

U Biçimli İki Farklı Tip Metalik Sönümleyicinin Aksel Kuvvet Altında Yapısal Davranışı ve İki Yeni Metalik Sönümleyici Tasarımı

Enes Yurteri¹, Oğuz Düğenci^{*2}

¹ Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

^{*2} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 25.08.2022, Kabul / Accepted: 29.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Metalik sönümleyiciler,
Histeretik davranış,
Sonlu elemanlar yöntemi,
Sismik kontrol sistemleri,
Eksenel yükleme

Öz: Deprem etkilerine karşı sismik sönümleyici kullanımı, yapıları bu tip etkilerden korumada yenilikçi ve etkili bir yöntemdir. Yapı güvenliğini sağlayan ve yapım maliyetini düşüren bu sönümleyiciler gerek kullanım yeri gerekse üretildikleri malzeme bakımından çok çeşitlidir. Bunlardan biri olan metalik sönümleyici sistemler, kararlı histeretik davranışa sahip olmaları, sıcaklıktan ve yükleme hızından bağımsız pozitif davranış göstermeleri ve diğer sönümleme sistemlerine göre çok düşük maliyetli olmaları nedeniyle tercih edilen sönümleme sistemleridir. Bu çalışma, iki farklı U şeklinde metalik sönümleyici sistemini (H tipi- yatay kalınlıklı ve V tipi- düşey kalınlıklı) geliştirmeyi ve aksel doğrultuda yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Öncelikle tek parçalı biçimde metalik sönümleyicilerde modellemeler yapılmıştır. Sönümleyici parçalarının kalınlık, kol uzunluğu, kol genişliği ve toplam derinlik parametreleri değişken tutularak 228 farklı geometride sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modelleme sonucu elde edilen histeretik özellikleri kıyaslanmış ve optimum boyutlar belirlenmiştir. Her iki tip sönümleyici tipinden ideal ölçülerle iki farklı U biçimli dört parçalı bütünleşik metalik sönümleyiciler dizayn edilmiş ve yapısal performansları ortaya konulmuştur. Yeni tip sönümleyicilerin literatürdeki diğer sönümleyiciler ile yapısal parametrelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Structural Behaviour of Two Different Types of U-Shaped Metallic Dampers Under Axial Force and Two New Metallic Damper Designs

Keywords

Metallic dampers,
Hysteretic behaviour,
Finite element method,
Seismic control systems,
Axial loading

Abstract: Using seismic dampers against earthquake effects is an innovative and effective method to protect structures from such effects. These dampers, which provide building safety and reduce construction costs, are very diverse in terms of the place of use and the material produced. Metal damping, one of these systems, is the preferred damping system because they have stable hysteretic behavior, show positive behavior independent of temperature and loading speed, and are meagre cost compared to other damping systems. This study aims to develop two different U-shaped metallic damper systems (H type - horizontal thickness and V type - vertical thickness) and to determine their load carrying capacities in the axial direction. First, one-piece metallic dampers were modelled. Finite element models with 228 different geometries were created by keeping the thickness, bracket length, bracket width and total depth parameters of the damper parts variable. The hysteretic properties obtained as a result of the modelling were compared and the optimum dimensions were determined. Two different U-shaped 4-piece integral metallic dampers were designed with ideal dimensions from both types of dampers and their structural performances were demonstrated. Structural parameters of new type dampers were compared with other dampers in the literature.

*İlgili Yazar, email: dugenci@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Taşıyıcı sistem tasarımında geleneksel yaklaşım, yüklere dayanabilecek kadar dayanıklı ve sünek bir davranış sergileyerek deforme olacak veya enerji sönümleyecek şekilde tasarım yapmaktır. “Bu tür bir tasarımla dizayn edilmiş yapılar -1- dinamik enerjiyi sönümlemek için düşük malzeme sönümü -2- sınırlı deplasman kapasitesi ve -3-yük taşıma kapasite için gerekli yüksek rijitlik talebi gibi üç ana unsurdan dolayı sınırlı kapasiteye sahiptirler.” Yapısal malzemelerin sönüm oranları (ξ) betonda %5, çelikte %2’den az ahşapta %12 ve tuğlada %5-7 aralığındadır [1]. Bu özelliklerinden ve sınırlı kapasitelerinden dolayı deprem ve kuvvetli rüzgarlara bağlı yatay kuvvetler etkisinde ekonomik tasarımlar zor olmaktadır. Bu bakımdan sismik sönümleyici kullanımı yapıları bu tip etkilerden korumada yenilikçi ve etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sismik sönümleyici sistemler yapı üzerinde depremin veya rüzgârların neden olduğu titreşimi sönümleyerek ya da izole ederek göçmeye varan yapısal davranışı ve olası hasarları azaltmaktadır. Sismik kontrol sistemlerinin temel çalışma prensibi basit bir tek serbestlik dereceli sistem üzerinde anlatılmak istendiğinde öncelikle deprem etkisine maruz kalan tek serbestlik dereceli bir sistem için hareket denge denklemi Denklem (1)’de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Burada “m” yapının kütlesi, “c” yapı sönüm katsayısı ve “k” yapının lineer elastik rijitliğidir. Tek serbestlik dereceli sistemde, deprem yer hareketi ivmesi $\ddot{x}_g(t)$ ’ye maruz kaldığında, zeminde görelilik olarak $x(t)$ yatay yer değiştirme oluşur. “ ξ ” sönüm oranı ve “ ω_n ” ise radyan/sn cinsinden sistemin doğal frekansı Denklem (2) ve Denklem(3)’te gösterildiği şekilde alınarak Denklem (1) yeniden düzenlenmesiyle tek serbestlik dereceli bir sistemde zeminden yapıya iletilen ivmenin bir ifadesi olarak iletkenlik (transmissibility) fonksiyonu Denklem (4) ile ifade edilebilir.

$$\xi = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

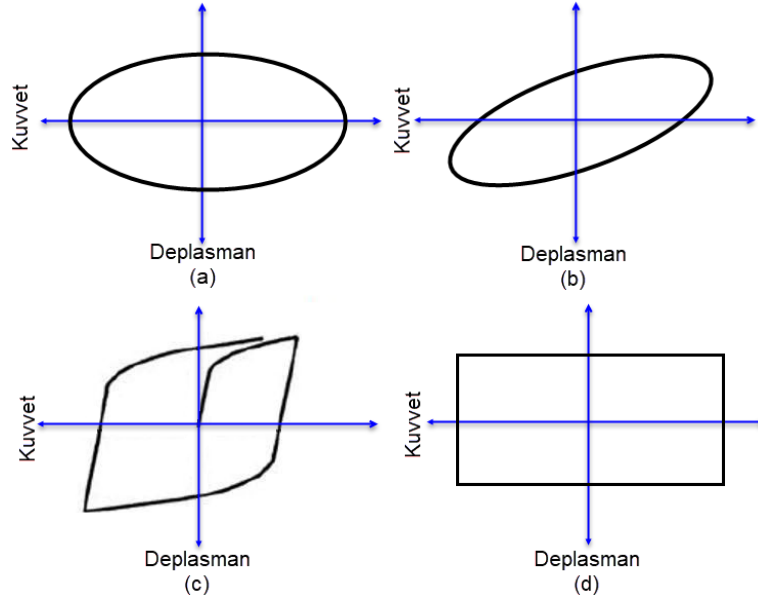
$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

Bu formüle göre sismik etkilerin yapılar üzerindeki etkilerinin azaltılmasının matematiksel olarak üç yolu bulunmaktadır. Bunlardan ilki deprem yer hareketinden kaynaklı ivmeyi azaltmak, ikincisi sönüm oranı “ ξ ” ’yı artırmak ve üçüncüsü doğal frekans “ ω_n ” ile “ θ ” farkını artırarak rezonanstan kaçınmaktır. Bu matematiksel yaklaşımlar, çeşitli sismik yalıtımlı yapılar açısından değerlendirildiğinde (1)- taban izolasyon sistemleri yapı ve deprem yer hareketi arasındaki enerji geçişine engel olmasına (2)-viskoz davranış ve plastik davranışla malzemelerin enerji sönümleme özelliklerinden faydalanılmasına ve (3)-yapının doğal titreşim periyodunu, deprem yer hareketinin hâkim frekansından farklı tutulmasına neden olan sismik sistemlerin geliştirilmesi sağlanmıştır.

Sismik sistemler izolatör ve sönümleyiciler olarak iki grupta sınıflandırılabilir. Zemin titreşimlerinin yapıya iletilmesini engelleyen sistemler taban izolasyonlu sistemlerdir [2]. Bunlar doğal kauçuk malzemelerine çelik plakalarla birlikte katmanlı olarak üretildiği elastomer mesnetler [3,4], kurşun çekirdekli elastomer mesnetler [5,6] ve yatay ötelenmeyi azaltmaya yönelik küresel iç bükey kayma düzlemlili sürtünmeli sarkaç izolatörlü [7, 8] sistemlerdir.

Taban izolatörlü sistemlerden başka üst yapıya yerleştirilmiş pasif sönümleyici sistemler de kullanılmaktadır. Pasif sönümleyici sistemler yapısal girdi enerjisinin sönümlemesi, dolayısıyla yapısal davranışın ve hasarın azaltılması için mekanik sistemlerin kullanıldığı sönümleyici tipidir. Bu sistemler aktif sistemlerden farklı olarak bir dış kuvvet gereksinimi olmadan enerji sönümleyebilen sistemler olmakla birlikte bazı çeşitleri sınırlı kapasiteye sahiptirler.

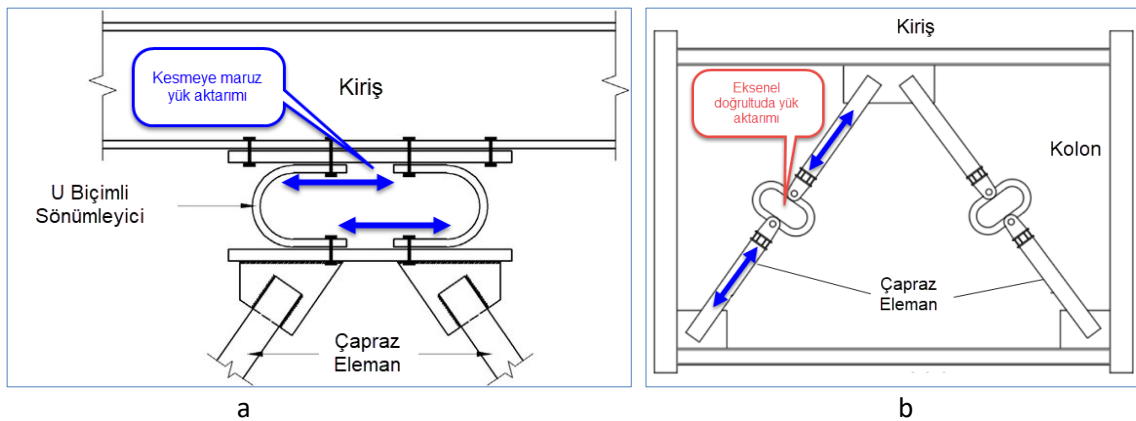
Pasif enerji sönümleme sistemleri genel yapı davranışını etkilemekten ziyade, sistemin bulunduğu yer yani yapı üzerindeki yerel bölgelerin davranışını etkilemekte daha etkili sistemlerdir [9,10]. Kendi içerisinde ayarlı kütle sönümleyiciler (TMD, tuned mass dampers) [9,11,12], ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD, tuned liquid dampers) [13,14], sürtünme yüzeyli sönümleyiciler [9,15,16], metalik sönümleyiciler [13,14,15], viskoelastik sönümleyiciler [9,20] ve viskoz sıvı içeren sönümleyiciler [9,21] olarak ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu sistemlerine ait histerik eğriler Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Pasif enerji sistemlerine ait histeretik eğriler
a) Viskoz sıvı içeren b) Viskoelastik c) Metalik d) Sürtünme yüzeyli [10]

Yukarıda kısaca tariflenen sönümleyici tiplerinden pasif sönümleyici kategorisindeki metalik sönümleyiciler bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Metalik sönümleyiciler üzerine yapılan literatür çalışmalarının çoğunlukla sönümleme elemanlarının geometrilerinin ve bu geometrilerdeki değişken uzunlukların histeretik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek üzerine olduğu literatür incelemesi sonunda anlaşılmaktadır. Çalışmalarda metallerin, çevrimsel yüklemeler altındaki davranışını modellemek amaçlı farklı malzeme modelleri ve bunların gerçek davranışa yakınlığı irdelenmiştir.

Numerik çalışmalarla, histeretik özelliklerden yola çıkarak yapılan boyut idealleştirme kabulleri üzerine yapılan çalışmalar ve numerik modellemelerdeki yapılan kabullerin gerçek davranışla olan ilişkisi bir diğer çalışma konusudur. Çalışmalarda kullanılan geometriler farklılık göstermektedir. Sönümleyiciler Yang ve ark. [22] çalışmasında olduğu gibi petek biçimli boşluk geometrisinde, Varzaneh ve Hosseini [23] çalışmasındaki gibi oval geometride ve Guo ve ark. [24]'da olduğu gibi birbiri içine geçen plakalar veya ızgara şeklinde [25] şeklinde modellemeler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra U biçimli metalik sönümleyicilerle de ilgili [26, 27, 28,29], iç içe geçen silindir formunda [30] ve elips biçiminde [31, 32] birçok çalışma bulunmaktadır. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda Şekil 2.'de gösterildiği gibi biçim geometrisi fark etmeksizin sönümleyicinin "kesmeye" maruz kalmasına bağlı enerji sönümlemesi ve yapısal parametre değişimleri incelenmiştir [33]. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en büyük unsur, Şekil 2-b'de gösterildiği gibi U şekilli sönümleyicinin "eksenel yük etkisinde" sönümleme yapmasını sağlayarak kapasitesinin artırıldığı araştırılmasıdır [34].



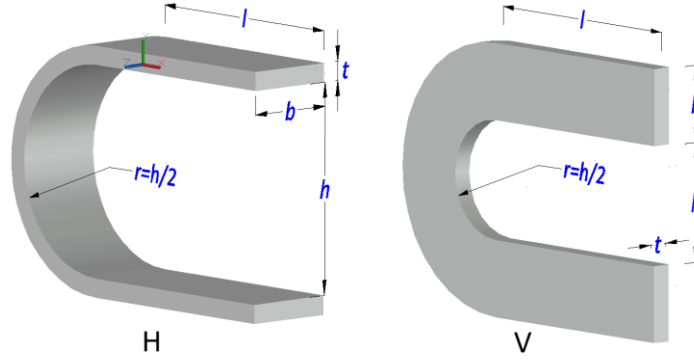
Şekil 2. a) Kesmeye çalışan U Biçimli Metalik sönümleyici bağlantısı [33], b) çalışma kapsamında düşünülen bağlantı [34]

Araştırma için belirlenen parametrelere göre sonlu elemanlar modeli ABAQUS [22,43] programda oluşturulmuştur. Farklı parametreler (kalınlık, genişlik, kol uzunluğu ve yükseklik) kullanılarak oluşturulan kombinasyonlardaki metalik sönümleyicilerin tekil performansları ortaya konularak optimum kesit özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra ise belirlenen optimum enkesit kullanılarak ekonomik bir bütünleşik (çok parçadan oluşan) sistem oluşturulmuş ve performansı değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Başlangıç Model Geometrisi

Çalışma kapsamında iki farklı derinliğe sahip U biçimde türetilen sönümleyici modelleri analiz edilmiştir. Bunlara ait ölçü sembolleri ve üç boyutlu görünüşleri Şekil 3’de verilmiştir. Çelik sönümleyicinin kalınlığının aksel yükü karşıladığı yatay şekilli olanı “H tipi” ve çelik sönümleyicinin genişliğinin aksel yükü karşıladığı dikey şekilli “V tipi” olarak adlandırılmaktadır. Her iki tip sönümleyicide de kalınlık, kol genişliği, kol uzunluğu ve sönümleyici yüksekliği değişken tutulmuştur. H tipi ve V tipi sönümleyiciler için Tablo 1’de verilen değerlerden kullanılarak oluşturulan kombinasyonlarda modellemeler yapılmıştır



Şekil 3. Kesmeye çalışan U Biçimli Metalik sönümleyici bağlantısı [33]

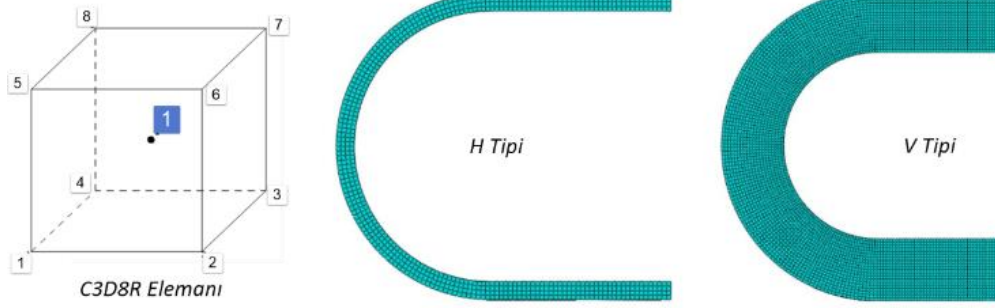
Tablo 1. Model ölçü parametreleri

Tip	Kalınlık t (mm)	Genişlik b (mm)	Kol Uzunluğu l (mm)	Yükseklik $h=2r$ (mm)
V veya H	5	30	100	100
V veya H	10	50	200	200
V veya H	15	80	300	300
V veya H	20	100		

Etiketlendirme Tarifi		
		<p>V 20 30 1 10</p> <p>x10 x100 x10 x1</p>

2.2. Modelde Eleman Türü, Sınır Koşulları ve Model ağının Oluşturulması

U şekilli parçalarının analizi için Chaboche [36] malzeme modeli ve Krolo ve ark. [37] tarafından S275 çelik sınıfı için önerilen malzeme parametreleri kullanılmıştır. Chaboche tarafından önerilen, çevrimsel yükler altında plastikleşme durumunda model sonuçlarının eldesi için ABAQUS 2018 [35, 43] programı tercih edilmiştir. Modelleri oluşturmada kullanılacak eleman için literatür taramaları sonucundan deplasman değerlerinin doğruluğu açısından C3D8R tipi eleman uygun görülmüştür. C3D8R elemanı [43] Şekil 4.’de gösterildiği gibi 8 noktalı küp biçimli, eğilme altında yeterince rijit davranabilen sürekli katı bir elemandır. Gerilme ve gerinim değerleri eleman noktalarının düzgün çıkışacağı bir yapı oluşturulması halinde modellemede en doğru sonucu ulaşılabilir [43]. Bu sebeple oluşturulan modellerdeki sönümleyici parçaları Şekil 4.’de gösterildiği gibi düzgün ağlama biçimleri oluşacak şekilde bölümlere ayrılmıştır. Ağ biçimi ölçüleri bütün parçalar için 5mm×5mm’dir.

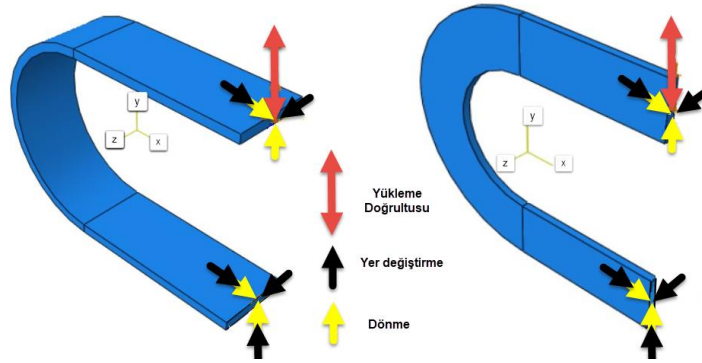


Şekil 4. C3D8R elemanın görünümü [43] ve H ve V tipi için oluşturulan ağ biçimleri

Oluşturulan H tipi ve V tipi modeller için sınır koşulları Tablo 2.'deki gibidir. Pekleşme bölgelerinin U biçimin eğri bölgesinde oluşması için yüklem ve mesnet olacak uçlar Şekil 5. ve Tablo 2.'de gösterildiği gibi Z eksenini etrafında dönmeye serbest bırakılmıştır. Pekleşme davranışına bir katkısı olmadığı için mesnet kısımları modellemelere dahil edilmemiştir.

Tablo 2. Sönümleyicileri için sınır koşulları

	U_x	U_y	U_z	R_x	R_y	R_z
Üst Uç	0	1 (yükleme)	0	0	0	Serbest
Alt Uç	0	0	0	0	0	Serbest



Şekil 5. Sönümleyicilere tanımlanan uç nokta sınır koşulları

2.3. Çevrimsel Yüklemelerde Plastisite Davranışı için Malzeme Modeli

Mühendislik uygulamalarında malzemelerin plastik davranışı genelde süneklik, akma durumu, enerji sönümleme, anizotropi olarak değerlendirilir. Eğer bir malzeme plastik davranış sergiliyorsa bu lineer davranışlı malzemelere göre, daha karmaşık bir gerilim-gerinim ilişkisinin olduğunu gösterir. Doğrusal davranmayan malzemelerde rijitlik, gerilim seviyesinin bir fonksiyonudur [44]. Lineer davranış gerilme değeri (σ), elastisite modülü (E) ve gerinime (ϵ) bağlı olarak Denklem (5) ile, kuvvet (F) ise rijitlik (k) ve yer değiştirmeye (u) bağlı olarak Denklem (6) ile tanımlanır. Nonlineer davranış için gerilim değeri Denklem (7)'de gösterildiği gibi ifade edilirken, kuvvet ise Denklem (8) vasıtasıyla hesaplanır. Buradaki E_{ij} ve k_{ij} ifadeleri her bir adımdaki değişken elastisite modülü ve rijitlik değerleridir. Buradaki ij indisleri asal yönlere yönlendirilmiş eksenlere sahip bir koordinat sisteminde normal gerilmelerin değişimlerini simgelemektedir.

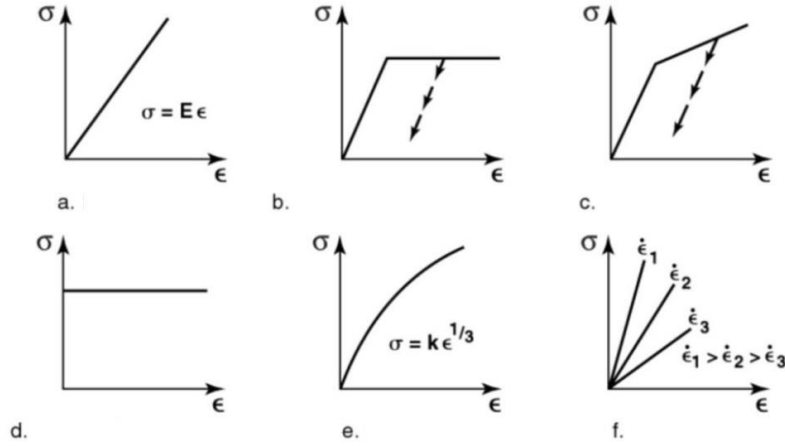
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5)$$

$$F = k \cdot u \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = E_{ij} \cdot \epsilon \quad (7)$$

$$F_{ij} = k_{ij} \cdot u \quad (8)$$

Sonlu elemanlar modeli için modelleme yapılırken Şekil 6'da verilen malzeme modelleri dikkate alınır. Genel olarak gerilme ve yük değerlerinin yukarıdaki denklemlerle ifade edildiği biçimde her bir yüklem adımında malzemenin gerçek davranışını yansıtacak tanımlamaların yapılması önemlidir.



Şekil 6. Malzeme davranışı kabulleri a) Lineer elastik b) İdeal elasto-plastik c) Pekleşen elasto-plastik d) Rijit-ideal plastik e) Eğrisel lineer elastik f) Viskoelastik [45]

Sonlu elemanlar modellemesi çözümlemesinde sonuç verilerin gerçek davranışı yansıtabilmesi adına model malzemesinin “akma kriterlerinin” (Rankine, Saint-Venant, Tresca, Beltrami ve Von Mises), “pekleşme durumlarının” (izotropik, kinematik) ve ayrıca çevrimsel yüklemeler olması durumunda da “Bauschinger etkisi” gibi parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekli ve son derece önemlidir.

Çoğu yapılan nümerik hesaplama, tek eksenli yükleme durumundaki standart çekme testi ve genellikle gerilme-gerinim durumunu tek eksenli veya çok eksenli durumlarda tanımlamak için kullanılır. Bu tür test sonuçları yalnızca basit elastik problemler ve düşük plastik deformasyon yapan elastoplastik problemler için elverişlidir [38]. Plastik davranışta, kinematik pekleşme modelini temel alan elastoplastik malzemelerin çevrimsel davranışını modellemek amacıyla Armstrong ve Frederick (1966) [39] bir önerme sunmuştur. Chaboche (1979) [40] tarafından sunulan model ise Armstrong ve Frederick’in modelinde bulunan öteleme faktörünün her adımda sabit kabul edilmesinden kaynaklı hataları minimuma indirmek amaçlı toplam öteleme faktörü ile ilgili bir düzeltme içermektedir. Chaboche modeli, Armstrong ve Frederick modelinin aksine kinematik pekleşme değil, izotropik ve kinematik pekleşmenin bir kombinasyonunu kullanır ve malzemelerin histeresis davranışını belirlemek için uygun bir modeldir [41]. Chaboche malzeme modeli akma yüzeyi tanımlamada Denklem (9)’da gösterildiği üzere Von Mises akma kriterini temel almıştır.

$$f = J_2(\sigma - \alpha) - \sigma^0 = 0 \quad (9)$$

Burada “ σ^0 ” akma dayanımı, “ $J_2(\sigma - \alpha)$ ” Von Mises gerilmesi, “ α ” ise malzemenin iç yapısının değişiminden kaynaklı oluşan ötelenme faktörüdür. Başlangıç denklemi esas alınarak gerilme ve şekil değiştirme yüzeylemindeki düzeltmelerinde dikkate alındığı formüller kullanılarak herhangi bir malzemenin Chaboche malzeme modeli ve parametreleri oluşturulabilir. Bunun için Krolo ve ark. [37] S275 ve S355 çelik sınıflarından imal edilen 33 adet plaka numune üzerinde değişken gerinim durumlarını modellemek ve Chaboche malzeme modeli parametrelerini kalibre etmek için 9 adedi monotonik 24 adedi ise SAC2000 [42] protokolüne göre standart çevrimsel yüklemelere tabi tutulan plaka numuneler üzerinde deplasman kontrollü bir dizi test gerçekleştirmiştir. Monotonik testler EN ISO 6892-1:2009’a göre metal malzemeler için tek eksenli çekme testleri oda sıcaklığında 9 adet numunede yapılmıştır ve mekanik özellikleri elde edilmiştir [46]. İlk adımda, pekleşme parametrelerinin kalibrasyonu, tekrarlı davranışı tanımlamak için Chaboche [36] prosedürünü takiben değişken gerinim aralıkları ile tekrarlı yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçları doğrulamak için, ABAQUS [43] programı kullanılarak modellenen değişken gerinim aralıklarına sahip pekleşme parametrelerinin doğruluğu deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda gerçek değerler kullanılarak ve daha sonrasında malzeme modeli için kalibre edilen değerler Tablo’3’de verilmiştir. Modellemede Krolo ve ark. [37] tarafından kalibre edilen S275 çelik sınıfına ait parametreler dikkate alınmıştır. Böylelikle daha önceden de denenmiş ve kendini kanıtlamış malzeme parametreleri bu çalışmadaki modellere tanımlanmıştır.

2.4. Yükleme Prosedürü

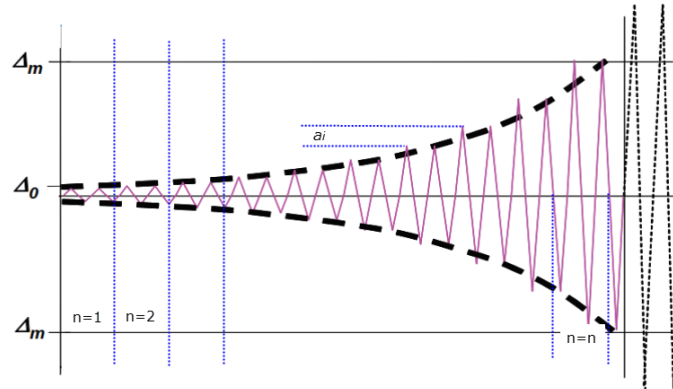
Yapısal elemanların deneysel ve numerik çalışmalarında yük kontrollü ve yer değiştirme kontrollü olmak üzere iki farklı şekilde yükleme prosedürü kullanılabilir. Yükleme prosedürlerinin en çok kullanılanları ECCS [47], ATC-24 [48], FEMA-461 [41], JISF [50] ve ANSI/AISC 341-16 [51] gibi farklı ülkelerin yönergeleridir.

Tablo 3. S275 çelik sınıfının kalibre edilmiş ve modellemede kullanılan Chaboche parametreleri [37]

<i>Malzeme</i>	<i>Eğri Davranışı</i>	<i>Parametreler</i>			
S275	Elastik Davranış	E	207000	MPa	
		ν	0.3		
	Plastik Davranış	Kinematik Davranış	$\sigma _0$	285	MPa
			C_1	13921	MPa
			γ_1	765	
			C_2	4240	MPa
			γ_2	52	
			C_3	1573	MPa
			γ_3	14	
	İzotropik Pekleşme	Q_∞	25.6	MPa	
b_p		4.4			

Bu çalışmadaki gibi bütünleşik sistemleri oluşturmak için U biçimlerin histeretik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılacak analizlerde daha çok FEMA-461 (2007) [49] ve Suzuki ve Saeki [52] tarafından geliştirilen yükleme protokolleri kullanılmaktadır. Her iki yükleme protokolü deplasman kontrollü yükleme protokolüdür.

İlk olarak bütünleşik sistemleri oluşturmak adına tekil modeller için daha az yükleme adımı ve pratik olması bakımından Suzuki ve Saeki [52] protokolü kullanılmıştır. Tekil modellemelerde kalınlık, genişlik ve uzunluk değişkenlerinden oluşan tüm kombinasyonların değerlendirilmesi sonucunda en elverişli tekil parçadan oluşturulan H ve V tipi için bütünleşik sistemler oluşturulmuştur. Bütünleşik modellerin oluşturulmasından sonra FEMA-461'e [49] göre deplasman kontrollü yükleme protokolüne geçilmiştir. Şekil 7'de şematik olarak gösterilen bu protokol, akma yükünün belirlendiği sistemlerde akma deformasyonunu içeren ikişer döngülü ve en az 10 adımda çalışmanın tamamlanmasını amaçlanmaktadır [49,50].



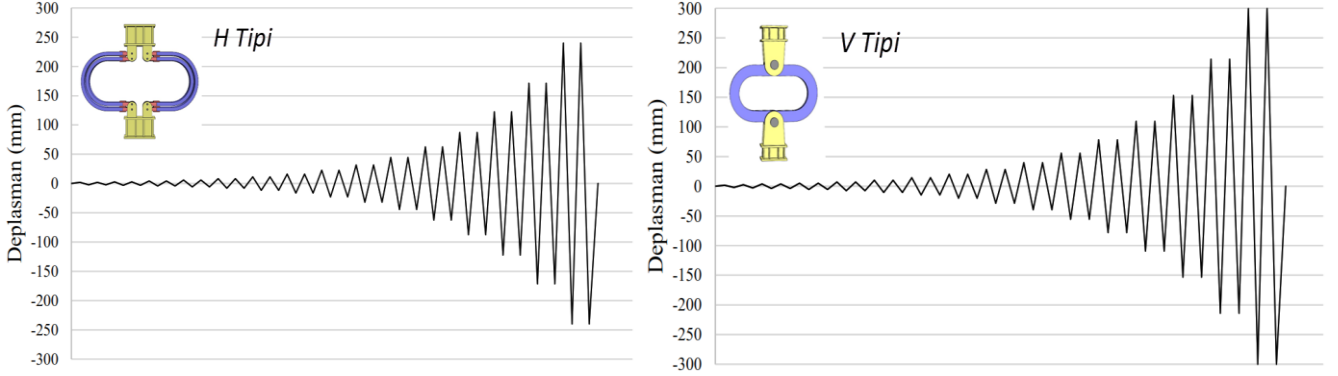
Şekil 7. FEMA-461'deki deplasman kontrollü yükleme durumunun grafik gösterimi [49]

Yükleme adımları artan genliklerin tekrarından oluşmaktadır ve her genlik iki döngüden oluşmaktadır. Grafik üzerinde gösterilen " Δ_0 " yükleme protokolünün en küçük deformasyon genliği, " Δ_m " ise yükleme protokolünün hedeflenen maksimum deformasyon genliğidir. " n " yükleme protokolündeki adımların sayısıdır, genellikle 10 ve yukarıdadır. " a_i " ise döngülerin genliğidir. En az 10 döngünün numune üzerinde geçmeden uygulanması gerekmektedir. Prosedürün oluşturulabilmesi için akma deformasyonu, başlangıç modelinde monotonik (tek yönlü) yükleme deneyi veya modeli yapılarak belirlenir. Bu tarifile H ve V tipi parçalar için monolitik yüklemeler yapılmış ve akma deformasyon değerleri oluşturulan grafikler üzerinde belirlenerek Tablo 4'de verilmiştir. Akma deformasyonuna göre her iki tip için oluşturulan

ve en az 10 adımlı yükleme prosedürü Şekil 8'de sunulmuştur. Bu yükleme protokolü tek tek tüm değişken ölçülerde denenmiş ve optimum kalınlığın belirlenmesi adına histeretik eğrilerin oluşturulması için kullanılmıştır.

Tablo 4. Monolitik yüklemelerde belirlenen akma deformasyonu ve akma yükü değerleri

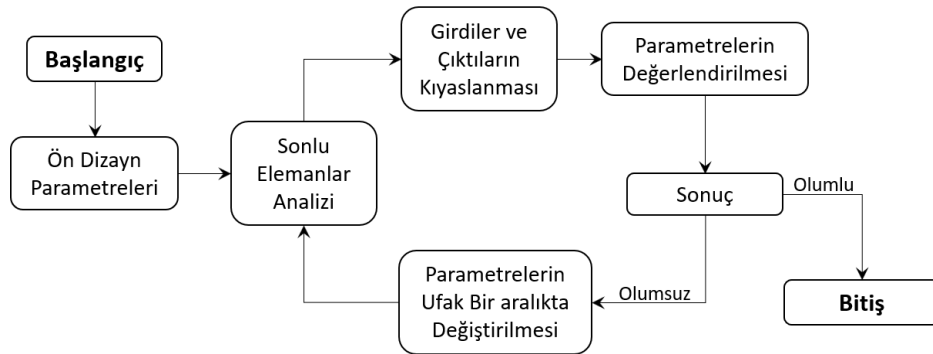
Model Tipi	Akma Deformasyonu Δ_y (mm)	Akma Yükü P_y (kN)
H tipi	10.77	41.07
V Tipi	4.42	53.68



Şekil 8. Bütünleşik sistemler için oluşturulan deplasman genliği grafikleri (H ve V tipi)

2.4. Tekil Sönümleyicilerde Optimum Kesitin Belirlenmesi

Optimum şekillerin belirlenmesinde Şekil 9'da gösterilen iş-akış şeması kullanılmıştır. İlk adımda en küçük ölçülerden başlanarak bir model oluşturularak, ardından bu model ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ile girdiler kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonrasında bir sonraki adımda boyutlarda ufak değişiklikler yapılarak adımlar tekrarlanmıştır. Yapılan küçük değişikliklerdeki amaç modelleme sonuçlarının daha hassas olarak değerlendirebilmektir. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar ve boyutların değişimi hakkında çıkarımlar yapılarak sonuçlar arasından optimum boyutlar elde edilmiştir. Bu tariflerle oluşturulan 228 adet modelde yapılan analizler sonucunda H ve V tipi U şekilli sönümleyiciler için optimum kesitler elde edilmiş ve bu kesitlerden bütünleşik çok parçalı sistemler oluşturularak en optimum kesitte ve parça sayısında bütünleşik sisteme ulaşılmıştır.



Şekil 9. Optimum boyutların belirlenmesinde kullanılan iş akış şeması

Tablo 1'de verildiği gibi dört farklı parametre dikkate alınarak oluşturulan kombinasyonları gruplandırmak gerekirse kalınlık parametreleri dikkate alınarak bir gruplandırma yapılırsa sonuçların bu bağlamda değerlendirilmesi daha kolay olacaktır.

3- Bulgular

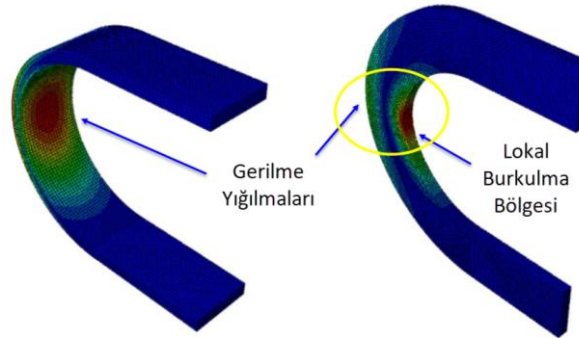
3.1. Tekli Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bir önceki bölümde açıklandığı gibi oluşturulan 228 adet model üzerinde yapılan analizlerden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular maksimum kuvvet (P_{max}), plastik şekil değiştirme enerjisi (ALLPD), eşdeğer rijitlik (k_{eff}), maksimum deplasman (δ_{max}), eşdeğer plastik gerinim (PEEQ), döngüde sönümlenen enerji (E_D) ve eşdeğer viskoz sönüm (ζ_{eq}) şeklinde olup karşılaştırmalar bu parametrelere göre yapılmıştır.

H ve V tipi sönümleyiciler için 5mm kalınlık değerinde döngü başına sönümlenen enerjiler de çok kayda değer bir artış gözlenmemiştir ve histeretik özellikler çok küçük değerlerde kalmıştır. Buna bağlı olarak toplam sönümlenen enerji ve maksimum kuvvet yönünden de verimli olamayan 5mm kalınlık değerinde ıraksaklık problemleri ile de karşılaşmıştır. Bu nedenlerden dolayı 5mm kalınlık değeri verimsiz bulunmuştur. Diğer kalınlıklar için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara ve kombinasyonlardaki parametre değişimlerinin nasıl yapıldığına örnek teşkil etmesi bakımından her iki tipi sönümleyicinin 10 mm kalınlık sabit alınarak oluşturulan kombinasyon sonuçları Tablo 5.'de verilmiştir.

Kalınlık değeri t ve toplam genişlik b değerlerinin artması ile maksimum kuvvet, plastik şekil değiştirme enerjisi, eşdeğer rijitlik ve ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ oranında artış gözlenmiştir. H tipi için ideal kalınlık değeri 20 mm ve ideal genişlik değeri 100 mm olarak belirlenmiştir. V tipi sönümleyicide ise 10 mm ve 15 mm kalınlık değerleri için yapılan analizlerde genişlik değerinin ve yükseklik değerinin artması ile pekleşme bölgesindeki burkulma davranışından kaynaklı kapasitede kayıplar gözlenmiştir. Bu durum kalınlığın 20 mm'ye çıkarılması ile kısmen ortadan kalkmıştır. V tipinde genişlik ölçüsü yükleme yönü ile paralel olduğu için 100 mm genişlik değerindeki olası burkulma problemlerine karşı bu değer 95 mm olarak belirlenmiştir.

Kol uzunluğu l değerinin pekleşme bölgesine ve kapasiteye direk olarak bir etkisi gözlenmemiştir. Kol uzunluğu kuvvet etkileyen uçtan pekleşme bölgesine bir moment kolu görevi görmektedir. Aynı kuvvet değerinde, kol uzunluğunun artması pekleşme bölgesindeki eğilme momentinde bir artışa sebep olur. Bu nedenden dolayı kol uzunluğunun artması maksimum kuvvet, eşdeğer rijitlik ve ALLPD değerlerinde bir azalmaya sebep olsa da ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değerinde artışa neden olmuştur. H ve V tipi sönümleyicilerin pekleşme bölgeleri Şekil 10.'de gösterilmektedir.



Şekil 10. H tipi ve V tip sönümleyicilerde pekleşme bölgeleri

Kalınlık (t) ve genişlik (b) ölçülerinde ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değeri maksimuma gidecek şekilde bir tercih yapıldığı için eşdeğer rijitlik, maksimum kuvvet ve ALLPD değerlerinin yüksek olması adına ideal kol uzunluğu H tipinde 100 mm belirlenmiştir. H tiplerinde burkulma davranışı gözlenmediği için bu bulgular geçerlidir. V tipinde kol uzunluğunun kısalmasından kaynaklı rijitlik artışıyla PEEQ $_{max}$ değeri küçük bir değerde kalmıştır. Kol uzunluğu 100 mm olan V2010130 isimli sönümleyicinin, kol uzunluğu 200 mm olan sönümleyiciye göre ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değerinin küçük kalmasından dolayı ideal kol maksimum uzunluğu 200 mm olarak belirlenmiştir.

İki sönümleyici tipinde de yükseklik (h) değerinin artması, deplasman kapasitesinin artması anlamına gelir. Yüksekliğin artması sönümleyici narinliğini artırdığı için maksimum kuvvet ve eşdeğer rijitlik değerlerinde düşmeye neden olsa da toplam deplasmanın artması ve pekleşme bölgesi alanında artış sağlamıştır. ALLPD ve ALLPD/PEEQ $^{0,6}_{max}$ değerleri yükseklikle doğru orantılıdır, yani yükseklik artışı bu değerlerde bir artışa neden olduğu için toplam yükseklik değeri iki tip için de 300 mm olarak belirlenmiştir.

H ve V sönümleyici tipinde belirlenen geometrik ölçüler belirlenmesinde Tablo 5'deki gibi elde edilen sonuçlar kullanılırken davranışı belirsiz modeller hariç tutulmuştur. Tablo 6'da özetlenen orantı durumları ve açıklanan bulgular dikkate alınarak bu geometrik ölçüler Tablo 7.'deki gibidir. En uygun model seçiminde kutu sonuç çıktıları kullanılarak kutu grafikler çizdirilmiştir (Şekil 11). H tipi ve V tipi için en uygun modeller Şekil 12. ve Şekil 13.'de gösterilmiştir.

Her iki sönümleyici tipi için levha kalınlık parametresine göre histeretik eğrilerden elde edilen sonuçlardan üretilen maksimum kuvvet (P_{max}) ve eşdeğer rijitlik (k_{eff}) değişimleri grafikleri H tipi için Şekil 14 ve 15’de, V tipi için ise Şekil 16 ve 17’de gösterilmiştir

Tablo 5. Kalınlığı 10 mm olan H tipi (20 adedi) ve V tipi (20 adedi) sönümleyicinin sonuçları

N	İsim	t	b	l	h	P_{max} (kN)	d_{max} (mm)	k_{eff} (N/mm)	ζ_{eq}	E_D (kNm)	ALLPD (kNm)	PEEQ _{max}	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max} (kNm)
1	H 10 3 1 10	10	30	100	100	1.992	95.448	21.230	0.641	0.812	0.800	0.189	4.235
2	H 10 3 1 20	10	30	100	200	1.454	198.732	8.842	0.580	1.276	1.259	0.184	6.829
3	H 10 3 1 30	10	30	100	300	1.108	299.669	5.683	0.574	1.824	1.803	0.194	9.293
4	H 10 3 2 10	10	30	200	100	0.993	94.165	10.158	0.457	0.275	0.264	0.058	4.577
5	H 10 3 2 20	10	30	200	200	0.838	194.032	4.454	0.517	0.552	0.537	0.073	7.393
6	H 10 3 2 30	10	30	200	300	0.710	294.456	2.684	0.622	0.909	0.890	0.090	9.893
7	H 10 3 3 10	10	30	300	100	0.643	96.402	6.764	0.262	0.100	0.086	0.019	4.502
8	H 10 3 3 20	10	30	300	200	0.587	198.188	2.996	0.382	0.285	0.269	0.036	7.480
9	H 10 3 3 30	10	30	300	300	0.523	289.020	1.880	0.511	0.512	0.492	0.050	9.846
10	H 10 5 1 10	10	50	100	100	3.334	99.198	34.526	0.633	1.324	1.306	0.182	7.196
11	H 10 5 1 20	10	50	100	200	2.498	199.939	14.935	0.572	2.144	2.115	0.196	10.786
12	H 10 5 1 30	10	50	100	300	1.894	299.711	9.533	0.576	3.094	3.058	0.207	14.774
13	H 10 5 2 10	10	50	200	100	1.726	99.361	17.536	0.434	0.458	0.439	0.059	7.445
14	H 10 5 2 20	10	50	200	200	1.455	198.611	7.534	0.498	0.927	0.901	0.076	11.902
15	H 10 5 2 30	10	50	200	300	1.225	298.090	4.527	0.610	1.533	1.501	0.092	16.318
16	H 10 5 3 10	10	50	300	100	1.126	96.402	11.372	0.254	0.174	0.150	0.020	7.486
17	H 10 5 3 20	10	50	300	200	1.004	197.552	5.171	0.370	0.460	0.434	0.036	12.068
18	H 10 5 3 30	10	50	300	300	0.892	294.576	3.165	0.495	0.846	0.814	0.050	16.274
19	H 10 8 1 10	10	80	100	100	5.510	99.720	56.916	0.619	2.170	2.140	0.189	11.321
20	H 10 8 1 20	10	80	100	200	4.016	197.399	23.074	0.587	3.340	3.296	0.192	17.184

N	İsim	t	b	l	h	P_{max} (kN)	d_{max} (mm)	k_{eff} (N/mm)	ζ_{sq}	E_D (kNm)	ALLPD (kNm)	PEEQ _{max}	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max} (kNm)
1	V 10 3 1 10	10	30	100	100	6.378	97.728	67.563	0.801	3.307	3.289	0.857	3.838
2	V 10 3 1 20	10	30	100	200	4.693	198.558	28.444	0.727	5.150	5.123	0.823	6.224
3	V 10 3 1 30	10	30	100	300	3.594	299.096	17.943	0.744	7.501	7.469	0.890	8.392
4	V 10 3 2 10	10	30	200	100	3.590	97.463	36.439	0.683	1.521	1.502	0.310	4.846
5	V 10 3 2 20	10	30	200	200	3.081	198.473	16.233	0.695	2.802	2.776	0.355	7.818
6	V 10 3 2 30	10	30	200	300	2.617	299.966	9.898	0.806	4.441	4.408	0.424	10.396
7	V 10 3 3 10	10	30	300	100	2.384	99.059	23.868	0.561	0.829	0.810	0.160	5.063
8	V 10 3 3 20	10	30	300	200	2.200	197.425	11.220	0.630	1.751	1.725	0.210	8.212
9	V 10 3 3 30	10	30	300	300	1.981	298.730	6.974	0.770	3.005	2.972	0.265	11.213
10	V 10 5 1 10	10	50	100	100	17.335	99.772	181.310	0.837	9.495	9.455	1.489	6.350
11	V 10 5 1 20	10	50	100	200	12.684	199.966	77.265	0.788	15.199	15.143	1.584	9.560
12	V 10 5 1 30*	10	50	100	300	9.910	299.988	41.275	0.735	17.104	17.052	1.140	14.958
13	V 10 5 2 10	10	50	200	100	10.279	99.789	103.112	0.758	4.862	4.823	0.631	7.644
14	V 10 5 2 20*	10	50	200	200	8.698	196.728	46.435	0.757	8.639	8.566	0.678	12.634
15	V 10 5 2 30*	10	50	200	300	25.008	299.783	86.662	0.465	22.748	22.591	0.818	27.617
16	V 10 5 3 10	10	50	300	100	6.952	95.528	70.251	0.664	2.797	2.757	0.340	8.108
17	V 10 5 3 20	10	50	300	200	6.459	196.325	32.861	0.709	5.735	5.679	0.42	13.521
18	V 10 5 3 30*	10	50	300	300	5.395	298.130	19.806	0.775	8.514	8.439	0.460	18.345
19	V 10 8 1 10*	10	80	100	100	39.505	99.997	396.286	0.673	16.644	16.563	1.686	9.824
20	V 10 8 1 20*	10	80	100	200	28.162	199.081	149.463	0.466	17.299	17.201	1.127	15.262

*Burkulma Gözlenen Modeller

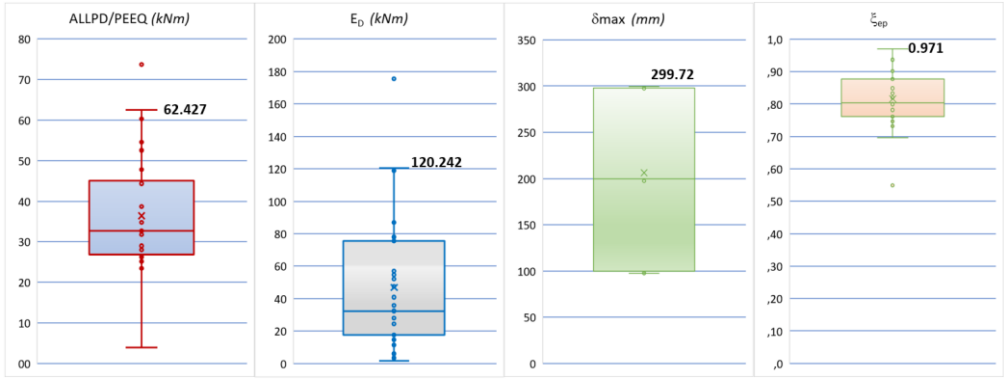
Tablo 6. H ve V tipi sönümleyicilere ait orantı tablosu

Orantı Durumu					
		t	b	l	h
		mm	mm	mm	mm
H Tipi	P_{max}	+	+	-	-
	k_{eff}	+	+	-	-
	ALLPD	+	+	-	+
	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max}	+	+	+	+
V Tipi	P_{max}	+	+	-	-
	k_{eff}	+	+	-	-
	ALLPD	+	+	-	+
	ALLPD/PEEQ ^{0.6} _{max}	+	+	+	+

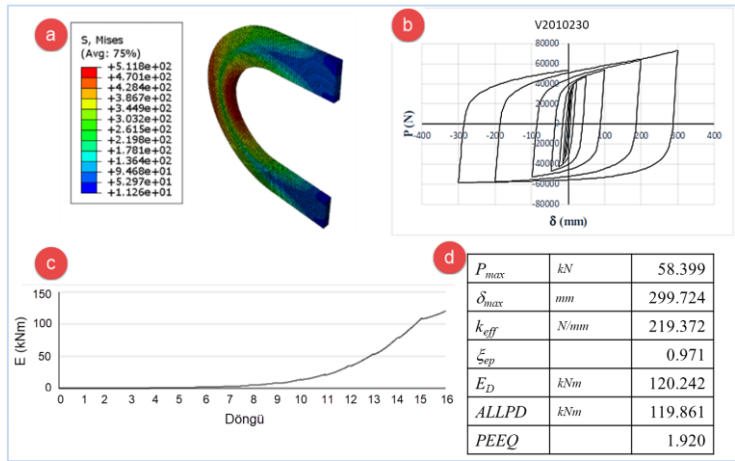
Tablo 7. Sönümleyiciler için belirlenen optimum ölçüler

		t	b	l	h
		mm	mm	mm	mm
H Tipi	Dış	20	100	100	300
	İç	20	100	100	240
V Tipi		20	95	200	300

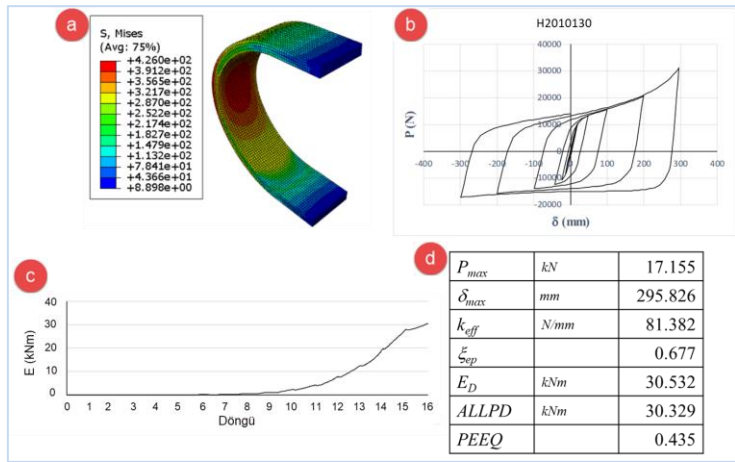
Bu grafiklerde görüldüğü üzere H tipi sönümleyicilerde burkulma oluşmadığı için elde edilen eğriler Tablo 6. ile uyumludur. V tipinde bazı ölçülerde ise yerel burkulma/buruşma gözlenmiştir. Bu durum erken oluştuğu için beklenen kapasiteden daha düşük yük değerlerinde göçme gerçekleşmiştir. Özellikle 10 mm ve 15 mm kalınlıklar değerlerinde pekleşme bölgesinde burkulma davranışı oluştuğu için bu eğriler H tipindeki eğrilere göre daha dalgalı biçimdedir. H tipinde belirlenen ölçülere ait model adı H2010130 ve V tipinde belirlenen ölçülere ait model adı V2010230'dur. Bu grafiklerde, bulgular ve elde edilen orantı tablosunun doğruluğu açıkça görülmektedir. V tipi için V2010230 modelinin en uygun olduğu kutu grafiklerdir Şekil 11.'de sunulmuştur. Özellikle ALLPD/PEEQ oranına bağlı olarak bu oranın en yüksek olduğu değerde seçim yapılmıştır.



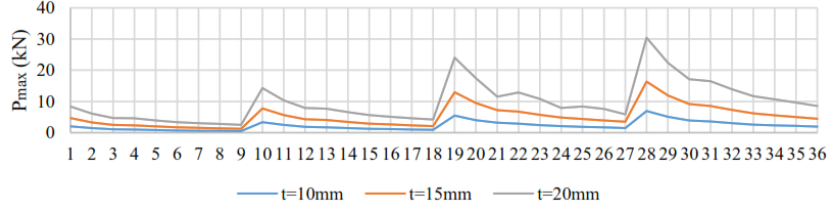
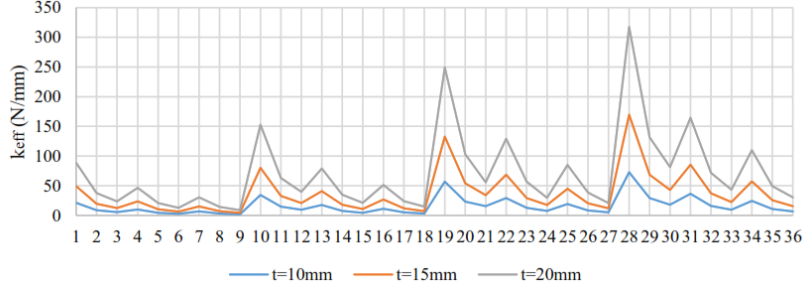
Şekil 11. V tipi modellerin sonuç çıktıklarına göre en elverişli model seçimi için kullanılan kutu grafikler



Şekil 12. V2010230 için a) Gerilme dağılımı b) Histeretik eğri c) Kümülatif enerji eğrisi d) Elde edilen sonuçlar (ALLPD/PEEQ^{0.6}_{max} =62.427)

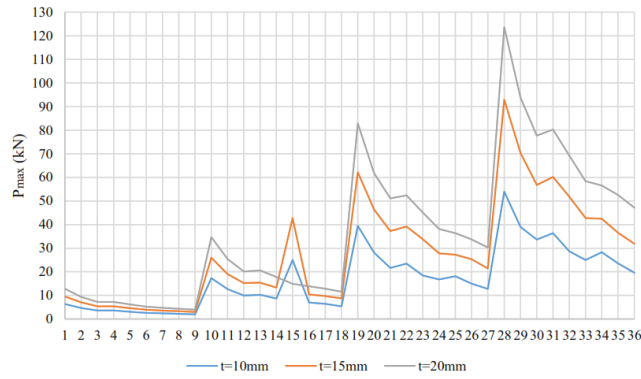
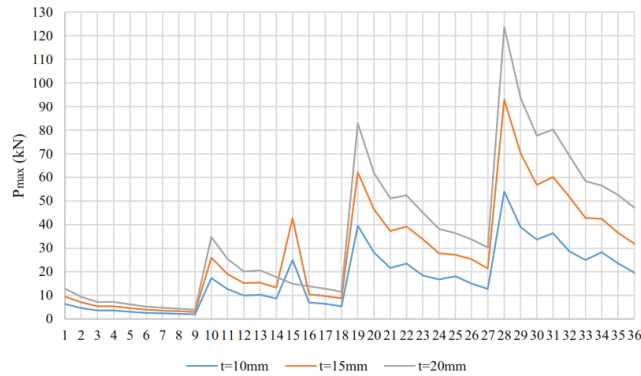


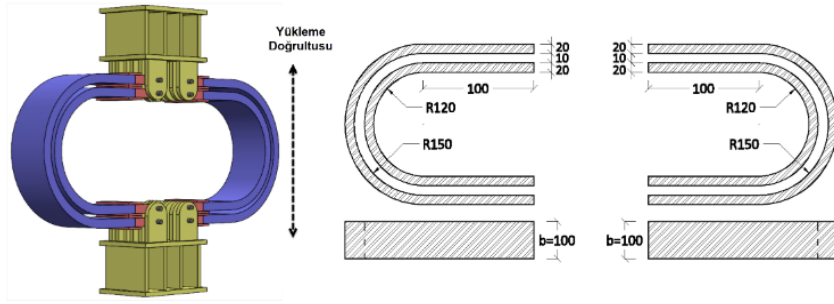
Şekil 13. H2010130 için a) Gerilme dağılımı b) Histeretik eğri c) Kümülatif enerji eğrisi d) Elde edilen sonuçlar (ALLPD/PEEQ^{0.6}_{max} =69.721)

Şekil 14. H tipi modellere ait P_{max} grafiğiŞekil 15. H tipi modellere ait k_{eff} grafiği

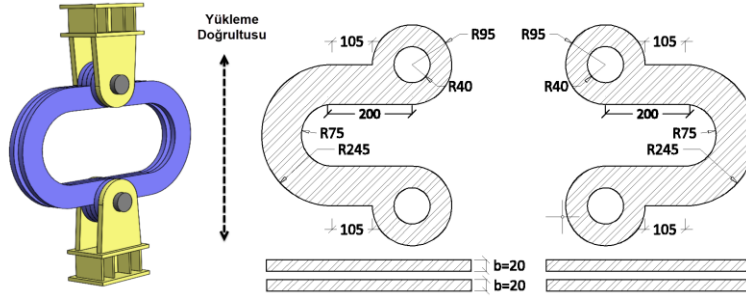
Tablo 7.'de belirtilen optimum ölçülere göre H tipi için oluşturulan dört parçalı bütünleşik model, yükleme yönü ve ölçüler Şekil 18'de, V tipi için oluşturulan dört parçalı bütünleşik model, yükleme yönü ve ölçüleri ise Şekil 19'de verilmiştir.

Verilen ölçülerde ABAQUS programında modellenen bütünleşik sistemdeki sönümleyicilerin her ikisine de Bölüm 2.4. de tariflenen FEMA 461'e [49] göre oluşturulan tekrarlı çevrimsel yüklemeler uygulanmıştır. H ve V tiplerine ait elde edilen Von Mises gerilme dağılımları sırasıyla Şekil 20'de maksimum eşdeğer plastik gerinim dağılımları ise Şekil 21'deki görsellerde verilmiştir.

Şekil 16. V tipi modellere ait P_{max} grafiğiŞekil 17. V tipi modellere ait k_{eff} grafiği



Şekil 18. H tipi bütünlük sistem için oluşturulan 4 parçalı model ve geometri detayları (mm)

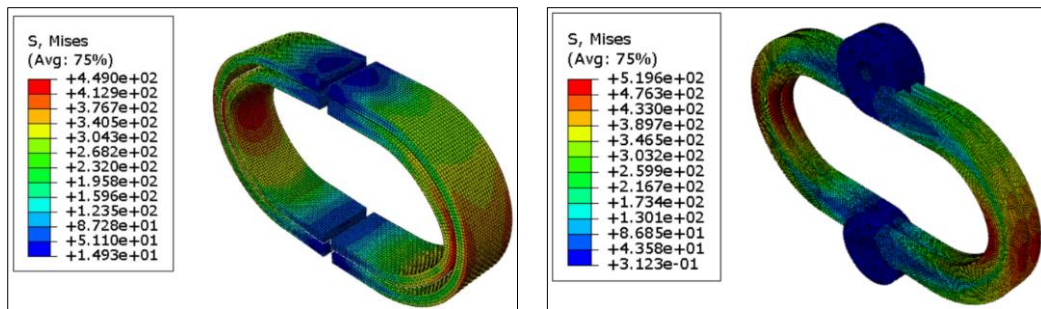


Şekil 19. V tipi bütünlük sistem için oluşturulan 4 parçalı model ve geometri detayları (mm)

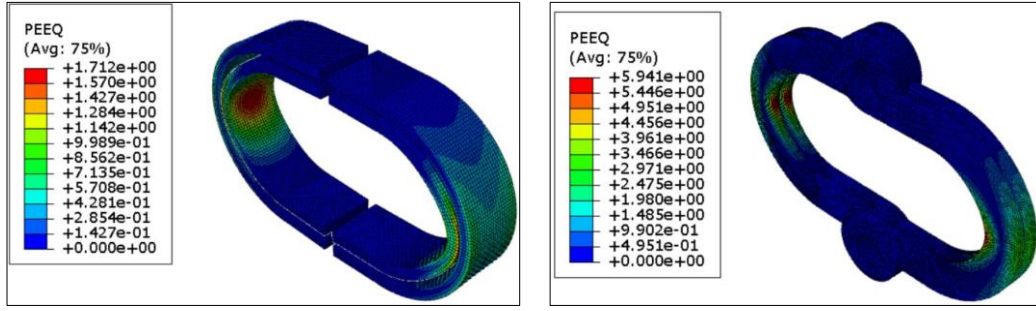
ABAQUS modelinde tanımlanan tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemeye prosedürüne göre sönümleyicilerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin, enerji sönümleme karakteristiklerinin ve yer değiştirme sınırlarının rahatlıkla değerlendirilebilmesine imkan sağlayan histerisis eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler H tipi ve V tipi için Şekil 22.'de gösterilmiştir. Bu modellere ait elde edilen mekanik özelliklerin sayısal değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Modelleme sonuçlarına göre 4 adet U biçim kullanılarak oluşturulan, V tipi sönümleyici H tipine göre daha yüksek kuvvet kapasitesi, daha yüksek deplasman yeteneği, daha düşük akma kuvveti ve daha düşük akma deplasmanına sahiptir. Düşük akma deplasmanı daha yüksek eşdeğer rijitlik değerine sahip olmasının bir sonucudur. Plastik sönüm enerjisi bakımından, eşdeğer viskoz sönüm ve toplam süneklik açısından da V tipi sönümleyicinin daha iyi bir alternatif olduğu Tablo 8.'den elde edilecek bir çıkarımdır. Üretimdeki zorluklar düşünüldüğünde H tipi sönümleyicinin üretimi hem kesim hem de büküm maliyeti içermektedir. V tipi sönümleyici de ise sadece kesim maliyeti bulunmaktadır. H tipi daha çok bağlantı parçasına ihtiyaç duyarken V tipinde tek bir bağlantı mili gereklidir ama onun da büyük çapta olması gerekir. Bu bakımda V tipi sönümleyicinin üretimi daha kolay ve ekonomik olduğu düşünülmektedir.

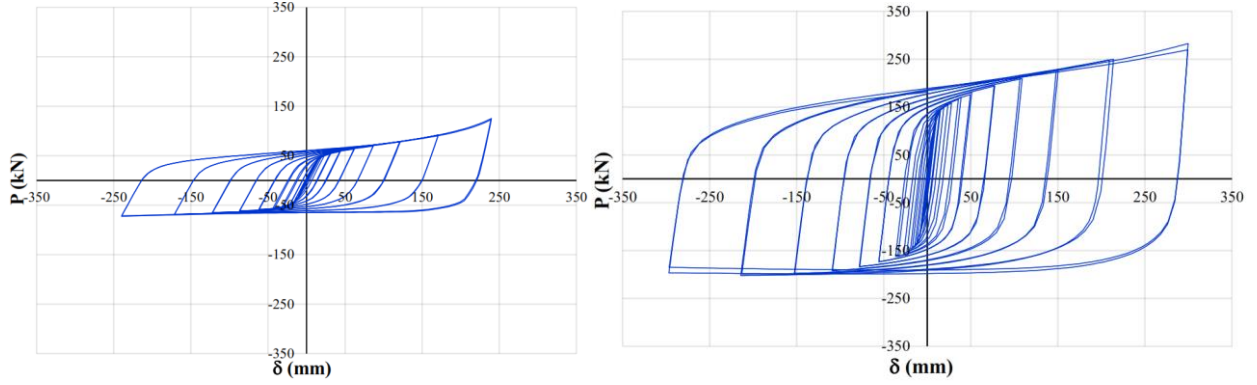
Tasarımı gerçekleştirilen ve tersinir tekrarlı yüklemelerle yapısal performansları ortaya konulan dört parçalı H ve V tipi metalik sönümleyicilerin daha önce çalışmalarda sunulmuş kendi kategorisindeki metalik sönümleyicilerle kıyaslanması yapılmıştır. Bu kıyaslama değerleri Tablo 9'da sunulmuştur.



Şekil 20. Sönümleyicilerin Von Mises Gerilme dağılımları (N/mm^2)



Şekil 21. Sönümleyicilerin maksimum eşdeğer plastik gerilme dağılımları (N/mm^2)



Şekil 22. H tipi (solda) ve V tipi (sağda) 4 parçalı sönümleyiciye ait histeretik eğriler

Tablo 8. Dört parçalı H ve V tipi 4 parçalı sönümleyicilere ait mekanik özellikler

Tip	P_{max}	δ_{max}	P_y	δ_y	E_D	$ALLPD$	k_{eff}	ξ_{ep}	$PEEQ_{max}$	$\frac{ALLPD}{PEEQ_{max}^{0.6}}$	μ
	kN	mm	kN	mm	kNm	kNm	N/mm				
H	125.47	240	41.07	10.770	287.2	286.39	413.04	1.92	1.712	207.42	22.29
V	282.63	300	53.68	4.420	1211.5	1210.14	812.89	2.66	5.941	415.45	67.87

Tablo 9. Literatürdeki metalik sönümleyicilerin mekanik özellikleri ve H4U ile V4U mekanik özellikleri kıyaslaması [53]

	PD	DPD	IPD	TADAS	SD	SPD	HD	CSYB	DFMDX	BSSD	BFD	H4U	V4U
Akma	2.5-	1.6-	0.80-		0.3-	0.7-					1.9-		
deplasmanı (mm)	4.0	2.1	3.20	1.1-5.8	0.49	5.2	-	4.5	1.5	0.51	3.17	10.77	4.77
Eşdeğer sönüm oranı	0.4	0.45	0.36	0.46	0.3-	0.1-	0.45	0.41	0.46	0.34	0.3-	1.92	2.67
Toplam sönümlenen enerji (kJ)	-	49.2	242	-	6.9-	5.8-	-	-	-	-	11.7	287.20	1211.49
Toplam deplasman (mm)	-	1130	2100	-	500	400	-	1888	353.3	-	458-	240	300
Süneklik	20	20	27.8	22	29-40	8.5	6	8.7	17.1	60	17.1	22.29	67.87
Kütle (kg)	0.7-	2.1-									0.17-		
	1.0	6.6	49.7	95.8	2.2	1.6	10.4	-	1.3	17	0.34	41.16	8.11
Yükseklik (mm)	114-	110-									158-		
	140	140	220	304	162	120	135	-	180	80	188	300	300
Maliyet	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Düşük
Kurulum	Kolay	Kolay	Kolay	Zor	Kolay	Kolay	Kolay	Zor	Kolay	Kolay	Kolay	Orta	Kolay
Değiştirilebilirlik	Orta	Orta	Zor	Zor	Orta	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta	Kolay	Orta	Kolay

H4U ve V4U sönümleyicilerinin güçlü ve zayıf yönlerini karşılaştırmak adına Tablo 9.'da Aghlara ve Tahir [53] tarafından sunulan, metalik sönümleyiciler açısından önemli parametrelerde yapılan kıyaslama kullanılmıştır. Bu kıyaslama temel parametreler dikkate alındığında H4U ve V4U sönümleyicilerinin diğer sönümleyicilere göre nasıl bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu iki tip sönümleyici de toplam sönümlenen enerji, eşdeğer sönüm oranı ve süneklik açısından diğer metalik sönümleyicilere göre oldukça büyük avantaja sahiptir. Diğer sönümleyicilerle kıyaslandığında V4U tipi sönümleyici H4U'ya göre akma deplasmanı yönünden daha elverişlidir. V4U tipi daha az parçalı olması ve daha hafif olması nedeniyle maliyet, kurulum ve değiştirilebilirlik yönünden H4U tipinden ve bazı diğer modellerden daha avantajlıdır.

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında iki farklı yönde derinliğe sahip tekil U biçimli sönümleyici parçalarının kalınlık, genişlik, kol uzunluğu ve yükseklik değişken tutularak sonlu elemanlar yöntemi ile histeretik özellikleri kıyaslanmıştır. U şekillerin optimum ölçüleri elde edildikten sonra iki adet 4 er U biçimden oluşan bütünleşik sistem üretilmiştir. Üretilen H4U ve V4U metalik sönümleyicilerin histeretik özellikleri belirlenerek literatürdeki diğer sönümleyiciler ile karşılaştırması yapılmıştır.

Tekli modelleme sonuçlarına ilişkin en önemli bulgular şu şekildedir.

- Her iki U şekil için de 5 mm kalınlık değeri burkulma problemleri ve ıraksaklık sorunlarından dolayı verimsiz bulunmuştur.
- Toplam genişliğin ve kalınlığın artmasının iki farklı tipteki U şekil için de bütün histeretik özelliklere olumlu katkıları vardır.
- H tipi ve V tipi için optimum kalınlık değeri 20 mm, yükseklik değeri 300 mm seçilmiştir. Toplam genişlik ve kol uzunluğu değerleri H tipinde 100 mm seçilmiştir. V tipinde ise olası burkulma davranışlarından dolayı genişlik 95 mm ve kol uzunluğu ortalama bir değer 200 mm uygun görülmüştür.
- Her iki sönümleyici de belirlenen geometrik özelliklerde kararlı histeretik davranış sergilemektedirler.
- Kol uzunluğunun artmasının pekleşme durumuna ve buna bağlı plastik sönüm enerjisine doğrudan bir etkisi yoktur. Kol uzunluğu, pekleşme bölgesi ile kuvvet uygulanan nokta arasında bir moment kolu görevi yapmaktadır. Kol uzunluğunun artması, aynı kuvvet değerinde, pekleşme bölgesindeki eğilme momentinde bir artışa neden olduğu için, H tipinde kol uzunluğu mümkün olduğunca kısa seçilmiştir. Kol uzunluğu rijitlik ile ters orantılıdır. Rijitlik artışı V tipinde pekleşme bölgesinde davranış belirsizliklerine neden olduğu için ve ALLPD / PEEQ^{0.6}_{max} değerinin kol uzunluğu 100mm olan modelin 200mm olan modele göre belirgin olarak düşük kaldığından dolayı, V tipinde kol uzunluğunun ortalama bir değer "200 mm" seçilmesi daha uygun görülmüştür.
- U şekillerin toplam yükseklik değerinin artması rijitlik ve maksimum kuvvette bir azalmaya neden olsa da pekleşme bölgesinin alanını artırdığından dolayı plastik sönüm enerjisine katkısı olumludur. İki model için de 300 mm yükseklik değeri yapılan analizlerde histeretik davranışta bir belirsizliğe neden olmadığı için uygun bulunmuştur.

Bütünleşik modelleme sonuçlarına ilişkin bulgular şu şekildedir.

- V4U bütünleşik sönümleyicinin eşdeğer rijitlik değeri, H4U bütünleşik sönümleyicinin eşdeğer rijitlik değerinden 1.96 kat daha fazladır. Eşdeğer rijitlik değerindeki artış daha erken döngülerde enerji sönümlemeye sebep olmaktadır. V4U 4.42 mm deplasmanda enerji sönümlemeye başlarken H4U'da ise bu değer 10.77 mm'dir.
- V4U'nun toplam sönümlediği enerji H4U'nun sönümlediği enerji değerinin 4.21 katı fazladır.
- V4U bütünleşik sönümleyici yaklaşık 3 kat fazla süneklik kapasitesine sahiptir.
- V4U bütünleşik sönümleyici yaklaşık 2 kat fazla maksimum kuvvet kapasitesine sahiptir.
- Deplasman kapasiteleri V4U için 300 mm ve H4U için 240 mm'dir.
- V4U'nun ALLPD / PEEQ^{0.6}_{max} değeri 203.7 iken, H4U'nun 167.285'tir. Bu açıdan sönümleyici verimi olarak V4U daha yüksek verime sahiptir.
- Literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında V4U sönümleyici, sönümlenen enerji bakımından oldukça büyük bir avantaja sahiptir. Büküm gerektirmeden imal edildiği için ve S275 yapısal çelik kullanıldığı için H4U'ya göre maliyet olarak düşük olmaktadır.

Kaynakça

- [1] Duggal, S. K., 2007. Earthquake resistant design of structures. New Delhi: Oxford university press, 448 pp.

- [2] Symans, M. D., Cofer, W. F., & Fridley, K. J., 2002. Base isolation and supplemental damping systems for seismic protection of wood structures: Literature review. *Earthquake Spectra*, 18(3), 549-572.
- [3] Sanchez, J., Masroor, A., Mosqueda, G., & Ryan, K., 2013. Static and dynamic stability of elastomeric bearings for seismic protection of structures. *Journal of structural engineering*, 139(7), 1149-1159.
- [4] Roeder, C. W., & Stanton, J. F., 1983. Elastomeric bearings: state-of-the-art. *Journal of Structural Engineering*, 109(12), 2853-2871.
- [5] Robinson, W. H., 1982. Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 10(4), 593-604.
- [6] Weisman, J., & Warn, G. P., 2012. Stability of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), 215-223.
- [7] Fenz, D. M., & Constantinou, M. C., 2008. Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011-1028.
- [8] Mokha, A., Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M., & Zayas, V. A., 1991. Experimental study of friction-pendulum isolation system. *Journal of Structural Engineering*, 117(4), 1201-1217.
- [9] Cheng, F. Y., Jiang, H., & Lou, K., 2008. *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press, 627 pp.
- [10] Shanmuga Priya, D., Cinitha, A., Umesha, P. K., & Nagesh, R. I., 2014. Enhancing the seismic response of buildings with energy dissipation methods–An overview. *Journal of Civil Engineering Research*.
- [11] Fujino, Y., & Abé, M. (1993). Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(10), 833-854.
- [12] Luft, R. W., 1979. Optimal tuned mass dampers for buildings. *Journal of the Structural Division*, 105(12), 2766-2772.
- [13] Bauer, H. F. (1984). Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures. *Journal of Sound and Vibration*, 93(1), 117-133.
- [14] Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T., & Kohsaka, R., 1995. Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation. *Engineering structures*, 17(9), 609-621.
- [15] Ghorbani, H. R., & Rofooei, F. R., 2020. A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures. *Engineering Structures*, 225, 111273.
- [16] Jaisee, S., Yue, F., & Ooi, Y. H., 2021. A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*, 235, 112022.
- [17] Skinner, R.J., Kelly, J.M., and Heine, A.J., Hysteresis dampers for earthquake resistant structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43, 287.
- [18] Eldin, M. N., Dereje, A. J., & Kim, J., 2020. Seismic Retrofit of Framed Buildings Using Self-Centering PC Frames. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 04020208.
- [19] Tyler, R.G., 1985. Further notes on a steel energy-absorbing-element for braced frameworks, *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 18, 270.
- [20] Xie, L., Zhang, L., Pan, C., Zhang, R., & Chen, T., 2020. Uniform damping ratio- based design method for seismic retrofitting of elastoplastic RC structures using viscoelastic dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105866.
- [21] Constantinou, M. C., & Symans, M. D., 1993. Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(2), 93-132.
- [22] Yang, T. Y., Li, T., Tobber, L., & Pan, X., 2020. Experimental and numerical study of honeycomb structural fuses. *Engineering Structures*, 204, 109814.
- [23] Varzaneh, M. N., & Hosseini, M., 2019. Cyclic performance and mechanical characteristics of the oval-shaped damper. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(11), 4747-4757.
- [24] Guo, W., Ma, C., Yu, Y., Bu, D., & Zeng, C. (2020). Performance and optimum design of replaceable steel strips in an innovative metallic damper. *Engineering Structures*, 205, 110118.
- [25] Qiu, C., Zhang, Y., Qu, B., Dai, C., Hou, H., & Li, H., 2019. Cyclic testing of seismic dampers consisting of multiple energy absorbing steel plate clusters. *Engineering Structures*, 183, 255-264.

- [26] Jiao, Y., Kishiki, S., Yamada, S., Ene, D., Konishi, Y., Hoashi, Y., & Terashima, M., 2015. Low cyclic fatigue and hysteretic behavior of U-shaped steel dampers for seismically isolated buildings under dynamic cyclic loadings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(10), 1523-1538.
- [27] Maleki, S., & Mahjoubi, S., 2013. Dual-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 85, 81-91.
- [28] Qu, B., Dai, C., Qiu, J., Hou, H., & Qiu, C., 2019. Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates. *Engineering Structures*, 179, 625-639.
- [29] Deng, K., Pan, P., Su, Y., & Xue, Y., 2015. Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading. *Engineering Structures*, 93, 27-35.
- [30] Maleki, S., & Mahjoubi, S., 2014. Infilled-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 45-58.
- [31] Gullu, A., Smyrou, E., Khajehdehi, A., Ozkaynak, H., Bal, I. E., Yuksel, E., & Karadogan, F., 2019. Numerical modelling of energy dissipative steel cushions. *International journal of steel structures*, 19(4), 1331-1341.
- [32] Shirinkam, M. R., & Razzaghi, J., 2020. Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box-Shaped Dampers (BSD). In *Structures* (Vol. 23, pp. 766-778).
- [33] Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., & Farzinfar, A., 2015. U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. In *Structures* (Vol. 3, pp. 163-171).
- [34] E. Yurteri, 2021. U Şekilli İki Farklı Metalik Sönümleyicinin Histeretik Davranışlarının Nümerik Olarak İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri,
- [35] Halama, R., Sedláč, J., & Šofer, M., 2012. Phenomenological modelling of cyclic plasticity. *Numerical Modelling*, 1, 329-354.
- [36] Chaboche, J. L., 1986. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of plasticity*, 2(2), 149-188.
- [37] Krolo, P., Grandić, D., & Smolčić, Ž., 2016. Experimental and numerical study of mild steel behaviour under cyclic loading with variable strain ranges. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- [38] Logan, D. L., 2000. *A first course in the finite element method using Algor*. Brooks/Cole Publishing Co., 696 pp.
- [39] Armstrong, P. J., & Frederick, C. O., 1966. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect (Vol. 731). Berkeley: Central Electricity Generating Board [and] Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department.
- [40] Chaboche, J. L., Van, K. D., & Cordier, G., 1979. Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel.
- [41] Fırat, M., 2004. Çevrimsel Malzeme Deformasyonlarının Modellenmesi Bölüm I Plastisite Bünye Modelleri. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 6(1), 1-11.
- [42] Protocol for Fabrication, Inspection, Testing and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens, 1997. FEMA, SAC-Steel Project, Oakland, Calif, USA,
- [43] Abaqus, F.E.A 2018. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA.
- [44] Jones, R. M., 2009. *Deformation theory of plasticity*. Blacksburg, Va: Bull Ridge Pub, 622 pp.
- [45] Çapan, L., & Güven, E., 2014. *Plastisite Teorisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, 256 s.
- [46] C. European Standard, EN ISO 6892-1: *Metallic Materials Tensile Testing-Part1: Method of Test at Room Temperature*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.
- [47] ECCS, 1986. ECCS Technical Committee 1 – Structural Safety and Loadings – Technical Working Group 1.3 – Seismic Design Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads”. 1st Edition, Brussels.
- [48] ATC-24, 1992. “Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings,” Report No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [49] FEMA, 2007. “Interim Protocols for Determining Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components Through Laboratory Testing,” FEMA 461 Draft document, Federal Emergency Management Agency.

- [50] Düğenci, O., 2022. Çelik basınç çubuklarında bazı güçlendirme türlerinin basınç dayanımı kapasitelerine katkısının deneysel araştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(1), 136-147.
- [51] ANSI/AISC 341-16, 2016. Seismic provision for structural steel building, American Institute of Steel Construction, Inc. 480 pp.
- [52] Suzuki, K., Saeki, E., & Watanabe, A., 1999. Experimental study of U-shaped steel damper. Part 1: Test of single U-shaped damper. Part 2: Test of U-shaped dampers with rubber bearings. In Proceedings of Architectural Institute of Japan (AIJ) Annual Conference, B (Vol. 2, pp. 665-668).
- [53] Aghlara, R., & Tahir, M. M., 2018. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. Engineering structures, 159, 185-197.