



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.08.2022  
Kabul Tarihi : 22.12.2022

Received Date : 04.08.2022  
Accepted Date : 22.12.2022

### SÜRTÜNMELİ SÖNÜMLEYİCİNİN DEPREM DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

#### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FRICTION DAMPER ON THE EARTHQUAKE BEHAVIOR

Elif BORU <sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-1661-7673)  
Emine AYDIN <sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-9191-5190)  
Mert GÜRBÜZ <sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-9441-3441)

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Elif BORU, eorak@subu.edu.tr

#### ÖZET

Binaların güçlendirilmesinde binada perde duvarların veya sönümleyicilerin kullanıldığı görülmektedir. İki uygulama arasından sönümleyiciler zaman tasarrufu ve uygulama kolaylığı açısından ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada sürtünmeli sönümleyicilerin küçük ölçekli binanın deprem davranışına olan etkisi incelenmiştir. İncelemede tek açıklıklı ve tek katlı çelik deneysel model bina oluşturularak sarsma tablasında deneysel olarak, SAP2000 programında ise nümerik olarak sürtünmeli sönümleyicinin binanın deprem davranışına etkisi belirlenmiştir. Nümerik kısımda Zaman Tanım Alanında Analiz kullanılarak binaya iki farklı deprem kaydı uygulanmıştır. Sönümleyicili ve sönümleyicisiz binanın frekans ve tepe noktası yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılarak sürtünmeli sönümleyicinin model binanın davranışına etkisi belirlenmiştir. Sürtünmeli sönümleyici binanın frekansının %121, yerdeğiştirme değerinin ise depremin büyüklüğüne bağlı olarak en az %70 azalmasını sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünmeli sönümleyici, sarsma tablası deneyi, deneysel modal analiz, zaman tanım alanında analiz

#### ABSTRACT

Shear walls or dampers are widely used in building strengthening. Among the two applications, dampers come to the fore in terms of time saving and ease of application. In this study, the effect of friction dampers on the earthquake behavior of the small-scale model building was investigated. In the study, a single-span and single-storey steel model building was created and the effect of the friction damper on the earthquake behavior of the building was determined experimentally in the shaking table and numerically in the SAP2000 program. Two different earthquake records were applied to the building by using Time History Analysis in the numerical part. By comparing the frequency and peak displacement values of the building with and without the damper, the effect of the friction damper on the building behavior was determined. The friction damper reduced the frequency of the building by 121% and the displacement value by at least 70% depending on the magnitude of the earthquake.

**Keywords:** Friction damper, shake table test, experimental modal analysis, time history analysis

## GİRİŞ

Mevcut betonarme yapıların, yapı elemanlarında güçlendirme gerekliliği olmasının yanında, yapı sistemi genelinde, deprem etkileri altında davranışının iyileştirilmesi de gerekmektedir. Betonarme binaların güçlendirilmesinde birçok yöntem vardır. En fazla kullanılan yöntemlerden birisi binaya perde duvarlar eklenmesidir. Mevcut betonarme yapıların, deprem etkisindeki davranışlarının iyileştirilmesi, yapısal elemanlar açısından olumlu etki yapmaktadır (Boru ve Aydın, 2022; Aydın ve Boru, 2020; Ersin, 2017). Geleneksel yapı tasarım yöntemlerinde, sismik enerji çoğu zaman yapı elemanlarında meydana gelen deformasyonlarla sönmülenmek üzere tasarlanmaktadır. Bunun sonucunda da büyük depremlerde kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir ve yapının tekrar kullanılabilir hale gelmesi için onarılması zorunlu hale gelmektedir (Wang vd., 2021). Yapıların görelî kat ötelemelerini azaltarak yapı sisteminde iyileşme sağlanması ilave perdelerin eklenmesi ile sağlanabildiği gibi; yapıya aktif veya pasif sönmüleyicilerin ilave edilmesi ile de sağlanabilmektedir (Naimi ve Waheb, 2019; Ersin, 2017; Ayazoğlu, 2015).

Modern güçlendirme yöntemlerine bakıldığında perde duvar yerine sönmüleyicilerin kullanıldığı görülmektedir. Sönmüleyiciler zaman tasarrufu ve uygulama kolaylığı açısından ön plana çıkmaktadır. Uygulamada aktif ve pasif olarak farklı sönmüleyici çeşitleri bulunmaktadır. Pasif sönmüleyiciler hız ve yer değiştirmeye bağlı olarak gruplandırılabilirler. Yer değiştirmeye bağlı pasif sönmüleyici çeşidi olan sürtünmeli sönmüleyiciler, sismik yüklerden meydana gelen taban kesme kuvvetini enerji yutma kapasitesi ile sönmülemektedirler. Bu sayede yapıdaki diğer mevcut elemanlarda doğrusal elastik olmayan deformasyonlar azalmaktadır.

Pasif enerji sönmüleyiciler, yapısal elemanlarda oluşan kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri yönetmelik sınırlarında tutmak amacıyla, kolon giriş birleşim bölgelerine veya kat aralarına yerleştirilen mekanik elemanlardır. Bu sönmüleyiciler, yapıda oluşan kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek sönmülerler. Hıza ve yer değiştirmeye bağlı pasif sönmüleyiciler olarak sınıflandırılacakları gibi çevrimsel ve visko-elastik sistemler olarak da sınıflandırılmaktadırlar (Ercan ve Nuhoglu, 2005). Pasif sönmüleyiciler içinde yer değiştirmeye bağlı sönmüleyici çeşitlerinden biri olan sürtünmeli sönmüleyiciler, yapının çevrimsel davranışı esnasında sönmüleyebildiği enerji miktarı bakımından öne çıkan bir sönmüleyici çeşididir. Sürtünmeli sönmüleyiciler, istenen enerji dağılımını sağlamak için birbirine göre kayan iki katı cisim arasında gelişen katı sürtünme mekanizmasından yararlanır. Bu tür sönmüleyiciler, deprem hareketlerinde sürtünme ile enerjiyi sönmülemek için önceden belirlenmiş bir yük seviyesinde kayarlar ve bu kayma sonucunda enerjinin sönmülenmesi sağlanır. Yapılarda birçok farklı tipte ticari olarak temin edilebilir sürtünmeli sönmüleyici incelenmiş ve üretilmiştir (Deringöl, 2013). Üretilen bu sürtünmeli sönmüleyiciler, yüksek mukavemetli civataya uygulanan ön germe kuvvetiyle sürtünme kuvveti kontrol edilebilen bir performansa sahiptir. Basit bir yapıya ve ucuz maliyete sahip bu sönmüleyiciler oldukça istikrarlı performansa sahiptir ve yapının maruz kaldığı deprem ve rüzgar yükü kaynaklı enerjiyi sönmüleyebilirler (Zhang ve Wang, 2019).

Sürtünmeli sönmüleyicilerin yapılarıdaki enerjiyi sönmülemesi amacıyla ilk kullanma fikri 1979 yılında Avtar Pall tarafından doktora tezinde geniş panellerin sismik davranışlarının kontrol edilmesi amacıyla sunulmuştur (Pall, 1979). Çerçeve sistemlerin karakteristik sönmü yaklaşık olarak %5'tir. Ancak, Pall sürtünmeli sönmüleyicilerle donatılan çerçevelerin karakteristik sönmüleri %50'lere kadar çıkabilmekte ve farklı mimari ve mühendislik ihtiyaçlarına göre X çaprazlı, tek diyagonal tip ve şevron çapraz olmak üzere üç farklı çapraz düzenine sahiptir. Pall sürtünmeli sönmüleyicilerinin diğer sürtünme sönmüleyicilere üstünlüğü, rüzgar ve küçük sismik hareketler sırasında aktif olmamalarıdır. Yapıya gelen yanal yükler önceden belirlenmiş kayma yük seviyesini aştığında, Pall sürtünmeli sönmüleyiciler kaymaya başlar ve gelen enerjiyi sönmülerler.

Sürtünme esaslı sönmüleyicilerde temas yüzeylerinde oluşan kayma hareketi sonucunda meydana gelen sürtünme kuvvetinin ve kayma deformasyon kapasitesinin, stabil olarak korumak amacıyla yüzeyde farklı malzemeler kullanılmaktadır (Akpınar vd., 2021). Tasarlanan ilk sürtünmeli sönmüleyici, çelik plakalar arasına monte edilen, otomobillerde de kullanılan fren balatalarından meydana getirilmiştir (Soong ve Dargush, 2019). Bu sönmüleyiciler Slotted-Bolted Connections (SBC) olarak da bilinmektedir. SBC'lere bakır, grafit ve bronzdan bir sürtünme yüzeyi meydana getirerek oluşturulan sürtünmeli sönmüleyiciler oluşturulmuştur (Suk, 2019; Constantinou ve Symans, 1992; Aiken vd., 1993).

Sürtünmeli sönmüleyiciler üzerinde araştırmacılar birçok deneysel çalışmalar yapmıştır. Filiatrault vd. (1986) ile Pasquin vd. (2002) sönmüleyicilerin toplam girdi enerjisinin yüzde ellisini sönmülediği tespit edilmiştir. Bunun yanında maksimum ötelenmelerin de %1'den az olduğu, yani yapının hasar görmeden orijinal şekline döndüğünü gözlemlemiştir. Zhou ve Peng (2009), yaptıkları deneyler kapsamında sarsıntılar sonucu yapıya giren enerjinin

yaklaşık %60'ının bu sönümleyiciler tarafından sönümlendiğini ifade etmiştir. Popov vd. (1995) ise, büyük miktarda enerji girdisi, sistemin doğal sönümlenmesi veya yapısal elemanların elastik olmayan deformasyonu nedeniyle değil, SBC'ler tarafından sönümlendiğini ayrıca yer hareketini sönümleyen çevrimsel eğrilerin de kayma genliğine ulaşmadan sonlandığını gözlemlemiştir (Deringöl, 2013). Fitzgerald vd. (1989), merkezi çaprazlı çerçevelerin bir ucuna SBC yerleştirip, çerçeveleri sinüzoidal fonksiyonlu sarsıntılara maruz bırakmıştır. Test sonuçları, SBC'lerin yer hareketlerinin etkisini azaltma konusunda, uygun ve kararlı davranış sergilediğini göstermiştir.

Yapılan analizlerde, depremden sonra sürtünmeli sönümleyicilerin herhangi bir hasar olmadan orijinal konumuna döndüğü görülmüştür. Vaseghi vd. (2009) ise, yapılarda sürtünmeli sönümleyici kullanımının; taban kesme kuvveti, tepe deplasmanı ve eksenel kolon yük taşıma kapasitesi açısından depremin hasar etkisini azalttığını belirtmiştir.

Yapılan çalışmada sürtünmeli sönümleyicilerin bina deprem davranışına olan etkisi araştırılmıştır. İkinci bir aşama olarak da Sap2000 programında nümerik model oluşturularak model doğrulama yapılmıştır. Tasarlanan çelik tek katlı model bina sönümleyicili ve sönümleyicisiz durumlar için sarsma tablasında iki farklı deprem etkisine maruz bırakılmıştır. Nümerik modellemesi de yapılan binanın, hem deneysel hem de nümerik sonuçları karşılaştırılarak sürtünmeli sönümleyicinin binanın frekans ve tepe noktası yer değiştirmesinde meydana getirdiği fark bulunmuştur.

## DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ

Titreşim, yapının belirlenen başlangıç şartlarına veya yapının maruz kaldığı etkilere bağlı ortaya çıkan bir yapı davranış biçimidir. Yapının dinamik davranış parametrelerinin tespitinde yapının titreşim şeklinin yorumlanması önem arz etmektedir. Yapıların dinamik davranış parametrelerini belirlemek amacıyla teorik ve deneysel olarak iki şekilde modal analiz yazılmaktadır.

Teorik modal analizde, yapının rijitlik, kütle, ve sönüm özellikleri kullanılarak yapı tanımlanır ve bu tanıma bağlı olarak yapının analitik modeli oluşturulur. Analitik model ile yapılan modal analiz sonuçları yapının periyotları, frekansları, mod şekilleri ve sönümleri elde edilir. Modal analiz yapılırken yapıya herhangi bir dış yük uygulanmadığı için elde edilen değerler doğal değerler olarak kabul edilir. Son adımda da oluşturulan model üzerinden yapının verilen yüklemeler ve sınır şartları altında vereceği tepkiler kontrol edilir. Frekans ve itme davranışı şeklinde isimlendirilen bu tepkiler ile yapının davranış modeli oluşturulur.

Deneysel modal analizde ise yapıya değeri bilinen bir kuvvetin etki ettirilmesi sonucunda oluşan hız, ivme ve yer değiştirme değerleri analiz edilir. Etki ve oluşan tepki kuvvetleri analiz edildikten sonra tepki değerleri etki değerlerine bölünerek yapıya ait dinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılacak frekans davranış fonksiyonu elde edilir (Türker, 2005).

### *Frekans Davranış Fonksiyonları*

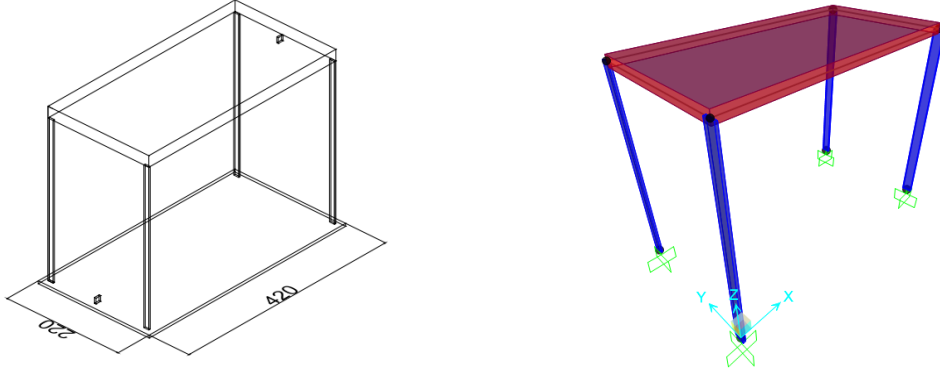
Frekans davranış fonksiyonunun elde edilmesi için analiz edilecek her frekans değerinde sinüzoidal kuvvetler seçilir. Etki ettirilen kuvvetlere bağlı olarak yapıda oluşan tepki fonksiyonları ivme, hız ve yer değiştirme şeklinde elde edilir. Tepki verileri analiz edildikten sonra etki/tepki sonucunda elde edilen frekans fonksiyonları kullanılarak etki koşulları belirli yük altında, yapıda oluşan davranış ve genlik belirlenebilir. Frekans davranış fonksiyonları kompleks sayısal ifadelerdir. Bu kompleks ifadeler genellikle frekans, faz, kullanılan tepki parametrelerine bağlı olarak receptance, mobility veya inertance gibi kısımlarından oluşabilir. Bahsedilen bu üç verinin standart iki eksenli x-y grafiğinde gösterilmesi mümkün değildir. Frekans davranış fonksiyonlarının gösteriminin üç farklı yolu vardır. Bu çalışmada modül ve faz diyagramlarının frekansa göre çizildiği Bode diyagramları kullanılmıştır (Ewins, 1984).

## NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Sürtünme etkili sönümleyicilerin binanın deprem davranışına olan etkisinin araştırılması amacıyla tek katlı çelik model bir bina tasarlanmıştır. Bina Sap2000 programında modellenmiş ve sarsma tablası deneylerinde kullanılmak üzere imalatı yapılmıştır. Binaya uygun şekilde tasarlanan sürtünme etkili sönümleyicinin bina davranışına olan etkisi hem Sap2000'de modal ve Zaman Tanım Alanında analiz sonuçları ile hem de deneysel modal analiz sonuçları ile belirlenmiştir.

### Tek Katlı Çelik Model Bina

Çelik model bina x yönünde 400 mm, y yönünde 200 mm genişliğe ve 300mm kat yüksekliğine sahiptir. Taşıyıcı elemanları S235 çeliğinden üretilmiştir. Tasarlanan model binanın çizimi ve Sap2000 modellemesi Şekil 1'de sunulmuştur.



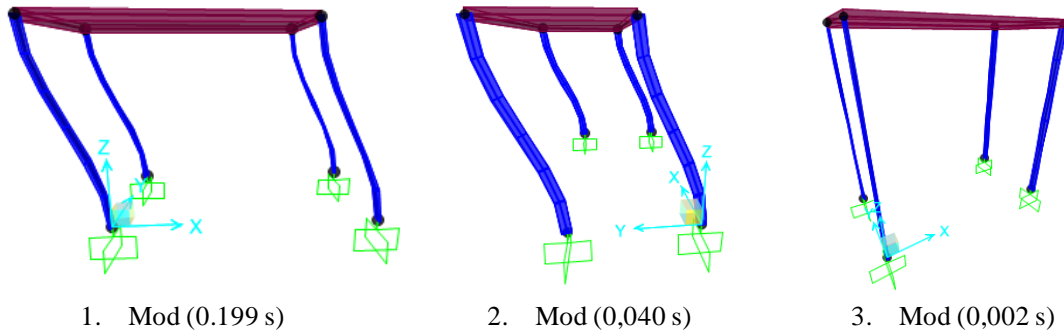
Şekil 1. Tek Katlı Çelik Model Bina

Model binaya ait malzeme detayları ve elemanların kesit bilgileri Tablo 1'de özetlenmiştir. İmal edilen bina modeli toplamda 14 kg ağırlığındadır.

Tablo 1. Tek Katlı Model Binaya ait Malzeme ve Kesit Bilgileri

Deneysel Model Elemanları	Malzeme cinsi	Kesit Ölçüleri (mm)	Uzunluk veya Kalınlık (mm)	Ağırlık (kg)
Kolon	S235	15*3	300	0,424
Döşeme	S235	200*400	6	11,300
Taban plakası	S235	220*420	3	2,175
<b>Toplam Ağırlık</b>				<b>13,899</b>

Binanın Sap2000 bilgisayar paket programında nümerik modellemesi yapılmış ve modal analiz sonucunda binanın dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Model Bina Sap2000 Modal Analiz Sonuçları

### Sürtünmeli Sönümleyicinin Tasarım ve İmalatı

Sürtünmeli sönümleyicinin tasarım aşamasında gerekli optimum kayma kuvveti değerinin bulunması gerekmektedir. Optimum kayma kuvvetini bulmak için 5N, 15N, 25N, 65N, 75N, 80N gibi farklı değerler denenmiştir. Optimum kayma kuvvetine, nümerik modellerin tepe noktalarında meydana gelen yer değiştirmelerin karşılaştırılmasıyla karar verilmektedir. Yapılan denemeler sonucunda sürtünmeli sönümleyicideki kayma kuvveti 65 N olduğunda nümerik modelin tepe noktasındaki yer değiştirme minimum olarak elde edilmiştir.

Sürtünmeli sönümleyicilerde gereken optimum kayma kuvvetini elde etmek için bulonlara uygulanması gereken öçekme kuvveti değeri, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan 'Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar' yönetmeliğinde Bölüm 13.3.11 de 'Sürtünme Etkili Birleşimlerde Yüksek Dayanımlı

Bulonlar' kısmında verilen denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır (Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapımına dair esaslar, 2018).

$$R_n = \mu * D_u * h_f * T_b * n_s \quad (1)$$

Burada,  $R_n$ , bir bulon için sürtünme etkili tasarım kayma kuvveti,  $D_u$ , bulon montajında uygulanan ortalama öneçme kuvvetinin minimum karakteristik öneçme kuvvetine oranı, 1.0 değerine eşit alınacaktır,  $n_s$ , sürtünme etkili kayma düzlemi sayısı,  $T_b$ , minimum bulon öneçme kuvveti,  $\mu$ , A,B,C,D sınıfı yüzeyler için verilen ya da deneysel olarak belirlenen ortalama sürtünme katsayısı,  $h_f$ , besleme levhası katsayısıdır.

Deneysel modelde kullanılacak sürtünmeli sönümleyicide istenilen optimum kayma kuvvetini elde etmek için uygulanması gereken öngerilme kuvvetinin hesaplarında  $D_u$  ve  $h_f$  değerleri 1 olarak alınmıştır. Sürtünme yüzeylerinde herhangi bir işlem uygulanmadığı için, sürtünme katsayısı,  $\mu$ , 0,2 olarak seçilmiştir. Yukarıda verilen denklem tek bulon için geçerlidir sönüm düzeneğinde 2 adet bulon kullanılacağından bu değer 2 ile çarpılmalıdır.

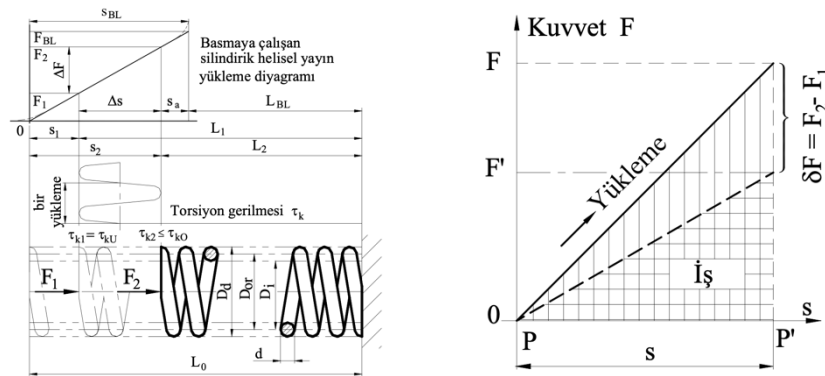
$$65N = F_d = R_n = \mu * D_u * h_f * T_b * n_s * 2 \quad (2)$$

Denklem 2'den bulona uygulanması gereken bulon öneçme kuvveti 82 N olarak hesaplanmıştır. Öneçme değeri sürtünmeli sönümleyici bulonlarına helisel bası yayı vasıtasıyla uygulanacaktır (Şekil 3).



Şekil 3. Helisel Bası Yayları (Hocaoğlu, 2015)

Helisel bası yayları, bir  $F$  kuvvetiyle zorlandıkları zaman rijitlikleriyle ters orantılı öteleme gerçekleştirirler. Yaya uygulanan öteleme miktarı, ilgili kattaki sönümleyicide uygulanacak öneçme kuvvetiyle doğru orantılı olmalıdır (Şekil 4).



Şekil 4. Bası Yayı Rijitlik Hesabı Grafiği (Kutay, 2010)

Bası yayının rijitliği Denklem 3'teki gibi hesaplanmaktadır. Denklem 3'te  $k_{baskı}$ , yay sabitini,  $d$ , yay telinin çapını,  $D$ , yay halka (ortalama) çapını,  $D_i$ , yay halka iç çapını,  $G$ , torsiyonel elastiklik modülünü,  $N$ , yay sarım sayısını,  $N_e$ , etkin yay sarım sayısını,  $D_d$ , yay halka dış çapını ifade etmektedir.

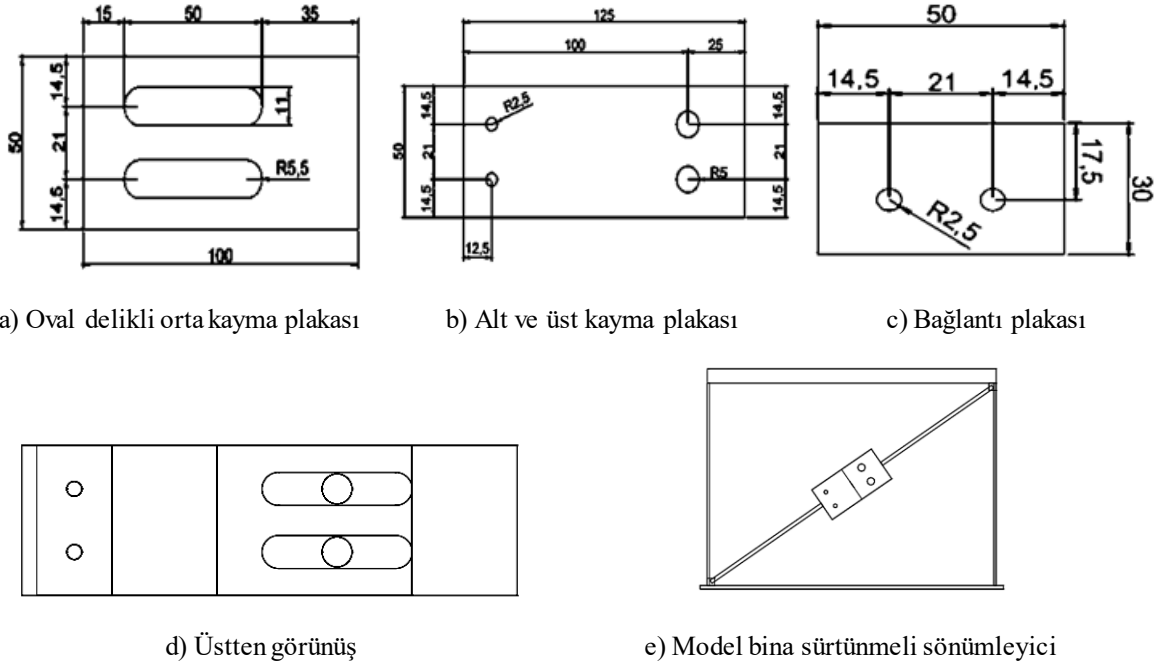
$$k_{baskı} = \frac{d^4 * G}{8 * N_e * D^3} \quad (3)$$

Tek katlı deneysel modelde kullanılacak sürtünmeli sönümleyicide kullanılacak yayım rijitlik hesabında kullanılan değerler ve yaya ait rijitlik Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yayım Rijitlik Hesabında Kullanılan Değerler

Terim	Değer
d	1,4 mm
$(D_i + D_d)/2 = D$	11,2
$D_i$	10,5
G	80,000 N/mm <sup>2</sup>
N	10
$N_e (N-2)$	8
$D_d$	11,9
$k_{baskı}$	3,417 N/mm

Sürtünmeli sönümleyici imalatında S235 çeliği kullanılmıştır. Sönümleyicilerde kullanılacak bulon çapları, sürtünmeli sönümleyicilerde kayma gerçekleştiği anda bulonda meydana gelen kesme sebebiyle sönümleyicide dayanım kaybı olmayacak şekilde seçilmiştir. Sürtünmeli sönümleyici tasarımında slot (yarık) uzunlukları, ilgili katta oluşabilecek deplasman değerlerinden fazla olacak şekilde (yaklaşık 2 katı) tasarlanmıştır. Sürtünmeli sönümleyicilerin imalatında kullanılan parçalara ait detaylar Şekil 5’te verilmiştir.

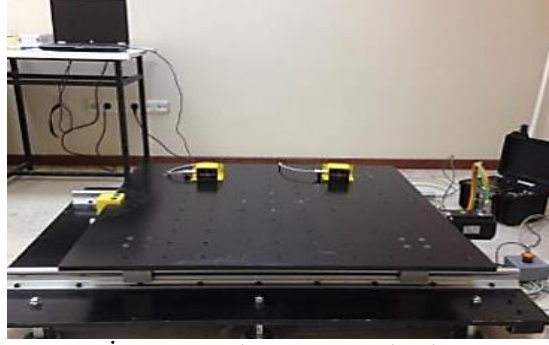


**Şekil 5.** Sürtünmeli Sönümleyicinin Parçaları ve Detayları

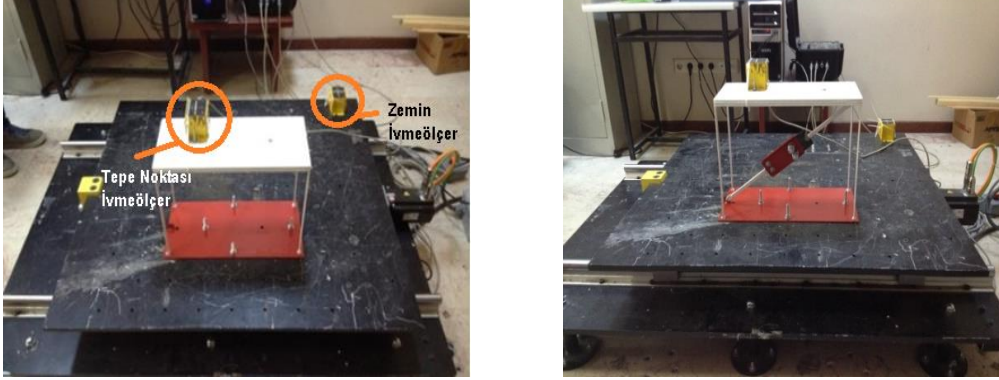
### Sarsma Tablası Deneyleri

Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen sönümleyicili ve sönümleyicisiz model binaya sarsma tablası kullanılarak deprem ivme kayıtları etki ettirilmiştir. 1x1m çelik rijit bir plaka ve bu plakaya tek eksende hareket veren 3 adet hidrolik pistondan oluşan sarsma tablası, maksimum 2.5 kN’luk yatay kuvvet uygulayabilmekte tek eksende  $\pm 100$  mm hareket edebilmektedir. Hidrolik pistonlara hareket, bir servo motor sürücü ile sağlanmaktadır. Bilgisayara bağlı kontrol ünitesi sayesinde 1-10 Hz aralığında kayıtlar, sarsma tablasına monte edilmiş bir sisteme uygulanmaktadır. Bina titreşimlerini ölçmek için ivmeölçerler (Sensebox 7021/7022/7023+ ve 7031/7032/7033) kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler, ultra düşük gürültülü, kuvvet/elektro-dinamik geri beslemeli sensörlerdir (Şekil 6).

Deneysel kısımda model binanın sönümleyicili ve sönümleyicisiz sürtünmeli sönümleyicinin bina deprem davranışına etkisini araştırmak ayrıca Sap2000 modellerinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla sarsma tablası kullanılarak deprem kayıtları etki ettirilmiştir (Şekil 7). Model doğrulamadaki asıl amaç sönümleyicinin Sap2000’de doğru bir şekilde modellenip modellenmediğini kontrol etmektir.

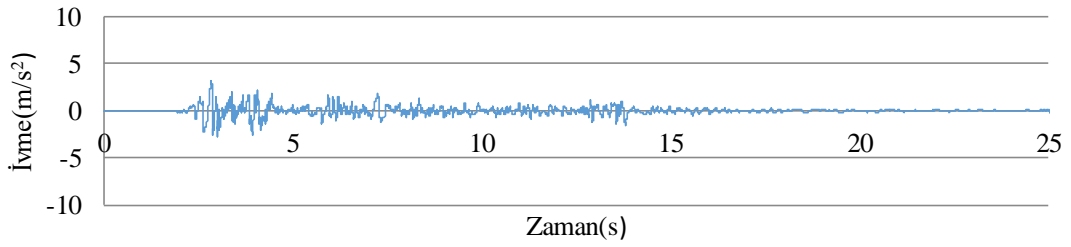


Şekil 6. Deprem İvme Kayıtlarının Uygulandığı Sarsma Tablası

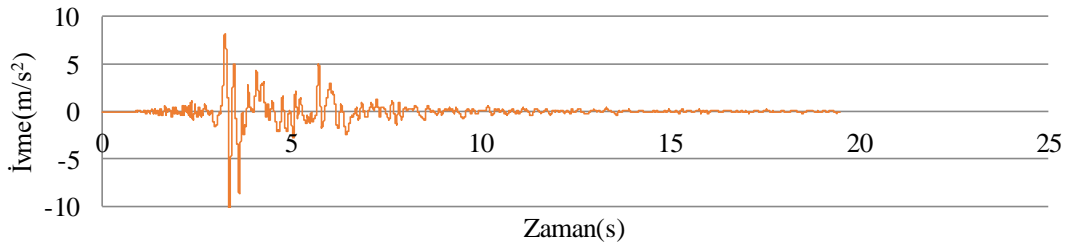


Şekil 5. Sönümleyicisiz ve Sönümleyicili Model Binanın Sarsma Tablası Deneyi

Sarsma tablasında binaya etki ettirilen deprem kayıtlarından biri maksimum ivmesi 0,3g olan Kuvvetli Yer Hareketi 1 (KYH-1) ve diğeri maksimum ivmesi 1g olan Kuvvetli Yer Hareketi 2 (KYH-2) depremidir (Şekil 8).



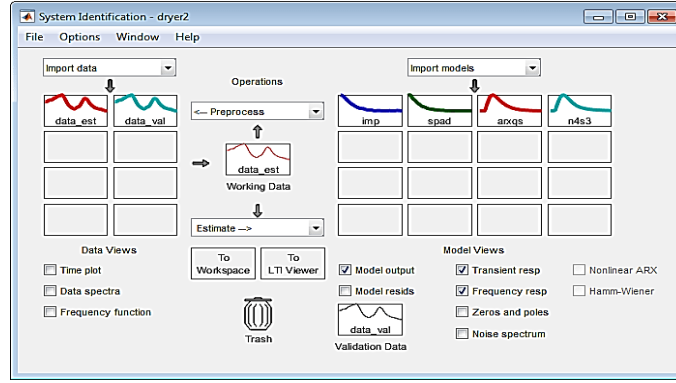
a) KYH-1 İvme-Zaman Grafiği



b) KYH-2 İvme-Zaman Grafiği

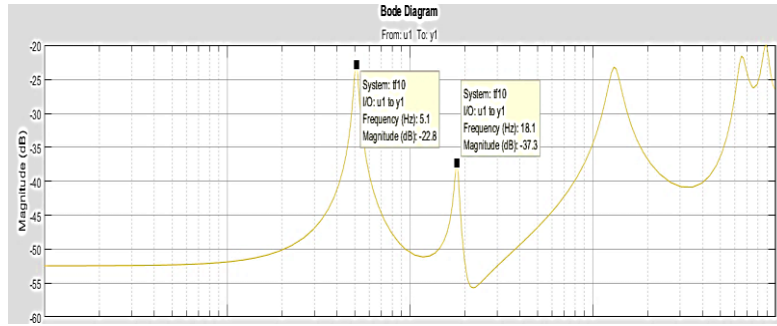
Şekil 6. Sarsma Tablası Deneylerinde Kullanılan İvme Kayıtları

Frekans verilerinin elde edilmesi kısmında kullanılan deneysel modal analiz yönteminde etki fonksiyonu olarak, model binadan beklenen frekans değerine yakın, farklı frekanslarda sinüzoidal kuvvetler kullanılmıştır. Bu kuvvetler sonucunda oluşan tepki parametreleri kullanılarak deneysel modellerin özelliklerini temsil eden transfer fonksiyonları elde edilmiş, daha sonra binanın dinamik davranış özelliklerini veren FRF grafiği elde edilmiştir. FRF grafiğini elde etmek için Şekil 9'da arayüzü verilen MATLAB System Identification Toolbox programı kullanılmıştır.

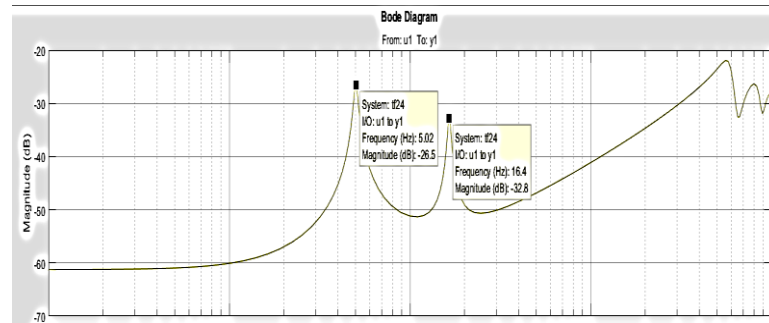


Şekil 7. MATLAB System Identification Toolbox Programı Arayüzü

Sürtülmeli sönümleyicinin bina deprem davranışına etkisi, binanın frekans değişimi ve tepe noktasındaki deplasman değişimi incelenerek yapılacaktır. Bu amaçla ilk olarak sönümleyicisiz modelin Sap2000 ve deneysel modal analiz sonucunda elde edilen frekans ve yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılacak ve Sap2000 modelinin doğruluğu kontrol edilecektir. KYH-1 ve KYH-2 deprem ivme kayıtları kullanılarak bina tepesinden elde edilen ivme kayıtları MATLAB programında işlenerek binanın frekans içeriği elde edilmiştir (Şekil 10).



a) KYH-1 deprem ivme kaydı sonucu



b) KYH-2 deprem ivme kaydı sonucu

Şekil 8. Sönümleyicisiz Binanın Deneysel Modal Analiz Sonucu Elde Edilen FRF Grafikleri

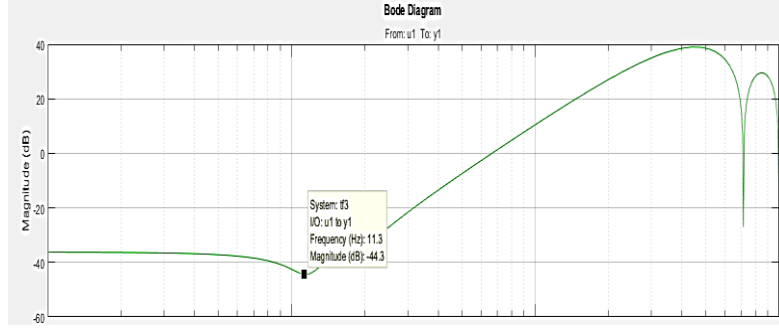
Binanın 1. hakim periyodu deneysel olarak Şekil 9’da verilen bode diyagramından her iki deprem ivme kaydı için 5,1 Hz olarak belirlenmiştir. Yerdeğiştirme değeri ise binanın üstüne yerleştirilen ivmeölçerlerden elde edilen ivme kayıtları kullanılarak bulunmuştur. Sap2000 programında tasarlanan bina nümerik modelinden modal ve Zaman Tanım Alanında analiz sonucunda frekans ve bina tepe noktasında oluşan yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Zaman Tanım Alanında analizde KYH-1 ve KYH-1 deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar Tablo 3’te karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında sürtülmeli sönümleyicili sistem incelenmiştir. Sarsma tablasında KYH-1 ve KYH-2 deprem ivme kayıtları etki ettirilerek binanın frekans ve tepe yerdeğiştirmesi parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir (Şekil 11).

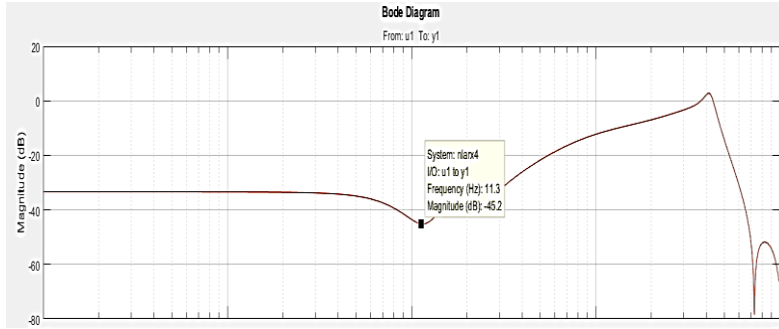


**Tablo 3.** Sönümleyicisiz Model Binanın Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deprem	Frekans (Hz)		Yerdeğiştirme (mm)		Hata Oranı (%)	
	Deneysel Model	Nümerik Model	Deneysel Model	Nümerik Model	Frekans	Yerdeğiştirme
KYH-1	5,10	5,12	10,85	9,90	0,46	8,90
KYH-2			33,00	34,20		3,60



a) KYH-1 deprem ivme kaydı sonucu



b) KYH-2 deprem ivme kaydı sonucu

**Şekil 9.** Sönümleyicili Bina Deneysel Modal Analiz Sonucu Elde Edilen FRF Grafikleri

Aynı parametreler sönümleyici parametreleri girilerek oluşturulan nümerik model için Sap2000’de gerçekleştirilen modal ve Zaman Tanım Alanında analiz sonucunda elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Tablo 4). Sürtümlü sönümleyicilerin SAP2000’de tanımlanmaları ‘Link/Support Property Data’ kısmından yapılmıştır. Link/Support type olarak Plastic (Wen) seçilmiştir.

**Tablo 4.** Sönümleyicili Model Binanın Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deprem	Frekans (Hz)		Yerdeğiştirme (mm)		Hata Oranı (%)	
	Deneysel Model	Nümerik Model	Deneysel Model	Nümerik Model	Frekans	Yerdeğiştirme
KYH-1	11,30	10,48	1,99	1,80	7,30	8,9
KYH-2			9,90	8,82		11

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Sürtümlü sönümleyicinin model binanın deprem davranışına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada deneysel ve nümerik model sonuçları incelendiğinde, sönümleyicisiz binada frekans değerleri açısından % 0,5 fark oluşmuştur. Bina tepede yerdeğiştirmesi değerlerinde ise KYH-1 deprem etkisi altında %8,9 KYH-2 deprem etkisi altında ise %3,6 fark meydana gelmiştir. Sönümleyicili binada ise frekans değerleri açısından %7, yerdeğiştirmede ise KYH-1 deprem etkisinde %8,9 KYH-2’de ise %11’lik fark meydana gelmiştir. Bina kütlesi ve rijitliğini ifade eden frekans uyumu iki model arasında yüksek oranda sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Sap2000 nümerik modelinin gerçek modeli temsil ettiğini göstermektedir.

Sönümleyicili ve sönümleyicisiz sistem karşılaştırmasında ise deneysel model sonuçları dikkate alındığında frekans açısından %121,5 fark oluşmuştur. Sönümleyicili bina sönümleyicisize oranla iki kat daha rijit hale gelmiştir. Yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde ise KYH-1 depreminde %81,7 KYH-2 depreminde ise %70'lik bir azalma olmuştur. Deprem maksimum ivmesine bağlı olmakla birlikte yerdeğiştirmede yüksek oranda azalma meydana gelmiştir.

Sürtünmeli sönümleyicilerin kullanıldığı model binada rijitliği arttırdığını ve deprem etkisiyle binanın tepe noktasında oluşan yerdeğiştirmeyi önemli ölçüde azalttığını söylemek mümkündür. Yapılan çalışmada tek açıklıklı tek katlı bina modeli kullanılmıştır. Binanın kat adedinin ve açıklığının artırılması, sönümleyicilerin farklı kat ve açıklıklara konumlandırılması sönümleyiciler hakkında farklı bilgilerin elde edilmesini sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Aiken, I.D., Nims, D., Whittaker, A., Kelly, J.M. (1993). Testing Of Passive Energy Dissipation Systems, *Earthquake Spectra*, 9 (3), 335-370.
- Akpınar, E., Özenir, A., Akanji, S. T. (2021). Tipik Betonarme Bir Hastane Yapısının Güçlendirilmesinde Betonarme Perde Ve Sürtünmeli Sönümleyici Güçlendirme Alternatiflerinin Karşılaştırılması, *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı 32*, 928-939.
- Ayazoğlu, R. (2015). Sürtünmeye Dayalı Sönümleyiciler İle Bağlı Betonarme Perde Duvarlı Yüksek Binaların Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, E., Boru, E. (2020). Betonarme Bir Çerçevenin Farklı Yerleşim Düzenlerine Sahip Merkezi Çelik Çaprazlarla Güçlendirilmesi, *Academic Platform Journal Of Engineering And Science*, 8 (2), 286-294.
- Boru, E., Aydın, E. (2022). The Effect Of Different Steel Brace Types On Reinforced Concrete Frame System Retrofit, *Türk Doğa Ve Fen Dergisi*, 11 (2), 118-124.
- Constantinou, M. C., Symans, M. D. (1992). Experimental And Analytical Investigation Of Seismic Response Of Structures With Supplemental Fluid Viscous Dampers, National Center For Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-92-0032.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2018). Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapımına Dair Esaslar, Ankara.
- Deringöl, A. H. (2013). Effect Of Friction Dampers On Seismic Performance Of Buildings, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Ercan, E., Nuhoğlu, A. (2005). Taban İzolatörlü Ve Pasif Enerji Sönümleyicili Yapıların Dinamik Davranışı", Deprem Sempozyumu, Kocaeli, ss. 512-520, 23-25.
- Ersin, S. (2017). Tipik Betonarme Yapıların Perde veya Sürtünme Sönümleyici Eklenecek Güçlendirilmesinin Yapı Performansına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ewins, D. J. (1984). Modal Testing; Theory and Practice, John Wiley & Sons Inc., Newyork, ABD.
- Filiatrault, A., Cherry, S. (1986). Seismic Tests Of Friction-Damped Steel Frames, Third Conference On Dynamic Response Of Structures, ASCE, Los Angeles, USA.
- 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.
- Hocaoglu, H. (2015). Kalıp Yayları İçin Yorulma Deney Cihazı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kutay, M.G. (2010). Elastik Yaylar, Ders Notları.
- Naimi, S., Waheb, M.H. (2019). Deprem Etkisindeki Yapıların Sismik Taban İzolasyonu Ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri İle Karma Korunması, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (1), 499-516.
- Pall, A. S. (1979). Limited Slip Bolted Joints : A Device To Control The Seismic Response Of Large Panel Structures, Doktora Tezi, Concordia University, Kanada.

- Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, T. (2002). Friction Dampers For Seismic Rehabilitation Of Eaton Building, Montreal, Proceedings, *Annu. Conf. - Can. Soc. Civ. Eng.*, 2002, 1771–1780.
- Popov, E., Grigorian, C. And Yang, T. (1995). Developments In Seismic Structural Analysis And Design, *Engineering Structures*, 17 (3), 187- 197.
- Soong, T. T., Dargush, F. (1997). Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering, *Journal of Structural Control*, 6 (1)1, 172.
- Suk, R. (2019). Mafsal Özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyici, Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Türker, T. (2005). Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Vaseghi, J., Navaei, S., Navayinia, B., Roshantabari F. (2009). A Parametric Assessment Of Friction Damper In Eccentric Braced Frame, World Academy of Science, *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 3 (10), 361-365.
- Wang, Y., Zhou, Z., Zhang, L., Xie, Q. (2021). Quantification Of Higher Mode Effects Of Steel Frame And Control Method Using Dual Self-Centering Variable Friction Damper Brace, *Engineering Structures*, 240, 112368.
- Zhang, M., Wang, D. (2019). Seismic Response Analysis Of Frame With Friction Damper, *Engineering Computations*, 36 (7), 2220–2239.
- Zhou, X. And Peng, L. (2009). A New Type Of Damper With Friction, *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*, 8 (4), 507-520.