L	745,37	L	771,87
Lgerçek (cm)	27,43	Lgerçek (cm)	29,05	Lgerçek (cm)	30,34
Deplasman (cm)	10,03	Deplasman (cm)	11,65	Deplasman (cm)	12,94
Basınç (Bar)	1,0	Basınç (Bar)	1,4	Basınç (Bar)	1,0

EK-2. (devam) 2. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

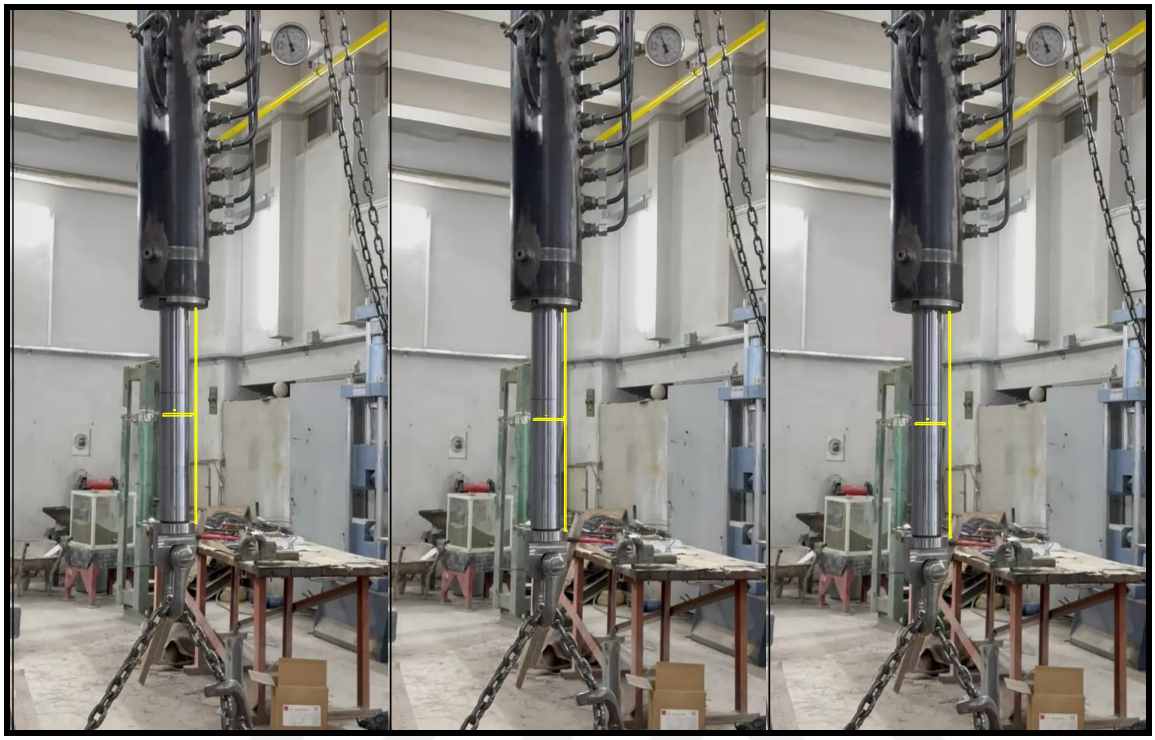


Resim 2.3. 2. Deney 7,8 ve 9 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 2.3. 2. Deney 7,8 ve 9 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

7		8		9	
Video (Sn)	12,2	Video (Sn)	13,2	Video (Sn)	14,2
t	1,5	t	1,75	t	2
d	128,62	d	128,79	d	128,24
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	800,71	L	834,08	L	863,64
$L_{gerçek}$ (cm)	31,13	Lgerçek (cm)	32,38	$L_{gerçek}$ (cm)	33,67
Deplasman (cm)	13,73	Deplasman (cm)	14,98	Deplasman (cm)	16,27
Basınç (Bar)	0,8	Basınç (Bar)	0,8	Basınç (Bar)	0,6

EK-2. (devam) 2. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

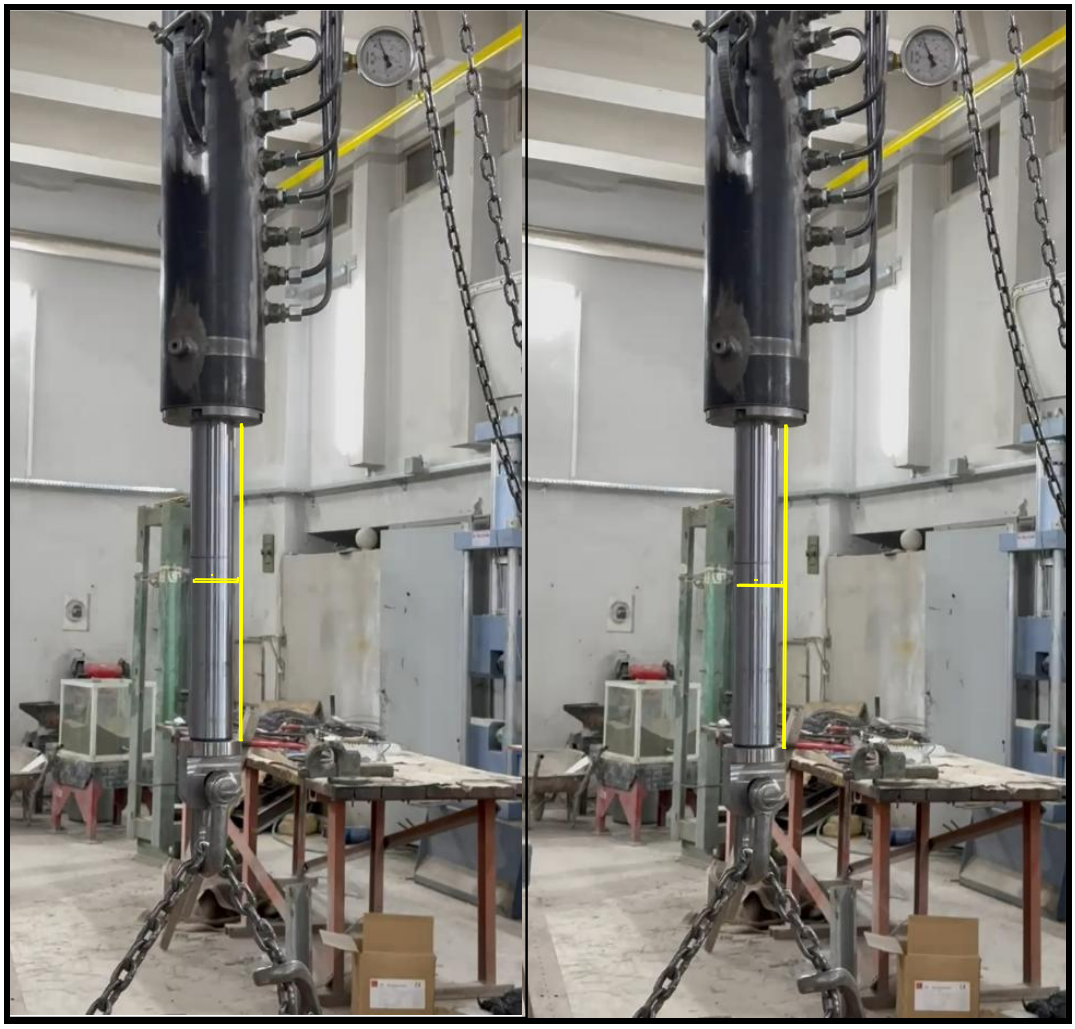


Resim 2.4. 2. Deney 10,11 ve 12 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 2.4. 2. Deney 10,11 ve 12 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

10		11		12	
Video (Sn)	15,2	Video (Sn)	16,2	Video (Sn)	17,2
t	2,25	t	2,5	t	2,75
d	128,82	d	132,49	d	134,29
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	883,23	L	913,2	L	928,73
Lgerçek (cm)	34,28	Lgerçek (cm)	34,46	Lgerçek (cm)	34,58
Deplasman (cm)	16,88	Deplasman (cm)	17,06	Deplasman (cm)	17,18
Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,6

EK-2. (devam) 2. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 2.5. 2. Deney 13 ve 14 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 2.5. 2. Deney 13 ve 14 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

13		14	
Video (Sn)	18,2	Video (Sn)	19,2
t	3	t	3,25
d	135	d	137,61
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	936,27	L	956,42
Lgerçek (cm)	34,68	Lgerçek (cm)	34,75
Deplasman (cm)	17,28	Deplasman (cm)	17,35
Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,6

EK-2. (devam) 2. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 2.6. 2. Deney 15 ve 16 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 2.6. 2. Deney 15 ve 16 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

15		16	
Video (Sn)	20,2	Video (Sn)	21,2
t	3,5	t	3,75
d	138,3	d	136,88
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	962,52	L	953,22
Lgerçek (cm)	34,80	Lgerçek (cm)	34,82
Deplasman (cm)	17,40	Deplasman (cm)	17,42
Basınç (Bar)	0,2	Basınç (Bar)	0

EK-3. 3. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 3.1. 3. Deney 1,2 ve 3 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 3.1. 3. Deney 1,2 ve 3 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

1		2		3	
Video (Sn)	23,9	Video (Sn)	24,9	Video (Sn)	25,9
t	0	t	0,25	t	0,5
d	121,99	d	121,6	d	120,39
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	424,35	L	516,31	L	552,92
Lgerçek (cm)	17,39	Lgerçek (cm)	21,23	Lgerçek (cm)	22,96
Deplasman (cm)	0,01	Deplasman (cm)	3,83	Deplasman (cm)	5,56
Basınç (Bar)	0,0	Basınç (Bar)	2,0	Basınç (Bar)	1,4

EK-3. (devam) 3. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 3.2. 3. Deney 4,5 ve 6 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 3.2. 3. Deney 4,5 ve 6 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

4		5		6	
Video (Sn)	26,9	Video (Sn)	27,9	Video (Sn)	28,9
t	0,75	t	1	t	1,25
d	121,35	d	119,8	d	119,97
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	595,29	L	636,12	L	670,14
Lgerçek (cm)	24,53	Lgerçek (cm)	26,55	Lgerçek (cm)	27,93
Deplasman (cm)	7,13	Deplasman (cm)	9,15	Deplasman (cm)	10,53
Basınç (Bar)	1,4	Basınç (Bar)	1,0	Basınç (Bar)	0,8

EK-3. (devam) 3. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler

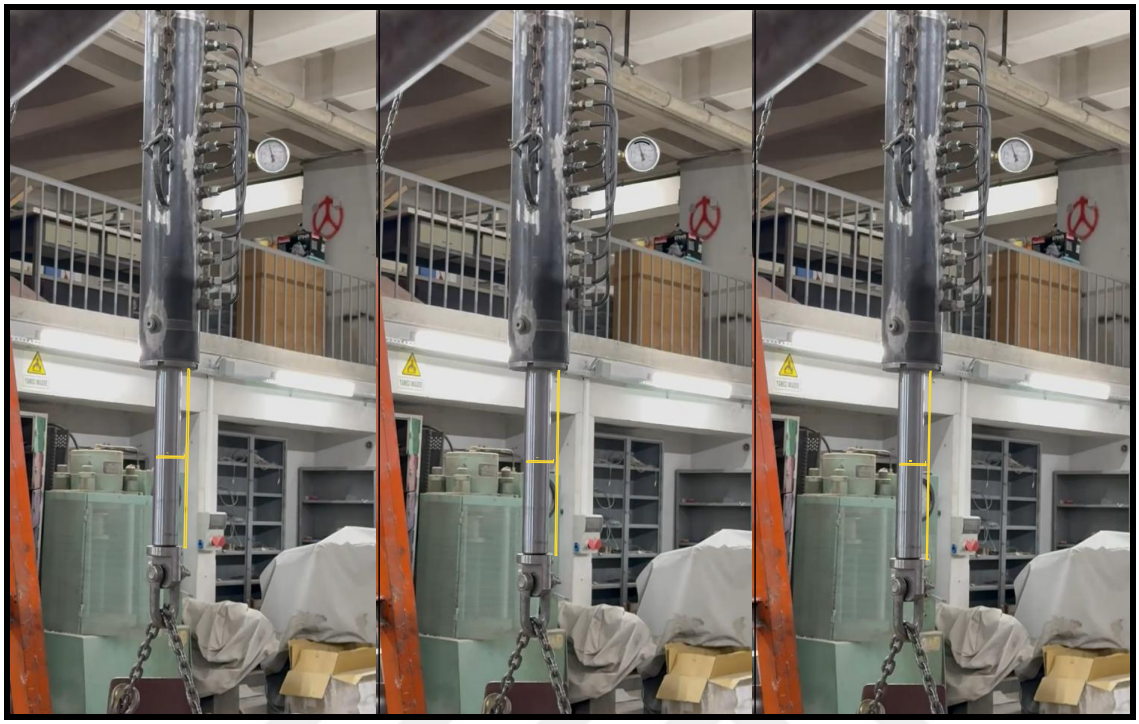


Resim 3.3. 3. Deney 7,8 ve 9 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 3.3. 3. Deney 7,8 ve 9 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

7		8		9	
Video (Sn)	29,9	Video (Sn)	30,9	Video (Sn)	31,9
t	1,5	t	1,75	t	2
d	119,64	d	121	d	120,87
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	702,81	L	729,9	L	752,2
$L_{gerçek}$ (cm)	29,37	Lgerçek (cm)	30,16	$L_{gerçek}$ (cm)	31,12
Deplasman (cm)	11,97	Deplasman (cm)	12,76	Deplasman (cm)	13,72
Basınç (Bar)	1,0	Basınç (Bar)	0,8	Basınç (Bar)	0,8

EK-3. (devam) 3. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 3.4. 3. Deney 10,11 ve 12 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 3.4. 3. Deney 10,11 ve 12 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

10		11		12	
Video (Sn)	32,9	Video (Sn)	33,9	Video (Sn)	34,9
t	2,25	t	2,5	t	2,75
d	120,79	d	120,14	d	120,02
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	775,46	L	801,16	L	814,85
Lgerçek (cm)	32,10	Lgerçek (cm)	33,34	Lgerçek (cm)	33,95
Deplasman (cm)	14,70	Deplasman (cm)	15,94	Deplasman (cm)	16,55
Basınç (Bar)	0,8	Basınç (Bar)	0,6	Basınç (Bar)	0,6

EK-3. (devam) 3. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 3.5. 3. Deney 13 ve 14 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 3.5. 3. Deney 13 ve 14 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

13		14	
Video (Sn)	35,9	Video (Sn)	36,9
t	3	t	3,25
d	119,91	d	121,26
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	823,28	L	840,61
Lgerçek (cm)	34,33	Lgerçek (cm)	34,66
Deplasman (cm)	16,93	Deplasman (cm)	17,26
Basınç (Bar)	0,4	Basınç (Bar)	0,4

EK-3. (devam) 3. Deney ekran görüntüleri ve hesaplanan değerler



Resim 3.6. 3. Deney 15 ve 16 numaralı ekran görüntüleri

Çizelge 3.6. 3. Deney 15 ve 16 numaralı ekran görüntülerinden okunan/hesaplanan değerler

15		16	
Video (Sn)	37,9	Video (Sn)	38,9
t	3,5	t	3,75
d	122,62	d	122,7
dgerçek (cm)	5	dgerçek (cm)	5
L	851,89	L	854,43
Lgerçek (cm)	34,74	Lgerçek (cm)	34,82
Deplasman (cm)	17,34	Deplasman (cm)	17,42
Basınç (Bar)	0,4	Basınç (Bar)	0



Gazili olmak ayrıcalıktır