

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MANYETO-REOLOJİK SÖNÜMLEYİCİ İLE DEMİRYOLU KÖPRÜ
TİTREŞİMLERİNİN KONTROLÜ**

MURAT EMRE YÜCEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. MUZAFFER METİN**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANYETO-REOLOJİK SÖNÜMLEYİCİ İLE DEMİRYOLU KÖPRÜ
TİTREŞİMLERİNİN KONTROLÜ**

Murat Emre Yücel tarafından hazırlanan tez çalışması 04.01.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Manyeto-Reolojik sönümleyici ile demiryolu köprü titreşimlerinin kontrolü konulu tez çalışmamda;

Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN: Bilgi, kaynak, deneyim ve yönlendirmesiyle bana destek olduğu ve yardımcı olduğu için,

Arif ULU: Bu tez için gerekli bilgileri paylaştığı ve bana zaman ayırdığı için,

Mahmut PAKSOY: Kaynak ve deneyimleri ile bana destek olduğu için,

ve sürekli bana destek olan eşime ve aileme ve her zaman yanımda olan bütün arkadaşlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ocak, 2018

Murat Emre YÜCEL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez.....	6
BÖLÜM 2	
DEMİRYOLU ÜST YAPISI ve ÜST YAPI TİPLERİ	8
2.1 Demiryolu Üstyapısının Tanıtılması	8
2.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları	9
2.2.1 Raylar	9
2.2.2 Traversler.....	10
2.3 Demiryolu Üstyapı Tipleri	10
2.3.1 Balastlı Üstyapı	10
2.3.2 Balastsız (Rijit) Üstyapı	11
BÖLÜM 3	
DİNAMİK ANALİZ TEORİSİ	12
3.1 Demiryolu Köprüsünün Dinamiği.....	12
3.1.1 Dinamik Problemin Karakteristiği.....	12
3.1.2 Demiryolu Köprüsünde Rezonans	13
3.1.3 Dinamik Büyütme Faktörü.....	14

3.1.4	Demiryolu Köprüsünün Sönümü	14	
3.2	Değerlendirme Metodları	15	
3.2.1	Doğal Frekanslar	15	
3.2.2	Hareketli Yüke Maruz Kalan Basit Mesnetli Köprü.....	16	
BÖLÜM 4			
MR SÖNÜMLEYİCİLER			19
4.1	MR Akışkanlar	19	
4.2	MR Sönümleyiciler	20	
4.3	MR Sönümleyicilerin Matematiksel Modeli	22	
4.3.1	Bingham Modeli	22	
4.3.2	Bouc-Wen Modeli.....	24	
4.3.3	Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli.....	25	
BÖLÜM 5			
DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN MATEMATİKSEL MODELİ			28
5.1	Köprü Modeli	28	
BÖLÜM 6			
HAREKETLİ YÜKE MARUZ KALAN DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN KONTROLÜ.....			31
6.1	Kontrol Sistemleri.....	31	
6.2	Bulanık Mantık	32	
6.3	Demiryolu Köprüsünün Bulanık Mantıklı Kontrol Algoritması Yardımıyla Yarı Aktif Kontrolü.....	34	
6.4	Simulasyonlar	37	
6.4.1	40 km/sa Araç Hızı İçin Simulasyonlar	37	
6.4.2	60 km/sa Araç Hızı İçin Simulasyonlar	40	
6.4.3	80 km/sa Araç Hızı İçin Simulasyonlar	43	
BÖLÜM 7			
SONUÇLAR VE ÖNERİLER			47
KAYNAKLAR			49
ÖZGEÇMİŞ			54

SİMGE LİSTESİ

A	MR sönümleyici sabiti
c	Sönüm katsayısı
c_0	MR sönümleyici için yüksek hızlardaki vizkos sönümleme
c_1	Düşük hızlardaki yuvarlanma kuvvetleri için vizkos sönümleme
de	Hatanın Türevi
e	Hata
E	Elastisite modülü
EA	Köprü rijitliği
f_0	Akümülatör kuvveti
f_c	Sürtünme kuvvetleri
f	Doğal frekans
F	MR sönümleyici sönüm kuvveti
I	Kesit Atalet momenti
i	Mod sayısı
k_0	Bouc-Wen modeli için yüksek hızlardaki yay katsayısı
k_1	Akümülatör rijitliği
L	Köprü boyu
m	Köprünün uzunluk başına düşen kütlesi
n	MR sönümleyici sabiti
P_i	Aks yükü
T_i	Periyot
$w(x,t)$	Köprünün x konumunda ve t zamanındaki düşey yer değıştirmesi
x	Yer değıştirme
x_0	k_1 yayının başlangıç yer değıştirmesi
\dot{x}	Hız
x_{d1}	Birinci MR sönümleyicinin konumu
x_{d2}	İkinci MR sönümleyicinin konumu
β	MR sönümleyici sabiti
γ	MR sönümleyici sabiti
δ	Dirac-delta fonksiyonu
λ_i	İki açıklığa sahip sürekli bir köprü için boyutsuz frekans parametresi.
ω_i	Basit mesnetli köprünün doğal frekansı
ω_j	Basit mesnetli köprünün doğal frekansı

KISALTMA LİSTESİ

BMK	Bulanık Mantık Kontrol
ER	Elektro-Reolojik
MR	Manyeto-Reolojik
PSD	Power Spectral Density



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Demiryolu üstyapısını oluşturan elemanları.....	8
Şekil 2. 2 a)Vinyol tipli bir ray b) Oluklu tipli bir ray.....	10
Şekil 2. 3 Travers yerleşimleri.....	10
Şekil 2. 4 Balastlı üstyapı	11
Şekil 2. 5 Beton içine gömülü tip balastsız üstyapı	11
Şekil 3. 1 Rezonans tepesi grafiği	13
Şekil 3. 2 Basit mesnetli giriş üzerindeki hareketli yük	16
Şekil 4. 1 MR sıvısının manyetik alana tepkisi	20
Şekil 4. 2 MR sönümleyici modeli.....	20
Şekil 4. 3 Pasif sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi	21
Şekil 4. 4 MR sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi	21
Şekil 4. 5 Bingham modeli	23
Şekil 4. 6 Bingham modelinin kuvvet-zaman grafiği... ..	23
Şekil 4. 7 Bingham modelinin kuvvet-deplasman ve kuvvet-hız grafiği.....	24
Şekil 4. 8 Bouc-Wen modeli	24
Şekil 4. 9 Bouc-Wen modelinin kuvvet-zaman grafiği.....	25
Şekil 4.10 Bouc-Wen modelinin kuvvet-deplasman ve kuvvet-hız grafiği	25
Şekil 4.11 Gelişmiş Bouc-Wen modeli	25
Şekil 4.12 Gelişmiş Bouc-Wen modelinin kuvvet-zaman grafiği	26
Şekil 4.13 Gelişmiş Bouc-Wen modelinin kuvvet-deplasman ve kuvvet zaman grafiği. 27	27
Şekil 5. 1 Hareketli yüke maruz kalan MR sönümleyici demiryolu köprüsü	28
Şekil 6. 1 Açık çevrimli bir sistem	32
Şekil 6. 2 Kapalı çevrimli bir sistem	32
Şekil 6. 3 (a) Kesin Küme (b) Bulanık Küme	33
Şekil 6. 4 BMK sisteminin genel yapısı	34
Şekil 6. 5 İki giriş bir çıkışlı BMK algoritması	35
Şekil 6. 6 Giriş V1 (a), V2 (b) ve çıkış u (c) için üyelik fonksiyonları girişleri.....	36
Şekil 6. 7 Köprünün orta noktasının yer değiştirmesi (40 km/sa)... ..	37
Şekil 6. 8 Köprünün orta noktasının hızı (40 km/sa).....	38
Şekil 6. 9 Köprünün orta noktasının ivmesi (40 km/sa).....	38
Şekil 6.10 MR sönümleyici kuvvetleri (40 km/sa)	39
Şekil 6.11 MR sönümleyicilere uygulanan akım (40 km/sa).....	39
Şekil 6.12 Köprü ivme verisinin güç tayf yoğunluğu (PSD) (40 km/sa).....	40
Şekil 6.13 Köprünün orta noktasının yer değiştirmesi (60 km/sa).....	40
Şekil 6.14 Köprünün orta noktasının hızı (60 km/sa).....	41

Şekil 6.15	Köprünün orta noktasının ivmesi (60 km/sa)	41
Şekil 6.16	MR sönümleyici kuvvetleri (60 km/sa)	42
Şekil 6.17	MR sönümleyicilere uygulanan akım (60 km/sa).....	42
Şekil 6.18	Köprü ivme verisinin güç tayf yoğunluğu (PSD) (60 km/sa)	43
Şekil 6.19	Köprünün orta noktasının yer değiştirmesi (80 km/sa).....	43
Şekil 6.20	Köprünün orta noktasının hızı (80 km/sa)	44
Şekil 6.21	Köprünün orta noktasının ivmesi (80 km/sa).....	44
Şekil 6.22	MR sönümleyici kuvvetleri (80 km/sa)	45
Şekil 6.23	MR sönümleyicilere uygulanan akım (80 km/sa).....	45
Şekil 6.24	Köprü ivme verisinin güç tayf yoğunluğu (PSD) (80 km/sa).....	46



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5. 1 Demiryolu köprüsü parametreleri	29
Çizelge 5. 2 MR sönümleyici modeli parametreleri	30
Çizelge 6. 1 Bulanık Mantık Kontrolcü Kural tablosu	36
Çizelge 6. 2 ABB raylı taşıt parametreleri	37

MANYETO-REOLOJİK DAMPER SÖNÜMLEYİCİ İLE DEMİRYOLU ÜSTYAPI TİTREŞİMLERİNİN KONTROLÜ

Murat Emre YÜCEL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN

Bu tez çalışmasında, parametreleri bilinen gerçek bir demiryolu köprüsünün hareketli yük altında titreşimleri analiz edilmiş ve bu titreşimler bulanık mantık kontrol algoritması tabanlı çalışan Manyeto-Reolojik (MR) sönümleyici ile bastırılmıştır.

Çalışmada parametreleri bilinen, tek kirişli (single-span) gerçek bir demiryolu köprüsü seçilmiş ve buna ait yapısal parametreler kullanılmıştır. Dinamik titreşim analizlerini gerçekleştirmek için köprü, Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak basit mesnetli, homojen ve enine kesitli olarak modellenmiştir. Sürekli bir sistem olarak matematik modeli oluşturulan köprü Petrov-Galerkin yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. Köprünün uçlarına simetrik ve çapraz pozisyonda iki adet MR sönümleyici yerleştirildiği düşünülerek titreşimlerin bastırılması hedeflenmiştir. MR sönümleyiciler ise bulanık mantıklı kontrol algoritması yardımıyla simülasyon ortamında kontrol edilmiştir.

Köprü titreşimleri, taşıtın farklı hız ve yükleri için çeşitli senaryolarda analiz edilmiştir. Yapılan bu analizler sonucunda hareketli yüke maruz kalan köprü üzerinde yer değiştirme, hız ve ivme değerleri kontrolörlü ve kontrolörsüz olarak hem zaman hem de frekans alanında incelenmiştir. Her iki alanda elde edilen cevaplar, uygulanan yarı aktif kontrolün performansını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu köprüsü, Euler-Bernoulli, Petrov-Galerkin ,Titreşim analizi, Manyeto-Reolojik sönümleyici, Bulanık mantık kontrol, Yarı aktif kontrol



**CONTROLLING RAILWAY SUPERSTRUCTURE VIBRATIONS THROUGH
MAGNETO-RHEOLOGICAL DAMPER**

Murat Emre YÜCEL

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Muzaffer METİN

In this study, the vibrations of a real railway bridge under moving loads are analyzed and these vibrations are suppressed using Magneto-Rheological (MR) damper working with a fuzzy logic control algorithm.

In the study, a real single-span railway bridge with known parameters was selected and its structural parameters were used. In order to conduct dynamic vibration analysis, the bridge is modeled as simple support, homogeneous and cross-section by using Euler-Bernoulli beam theory. As a continuous system, the mathematical model bridge is discretized through the Petrov-Galerkin method. It was aimed to suppress the vibrations by considering that two MR dampers are placed symmetrically and diagonal to the ends of the bridge. MR dampers are controlled in the simulation through the fuzzy logic control algorithm.

Bridge vibrations have been performed in various scenarios for different speeds and loads of the vehicle. As a result of these analyses, the displacement, velocity and acceleration values on the bridge subjected to moving load have been investigated both in time and frequency domain with and without the controller. The responses obtained from both areas revealed the performance of the applied semi-active control.

Keywords: Railway bridge, Euler-Bernoulli, Petrov-Galerkin, Vibration analysis, MR

damper, Fuzzy logic control, Semi-active control



1.1 Literatür Özeti

Konu ile ilgili literatürde farklı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarına başlıklar halinde, demiryolu üst yapısı tipleri ve hesapları, üst yapıda modelleme yöntemleri, demiryolu köprüsü modellemesi, MR sönümleyiciler ve kontrol metorları olarak ele alınabilir.

Sevim [1] tarafından gerçekleştirilen çalışma üç bölümde incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde demiryolunun üstyapısı ve üstyapısını oluşturan elemanlar incelenmiş ve ray, travers, balast ve bağlantı malzemeleri ve demiryolu üstyapısının bütünsel işlevleri anlatılmıştır. İkinci bölümde İstanbul'daki kent içi raylı sistemler incelenmiş ve gerçekleştirilmekte olan, mevcut olan ve proje safhasında olan hatlar tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde ise demiryolu üstyapı hesapları anlatılmış ve mevcut raylı sistemlerin üstyapı hesabı yapılmıştır ve bu hesaplarda Winkler'in elastik ortama oturan kiriş hipotezi baz alınmıştır. Bu hipotezi demiryolu üstyapısı hesabında kullanırken Zimmerman yöntemi takip edilmiştir. Elde edilen değerler sonucunda mevcut üstyapıların güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.

Özalp [2] çalışmasında, kentiçi raylı sistemlerin üstyapısını incelemiş ve dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Ayrıca, kentiçi demiryolu üstyapısı için titreşim sönümleyici etkilerini analiz etmiştir. Son bölümde ise yol dinamiği için incelemeler yapmış ve farklı sınır şartlarında demiryolu üstyapısının dinamik tepkilerini incelemiştir.

Arlı [3] hem analitik hem de nümerik yöntemler kullanarak balastlı ve balastsız bir üstyapı için çeşitli analiz ve ölçümler yapmıştır. Analitik yöntem için, rayı Euler-Bernoulli kiriş

metoduyla modellemiş ve tekerlek yükünü rayda noktasal olarak modellemiştir. İstanbul metro güzergahında titreşim ve modal testler yapmış, demiryolunun frekans ve dinamik cevaplarını elde etmiştir.

Yalçın [4] yaptığı çalışmada, taşıt-yol bileşenlerinin, dinamik özellikleri, taşıt ve yola ait dinamik modelleri, taşıt-yol sisteminde oluşabilecek dinamik problemleri ile yol dizaynı için gerekli çözüm yöntemlerini incelemiştir. Ayrıca seçilen standart yol modeli için frekansa dayalı cevap ile analitik çözümler yapmış ve farklı yol bileşenleri için sonuçları elde etmiştir.

Şenalp [5] yaptığı çalışmada, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin dinamik cevaplarını incelemiş ve farklılıklarını ortaya koymuştur. Sonrasında, enine kesiti, sonlu uzunluğa sahip, basit mesetli ve viskoelastik bir zemin üzerindeki Euler-Bernoulli kirişinin titreşimini nümerik bir yöntemle incelemiştir.

Ulu [6] yaptığı çalışmada, kent içi raylı taşıtın titreşimleri incelemek için demiryolu üstyapısının hareketli yük etkisi altındaki dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, monoblok rijit bir üstyapı seçmiş, hattın gerçek geometrik parametrelerini kullanmış ve dinamik analizleri gerçekleştirmiştir.

Björklund [7] yaptığı çalışmada yüksek hızlı trenlere maruz kalan bir demiryolu köprüsünün dinamik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada LUSAS isimli ticari bir yazılım kullanmıştır. Trenin hızı sabit olarak modellenmiş, kuvvet ise aks yükü olarak belirlenmiştir ve köprü-tren etkileşimi ve ray pürüzlülüğünü ihmal etmiştir. Son olarak farklı köprü parametrelerinin etkisini incelediğinde, dinamik cevaba en çok etki eden parametrenin köprü sönümü olduğunu belirlemiştir.

Michas [8] yaptığı çalışmada 34 farklı demiryolu üstyapısını ve özelliklerini incelemiştir. Seçtiği rijit bir üst yapıyı üç boyutlu modelleyip, ticari sonlu elemanlar programı ile analizlerini gerçekleştirmiştir.

Esen [9], hareketli yüke maruz kalan demiryolu köprüsü kirişlerinin dinamik davranışını, incelemiştir. İncelediği çift kirişli köprü, ince kiriş ve kutu kesitli gerçeğine yakın Euler-Bernoulli kirişidir. Dinamik analizleri Newmark metodu ile yapmıştır. Yükün hareket hızı, kirişin dinamik davranışı ve hareketli kütlelerin kiriş kütlelerine oranını farklı değerler için incelemiştir.

Catania ve Sorrentino [10] çalışmasında, üzerinden tren geçtiği durumdaki bir demiryolu köprüsünün dinamik davranışın incelemiştir. Problemin içerdiği parametrelerin etkilerini doğrudan analizini yapmak için, basitleştirilmiş bir formül benimsemiştir. Tren ataletsel yayılı yük olarak modellenirken, köprü dikdörtgen levha eleman olarak modellenmiştir. Formülasyon, Rayleigh-Ritz yöntemini kullanılarak, zamana bağlı katsayılarla düşük mertebeden bir denklem elde edilerek tamamlanmıştır. Birkaç sayısal model, denklem parametrelerin her birinin etkilerini araştırmaya yönelik örnekler sunarak tartışmıştır.

Yang ve diğerleri [11] yaptığı çalışmada, uniform olmayan bir köprü ile taşıt-ray-köprü etkileşimini tekerlek-ray etkileşim arayüzünde incelemiştir ve köprünün dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin denklemlerini elde ettikten sonra çözüm yöntemini ve çift elemanların bağlantı metodunu geliştirmişlerdir. Son olarak, doğruluk, verimlilik ve eleman çiftlerinin fonksiyonunu iki nümerik örnekle açıklayıp, farklı köprü-ray kombinasyonlarını araştırmış ve farklı ray düzensizliklerinin dinamik cevaba etkisini tartışmışlardır.

Luu ve diğerleri [12] yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı trenlerin çalıştığı bir demiryolu köprüsünde rezonans bölgesindeki değerleri iyileştirmek için yarı aktif MR damper uygulamıştır. MR damperi kontrol etmek için H sonsuz kontrol algoritması uygulamıştır. Zaman gecikmesine karşı fizibil bir çözüm olarak doğrusal matris eşitsizlikleri kullanılmıştır. Geri beslemeli kontrol çerçevesinde, MR damper kuvvetlerinin izlenebilmesi için ağırlık fonksiyonlarını uygulamış ve sonuçları nümerik olarak analiz etmişlerdir.

Pisal ve Jangid [13] çok akslı tren yüküne maruz kalan bir köprünün istenmeyen rezonans cevabını bastırmak için ayarlı kütle damperi (AKD) etkisini incelemiştir. Bu çalışmada köprü parametreleri olarak Tayvan'da bir demiryolu köprüsü, tren parametreleri olarak ise Japon menşeli Salkesa trenini baz almışlardır. Köprü boyunca basit mesnetli ve uniform bir Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiş, trenin taşıt yükü ise hareketli kuvvet olarak modellenmiştir. Taşıtın basitleştirilmiş modeli, köprü ve ayarlı kütle damperi modelinden oluşturulmuş diferansiyel denklem takımı Newmark yöntemi kullanılarak nümerik analiz yardımıyla çözülmüştür. Ayarlı kütle

damperini optimize etmek için farklı yöntemler denenmiş ve titreşimi azaltmak için en optimum modelin dağıtılmış ayarlı kütle damperi modeli olduğu görülmüştür.

Fryba [14] hareketli yükler altındaki köprü titreşimlerini Fourier dönüşümleri ve Laplace dönüşümlerinin ile incelemiştir.

Esveld [15] demiryolu üzerine yazdığı kitapta, üstyapıya etki eden yüklerinden, üstyapı kararlılığından, üstyapı tasarımından, ray üretiminden, rayın mukavemet özelliklerinden ve kaynağından, üstyapı bakım ve onarımından bahsetmiştir.

Zhai ve Cai [16] taşıt-yol etkileşimini oluşturdukları nümerik model vasıtasıyla incelemiştir. Taşıt, 10 serbestlik derecesine sahip ve ayrık kütleli ve kirişi ise sürekli bir sistem olarak modellemiştir. Enine titreşimleri incelemek için yeni bir algoritma kullanmıştır. Yolun dinamik tepkisine neden olan üstyapı elemanlarını incelemiştir.

Literatürde Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı modelleme yapıp daha sonra Galerkin yöntemi ile çözdürülen çok sayıda çalışma mevcuttur. [17-44]

MR damper ile ilgili çalışmaları incelediğimizde, Spencer vd. [45], 1996 yılında yaptıkları çalışmada MR sönümleyici için üç adet model geliştirmiştir. Bunlar Bingham Modeli, Bouc-Wen Modeli ve geliştirilmiş Bouc-Wen modelidir. Bu modellerin MR sönümleyicinin davranışını testler ile doğrulayarak gerçeğe ne kadar yansıttığını göstermiştir.

Lau ve Liao [46], yaptıkları çalışmada, raylı taşıt modeli için MR sönümleyici kullanmışlar ve MR sönümleyicinin titreşim azaltmadaki başarısını incelemek için analizler yapmış, pasif ve yarı aktif kontrolcü modellerin titreşim azaltmasını kıyaslamıştır.

Ahmadian ve Pare [47], deneysel olarak oluşturdukları taşıt modeline MR sönümleyici uygulamışlardır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirdikleri çalışmalarında üç değişik kontrol yönteminin performansını incelemiştir. Bunlar; skyhook, groundhook ve hibrit kontrol yöntemleridir. Test sonuçları hibrit kontrolün diğer iki yöntemle göre daha etkin olduğunu göstermiştir.

Paksoy [48] yaptığı çalışmada, bulanık mantıklı ve öz uyarlamalı bulanık mantık ile kontrol edilebilen MR sönümleyiciyi tam taşıt modeli için uygulamıştır. Bu çalışmadan

MR sönümleyicinin sıfır voltajda inceleyip uyguladığı kontrol yöntemleri ile karşılaştırmış ve tümsek karakteristikli yol girdisine maruz kalan taşıtta titreşimi en iyi kontrol eden sistemin öz uyarlamalı bulanık mantık olduğunu göstermiştir.

Çetin [49] tezinde beş serbestlik dereceli bir yapıyı MR sönümleyici ile kontrol etmiş. Kontrol metodları olarak H sonsuz ve adaptif kontrol uygulamış, kontrolcülü ve kontrolcüsüz sonuçları karşılaştırmıştır.

Literatürü incelediğimizde taşıtların ve yapıların MR sönümleyici ile kontrol edildiği çok sayıda kaynak mevcuttur.

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, karşımıza karmaşık matematiksel modeller ve analitik çözümü olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin oldukça fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçların genellikle köprünün üstünden bir demiryolu taşıtı geçtiğinde, köprünün konumunda ve ivmesindeki değişim ve MR damperin kuvvet grafiği olduğu görülmüştür. Sonuçların ise hem zaman hem de frekans alanında incelendiği görülmüştür.

Bu tezde, demiryolu köprüsü basit mesnetli bir Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiş ve ortaya çıkan denklemler Galerkin yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır ve çözdürülmüştür ve farklı senaryolarda köprünün dinamik cevapları incelenmiştir. Köprüye ait dinamik cevaplar, MR sönümleyicinin bulanık mantıklı kontrolü vasıtasıyla bastırılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Artan hava kirliliğinin en aza indirilmesi, özellikle kentleşmeden kaynaklı trafik problemlerinin azaltılması, toplu taşımanın daha ucuz ve etkin olmasını sağlamak amacıyla raylı sistemler her geçen gün önem kazanmaktadır. Raylı sistemlerin artmasının her ne kadar avantajları varsa, beraberinde getirdiği dezavantajlar da mevcuttur. Bunların en önemlilerinden birisi yapısal titreşimler ve bundan kaynaklı gürültüdür. Bu durumda problemin ana kaynağı titreşim olarak ele alınmakta ve titreşimi kontrol metodunu belirlemek gerekmektedir. Yapı kaynaklı titreşimlerde, titreşimi sonradan kontrol etmek çok zor olacağı için, titreşim daha tasarım aşamasında yani kaynağında kontrol edilmelidir. Demiryolu köprüleri için ise durum biraz farklıdır.

Köprü titreşimlerini tasarım parametreleri ile azaltmak mümkün olsa da bu yeterli olmamakta ve köprünün bağlantı elemanlarına sönümleyici yerleştirilerek titreşim kontrol yapılmaktadır. Bu şekilde hareketli taşıt yüküne maruz kalan köprünün titreşimi kontrol edilerek hem yapılar daha az zarar görecektir, hem de köprü üstünden geçen taşıta bozucu etki olarak gelen köprü titreşiminin azalmasıyla dolaylı olarak taşıtın da titreşimi kontrol edilmiş olacaktır.

Demiryolu üstü yapı titreşimlerini minimum enerji harcayarak bastırmayı amaçlayan bu tezde, demiryolu köprü titreşimlerinin simulasyonunu gerçekleştirmek için sistemin fiziksel modeli elde edilmiş, fiziksel modelden matematiksel modele geçilerek istenen sınır şartları ve senaryolar için zaman ve frekans düzleminde simulasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tezde elde edilecek sonuçlar neticesinde, demiryolu üst yapı titreşimini kontrol etmek için üst yapı parametreleri, MR damper (kuvvet kapasitesi ve hangi noktadan etki edeceği) ve kontrolcü seçimi için bir referans olacaktır.

1.3 Hipotez

Demiryolu köprüsünde titreşimleri belirlemek öncelikle sistemin sınır şartları ve köprünün fiziksel parametrelerine ihtiyaç duyulur. Titreşim cevaplarını analiz etmek için hem zaman hem de frekans alanlı metodları kullanılır. Bu çalışmada, titreşim cevapları önce zaman alanında analiz edilip, daha sonra PSD yöntemi ile frekans alanına geçilerek incelenmiştir.

Üzerinden raylı taşıtın geçtiği bir köprü titreşimini kontrol etmek için MR damper kullanılmıştır. Akıllı malzemeler grubuna giren ve histerisis yapıya sahip olan MR damper, voltaj ya da akım uygulandığında aktif bir kontrolcü görevi görüp, voltajın ya da akımın iletilmemesi ya da her hangi bir nedenle çalışmaması durumunda ise pasif yani normal bir sönümleyici gibi davranır. Bu sistem, kurulumu yüksek maliyet gerektiren ve kontrol algoritması zor olan aktif bir kontrolcüye kıyasla hem güvenli hem de daha ucuzdur. Ancak zorlayıcı kuvvetine bağlı olarak MR damperin voltaj ya da akımını ayarlamak için kontrol algoritması gerekmektedir. Çalışmada, bulanık mantıklı kontrol algoritması kullanılmıştır. İki adet MR damperi köprünün altına 45 derece açı ile simetrik olarak yerleştirilip köprü titreşimlerinin düşey yönde kontrolü amaçlanmıştır.

Bu tezin orjinalliği, bir demiryolu köprüsünün raylı taşıt yükünü temsil eden hareketli yük altındaki düşey titreşimlerinin, bulanık mantıklı kontrol algoritması kullanılarak akım kontrolü uygulanan MR damper ile kontrol edilmesidir.

Bu alışmada İsvetde bulunan Banafjl krpsnn parametreleri kullanılmıştır. Köprünün matematiksel modeli kurulurken, köprü basit mesnetli kiriş olarak modellenmiştir. Sürekli bir sistem için elde edilen Euler-Bernoulli kiriş modeli, Galerkin yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. Çeşitli senaryolarda, köprünün titreşiminin ilk beş modu incelenmiş ve MR damper vasıtasıyla titreşimleri kotrol edilerek, kontrollü ve kontrolsüz titreşim cevapları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kontrollü cevaplarda iyileşme olduğu görülmüştür.

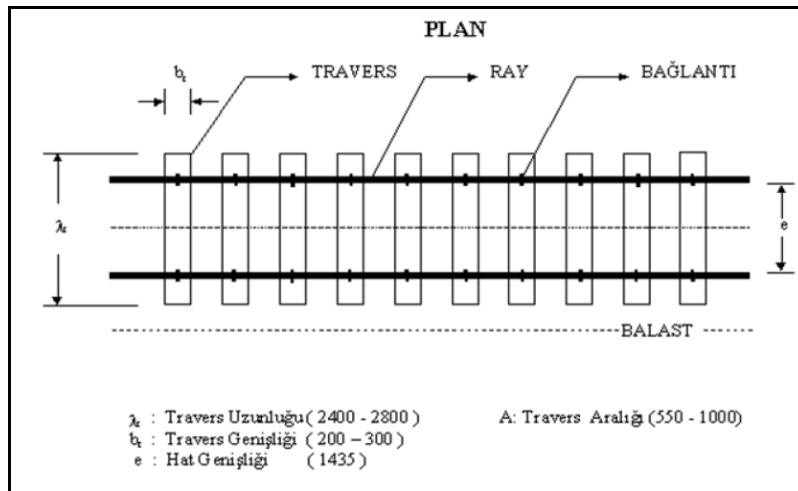


DEMİRYOLU ÜST YAPISI ve ÜST YAPI TİPLERİ

Bu bölümde demiryolu üst yapı elemanları hakkında bilgiler verilerek bu elemanlardan meydana gelen üstyapılar tanıtılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

2.1 Demiryolu Üstyapısının Tanıtılması

Bir demiryolunda üstyapı, altyapı sistemi üzerine oturan yapıya denir. Demiryolu araçlarından gelen statik ve dinamik kuvvetler tekerleklerden üstyapıya ve buradan da altyapıya aktarılır. Ayrıca üstyapı dış etkilerden de doğrudan doğruya etkilenir. Demiryolu araçlarının tekerlekleri ray denilen sürekli iki sıra metalik çubuk üzerinde yuvarlanma hareketi yaparlar. Raylarda travers denilen ve rayların altında onlara dik yönde belirli aralıklarla yer alan mesnetlere oturtularak tespit edilmişlerdir. Ray ve traversler Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bir yapı meydana getirirler.



Şekil 2. 1 Demiryolu üstyapısını oluşturan elemanları [2]

Balast, demiryolu üstyapısı yol eksenine boyunca altyapı üzerine döşenen ve genellikle kırma taşlardan oluşturulan bir tabakadır. Balast tabakası, bu tabakanın içine gömülü olarak yol eksenine dik yönde ve belirli aralıklarla döşenen ahşap, çelik ya da betonarme traversler, bu traverslerin üzerine sabit aralıkla ve yol eksenine paralel olarak döşenen bir çift çelik ray ve traversleri raylara, rayları birbirlerine bağlamaya yarayan bağlantı elemanlarından oluşur.

Rijit üstyapı ise balast yerine ondan daha az şekil değiştiren beton, betonarme ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapısıdır. Taşıma tabakası asfalt ya da beton olabilir. Rijit üstyapı için gerekli elastiklik, ray ve travers arasında ve/veya travers altında elastik malzemeler kullanılarak sağlanır [20].

Demiryolu üstyapısının görevleri şunlardır:

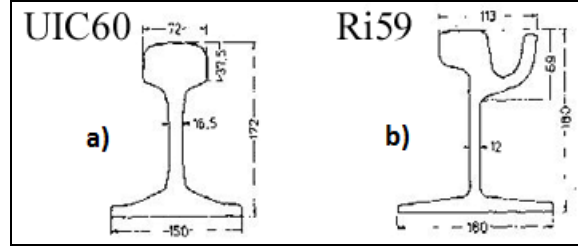
- 1) Taşıtlara istenilen geometrik ve fiziksel standartlarda, düzgün, pürüzsüz ve güvenli bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- 2) Taşıtların oluşturduğu dinamik etkiler ile diğer dış etkileri güvenlikle (hiçbir kalıcı yer ve şekil değiştirme yapmadan) karşılamak, bunları (elastik şekil değiştirmeler ile) kısmen azaltarak geniş bir yüzey boyunca altyapıya iletmek,
- 3) Bu görevleri düşük maliyetle uzun bir süre sürdürmek [21].

2.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları

Bu tez çalışmasında, en önemli demiryolu üstyapı elemanlarından olan raylar ve traversler tanıtılmıştır.

2.2.1 Raylar

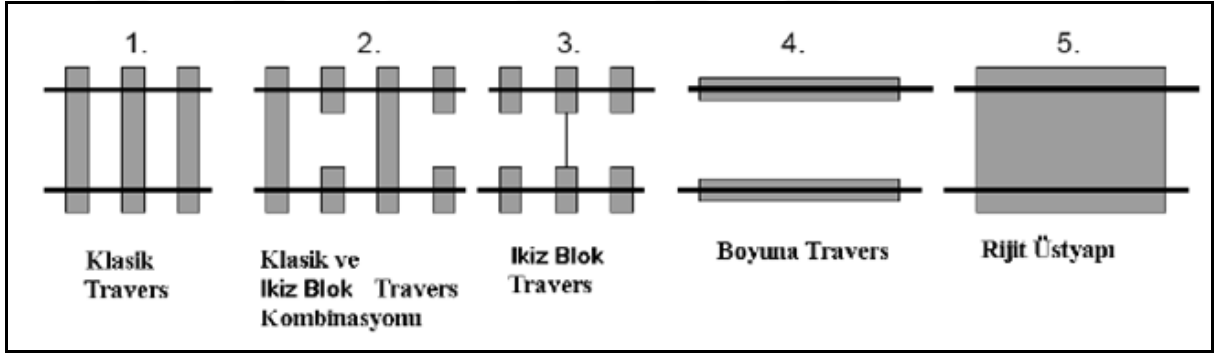
Raylar, demiryolu arabalarının tekerleklerine az direnimsiz gösteren bir yuvarlanma yüzeyi sağlar ve tekerlekleri kılavuzlar. Ayrıca dingillerden aktarılan etkileri, mesnet görevi yapan traversler aracılığıyla zemine iletirler. Günümüzde en çok iki tip ray çeşidi kullanılmaktadır. Bunlar Vinyol tipi ve oluklu tip raylardır ve Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2 a) Vinyol tipli bir ray b) Oluklu tipli bir ray [6]

2.2.2 Traversler

Traversler, yol eksenine dik veya paralel yönde ve belirli aralıklarla, rayların altına balast tabakası içine gömülü olarak döşenen enine ve boyuna kirişler olup, raylara mesnet görevi yapmaktadırlar. Raydan gelen kuvvetleri balasta ve ray pedine iletirler. Traversler Şekil 2.3'te gösterildiği gibi çeşitli şekillerde yerleştirilebilirler.



Şekil 2. 3 Travers yerleşimleri [2]

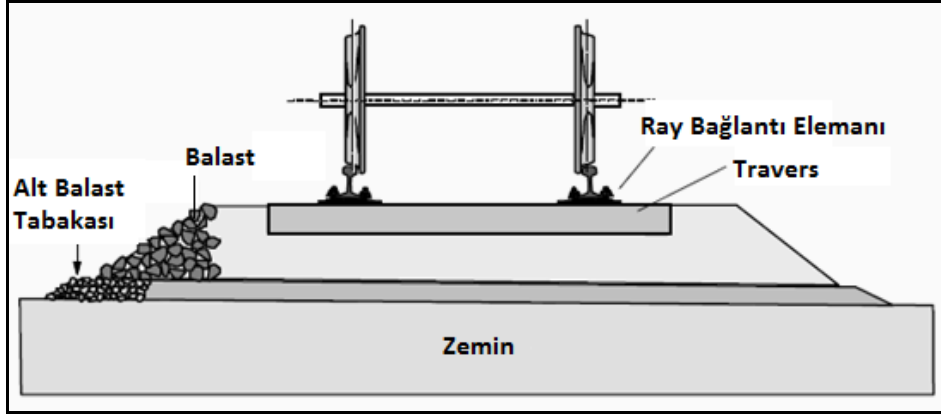
2.3 Demiryolu Üstyapı Tipleri

Bu kısımda demiryolu üstyapı çeşitlerinden balastlı ve balastsız yapı tipleri ve özellikleri yer alacaktır.

2.3.1 Balastlı Üstyapı

Dünyada kullanımda olan demiryollarının çoğunluğunun üstyapısı, balast üzerine döşenmiş traversler üzerine mesnetlenmiş ray dizilerinden meydana gelmiştir. Balastlı üstyapıda balast tabakası, alt balast tabakası, ray bağlantı elemanları, ray ve traverslerden oluşmaktadır (Şekil 2.4). Bu yapı tipinin yapım, bakım, onarım kolaylığı ve düşük maliyetli olması sebebiyle tercih edilmektedir. Diğer bir yapı tipi olan balastsız (rijit) üstyapının maliyeti ve işçiliği yüksek olmasına karşın, uzun yıllar kullanılabilirliği,

bakımının daha kolay olması ve artan trafik yükünden dolayı hızlı yenileme işlemleri için tercih edilmektedir.



Şekil 2. 4 Balastlı üstyapı [15]

2.3.2 Balastsız (Rijit) Üstyapı

Rijit üstyapı balast tabakası yerine daha az şekil değiştiren beton, betonarme ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapı tipidir (Şekil 2.5). Rijit üstyapı için gerekli elastiklik, ray ve travers arasında ve/veya travers altında elastik malzemeler kullanılarak sağlanır.



Şekil 2. 5 Beton içine gömülü tip balastsız üstyapı [8]

DİNAMİK ANALİZ TEORİSİ

3.1 Demiryolu Köprüsünün Dinamiği

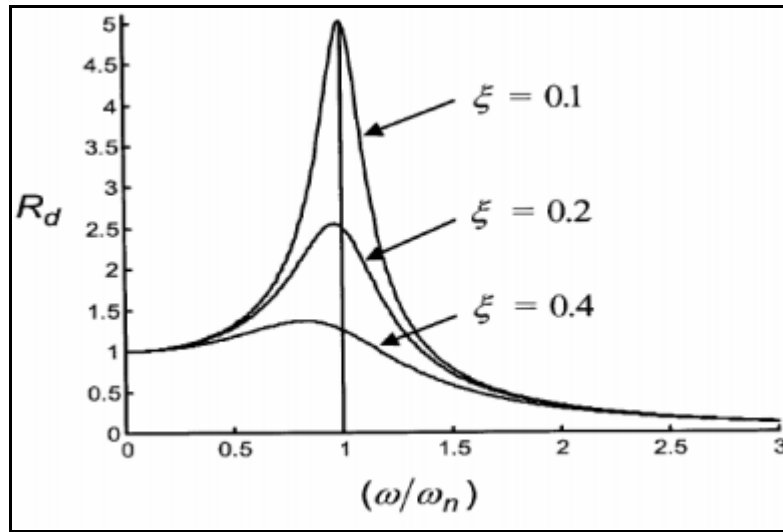
Bu bölümde, demiryolu körülerinin modellenmesinde dikkat edilmesi gereken hususlardan bahsedilerek köprünün hareketli yük etkisi altında dinamik modelinin nasıl oluşturulacağı anlatılmıştır.

3.1.1 Dinamik Problemin Karakteristiği

Dinamik hesap ve kavramlar çoğu zaman statik problem ve hesaplardan daha karmaşıktır. Dinamik yükte, büyüklük, yön veya pozisyon zamanla değişmektedir. Yine aynı şekilde yapının dinamik yüke verdiği cevap da zamanla değişir. Çünkü dinamik problemlerin, statik problemlerde olduğu gibi tek çözümü yoktur. Dinamik çoğu zaman, elastik direnç kuvvetine bir eylemsizlik ilavesi ve sönümlenme imkânı sunar. Yapının ivmelenmesine direnç gösteren bir atalet kuvveti üretildiği için, bir yapıya uygulanan dinamik yük sadece yüke değil aynı zamanda atalet kuvvetlerine de bağlıdır. Böylece yapıdaki karşılık gelen iç tepki, yalnızca sisteme dışardan uygulanan kuvvetlere değil, yapının ivmelerinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinde de dengelenmelidir. Atalet kuvvetleri toplam yükün önemli bir bölümünü temsil ediyorsa, hesaplamalarda sorunun dinamik karakteri dikkate alınmalıdır ancak atalet kuvveti ihmal edilemez derecede küçük olduğu durumda, yük ve yanıt zamana bağlı olarak değişse de, cevabın analizi statik olarak kabul edilebilir [7],[11],[12],[18],[22],[24],[25],[36].

3.1.2 Demiryolu Köprüsünde Rezonans

Rezonans olma durumunda şüphelenilirse, köprü yapısının dinamik analizi gereklidir. İstenmeyen bir durum olan rezonans, bir demiryolu köprüsünde yüksek hızdan ve boşluklu ray düzensizliklerinden meydana gelir. Yüksek ivme ve büyük ray düzensizliklerinden kaynaklı rezonans durumunda, köprünün üst kısmının maruz kalacağı aşırı titreşim, tekerlek ray kontağının kaybolmasına, balast dengesizliğine ve betonda gerilme limitlerini aşan çatlaklara sebebiyet verir. Bu sebeple, bir demiryolu köprüsü tasarlanırken rezonans durumu kesinlikle göz önüne alınmaktadır. Ancak köprünün üstünden geçecek raylı taşıt hızı 200 km/sa altında kaldığı durumlarda rezonans ihtimali oldukça azalır ve dikkate alınmayabilir. Maksimum dinamik yük etkisi rezonans tepesinde oluşur. Ayrıca rezonans olma riski hareketli yükten gelen tahrik frekansı köprünün doğal frekans ile çakışırsa yükselir. Köprünün üzerinden geçerken trenin hızı artarsa, trenden köprüye uygulanan tahrik frekansı köprünün titreşim modunun doğal frekansına yaklaşacaktır. Zaten rezonans olduğu durumda yapının vereceği dinamik cevap hızlı bir şekilde yükselecektir. Rezonans olma durumu ise köprünün sönümü ve yükün etkime karakteristiği ile ilgilidir. Özellikle rezonans tepesinin büyüklüğü, büyük oranda köprünün sönümlemesine bağlıdır (Şekil 3.1). Köprünün düşük sönüme sahip olması, yüksek rezonans tepeleri oluşturur. Bu durum ise demiryolu köprüsünün trafik güvenliğini azaltır [7],[14],[23],[25],[26],[27],[28].



Şekil 3.1 Dinamik tepkinin tepe değeri rezonansa bağlı olarak ortaya çıkar. Bu değer büyük ölçüde sönüm katsayısına bağlıdır

3.1.3 Dinamik Büyütme Faktörü

En genel tanımla, dinamik büyütme faktörü, mutlak dinamik cevabın mutlak maksimum statik cevabına oranı olarak tanımlanır ve birimsizdir.

Demiryolu köprüsünde dinamik büyütme faktörü, köprünün hareketli trafikten kaynaklanan statik tepkinin ek dinamik yükleri kapsayacak şekilde kaç kez genişletileceğini belirtir. Genellikle dinamik yükler köprü tepkisinin artmasına sebebiyet verir. Bu faktörle ilgilenmemizin amacı, dinamik sonuçların kolayca anlaşılmasını sağlamasıdır. En nihayetinde, dinamik büyütme faktörü mutlak dinamik cevabın, mutlak maksimum statik cevaba oranıdır. Dinamik faktörler çok basit ve kaba bir yöntemdir, ancak genel olarak demiryolu köprülerinin emniyet ve güvenilirliğini sağlar. Aslında demiryolu köprüleri tasarlanırken, köprü yapısındaki rezonans etkileri ve diğer titreşim etkilerini göz önüne alınarak yüksek hızlardan ötürü meydana gelecek dinamik tepkileri ticari cihazla toplamakta fayda vardır [7],[14],[23],[25],[26],[27],[28].

3.1.4 Demiryolu Köprüsünün Sönümü

Dinamik analizde, yapısal sönümlenme önemli bir parametredir. Sönümlenme özellikleri önemli olmasına rağmen, genelde kolay tespit edilmez. Hareketli yükten ve yapının titreşim büyüklüğünden dolayı köprünün cevabı ağırlıklı olarak sönümlenme kapasitesine bağlıdır. Rezonans olma durumunda ise sönümlenme oldukça önemlidir.

Dinamik cevabı azaltan sönümlenme, köprünün yapısını ve malzemesinin bir özelliğidir. Ayrıca köprü sönümlenme kuvvetinin büyüklüğü, köprünün titreşiminin büyüklüğüne bağlıdır. Köprünün üstünden taşıt geçtikten sonra ya da köprü diğer zorlamalara maruz kaldıktan sonra, sönümlenme özelliği köprüyü tekrar denge durumuna getirir.

Yeni köprülerin sönüm değerini kesin olarak bilmek mümkün değildir. Bu yüzden yeni köprü tasarlanırken, geçmiş ölçümleri temel alan ve kritik sönümün değer yüzdesinin alt limitlerini veren sönüm tabloları kullanılır. Hali hazırda var olan köprüler için ise sönümlenme değerleri, serbest titreşim ölçümlerinden logaritmik azalmanın

hesaplanmasıyla çıkarılabilir. Ancak bir demiryolu köprüsünün bütün sönümleme kaynaklarını hesaba katmak, çok sayıda olduğu için nerdeyse imkânsızdır.

Sönümleme aslında çok karmaşık bir olgudur. Enerjinin bir kısmı, malzemede meydana gelen plastik deformasyonla kaybolur ya da köprü titreşimi boyunca diğer bir enerji türüne dönüşür. Trenin geçtiği zamanda oluşturduğu enerji çevre ile tersinmezdir yani yok olduğu için geri döndürülemez [14],[23],[25],[26],[27].

3.2 Değerlendirme Metodları

3.2.1 Doğal Frekanslar

Doğal frekanslar, demiryolu köprüsünün en önemli dinamik karakteristiğidir. Doğal frekanslar, köprülerin dinamik yüklere duyarlılık derecesini karakterize eder ve birim zaman başına titreşim sayısı ile ölçülür. Doğal frekans f_i ile gösterilir ve burada $i = 1, 2, 3 \dots$ dizisi sırasını gösterir. Doğal frekans, doğal dairesel frekansı ω_i 'ye ve titreşim periyoduna (T_i) ye bağlıdır ve Denklem 3.1 ve 3.2'de gösterilmiştir. Period bir çevrim süresini ifade eder [14].

$$\omega_i = 2\pi f_i \quad (3.1)$$

$$T_i = 1 / f_i \quad (3.2)$$

Uyarma kuvveti bir sisteme geniş frekans spektrumunda uygulanır. Sürekli sistemlerin sınırsız sayıda doğal frekansı vardır. Köprülerin dinamik cevabını incelerken, genelde sadece en düşük frekanslar ile ilgilenilir. Köprü yapısı, zorlayıcı kuvvetler sisteme geniş bir frekans yelpazesinde uygulanırsa, yalnızca kendi doğal frekanslarına yakın frekansları seçer ve tepki verir. Bu nedenle doğal frekanslar dinamik analiz açısından büyük önem taşımaktadır [14],[26].

Basit mesnetli bir kiriş için, her bir i titreşim modundaki doğal frekans, Denklem 3.3'te ifade edilmiştir. İki mesnet üzerinde sürekli bir kirişin doğal frekansı Denklem (3.4) [14]'de formüle edilmiştir.

$$\omega_i^2 = \frac{i^4 \pi^4}{L^4} \cdot \frac{EI}{\mu} \quad (3.3)$$

$$\omega_i^2 = \frac{\lambda_i^4}{L^4} \cdot \frac{EI}{\mu} \quad (3.4)$$

Burada,

i mod sayısı

L kirişin uzunluğu [m]

E kirişin elastikiyet modülü [N/m^2]

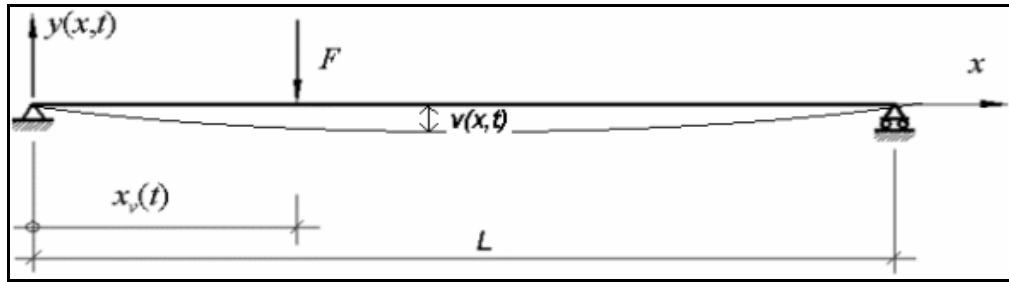
I kirişin alan atalet momenti [m^4]

μ kirişin birim uzunluk başına kütlesi [kg/m]

λ_i iki açıklığa sahip sürekli bir köprü için boyutsuz frekans parametresi. İlk beş mod için sırasıyla $\lambda_i = 3.142, 3.927, 6.283, 7.069$ ve 9.425 .

3.2.2 Hareketli Yüke Maruz Kalan Basit Mesnetli Köprü

En basit yöntemle, demiryolu köprüsü modelinin bir Bernoulli-Euler kirişi olarak modellenilebilir. Bu kiriş modeli, köprünün doğrusal karakterin yapısı olarak göz önüne alınır. Kirişin uzunluğu ile karşılaştırıldığında kirişin enine boyutları küçüktür. Basit mesnetli kiriş hareketinin diferansiyel denklemi, Denklem 3.5'te verilmiştir [14], [26].



Şekil 3.2 Dinamik tepkinin tepe değeri rezonansa bağlı olarak ortaya çıkar. Bu değer büyük ölçüde sönüm katsayısına bağlıdır [7].

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + 2\mu\omega_b \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = f(x,t) \quad (3.5)$$

Burada,

$v(x,t)$ köprünün x noktasında ve t zamanında dikey çökmesi

E kirişin elastikiyet modülü

I kirişin alan atalet momenti

μ köprünün birim uzunluk başına kütlesi

ω_b vizkos sönümüm dairesel frekansı

$f(x,t)$ köprünün x noktasında ve t zamanında birim uzunluğa karşılık gelen yüküdür.

Burada kiriş sabit kesitli ve kirişin birim uzunluk başına kütesinin sabit olduğu varsayılır ve sönümün titreşim hızı ile orantılı olduğu düşünülür.

Hareket eden kuvvetin F kütlesi, kirişin kütlesi ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu nedenle yükün yerçekimsel etkileri ihmal edilmemelidir ve hareketli yük sabit bir şekilde soldan sağa gitmektedir. Kuvvetin köprüye temas ettiği anda kiriş hareketsizdir. Sonuç olarak kiriş ne eğilmeye ne de hıza sahiptir.

Sınır koşulları,

$$v(0,t) = 0$$

$$v(L,t) = 0$$

$$\left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=0} = 0$$

$$\left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0$$

Başlangıç koşulları,

$$v(x,0) = 0$$

$$\left. \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0$$

Burada L , kirişin uzunluğunu ifade eder.

Denklem 3.5, sınır ve başlangıç koşullarıyla birlikte sorunun çözümü için gerekli bilgileri elde etmemizi sağlar. Kirişin dikey yönde çökme fonksiyonu $v(x, t)$ iki fonksiyonun sonucu olarak ortaya çıkar. Bunlar mod şekil fonksiyonu (özfonksiyon) $z(x)$ ve genelleştirilmiş koordinatlar $\Phi(t)$ fonksiyonudur. Mod şekli fonksiyonu yalnızca x uzay koordinatını ve zamanla değişen genelleştirilmiş koordinatlar fonksiyonun içerir. Köprünün her hangi bir konumundaki çökme, köprü i. eğilme modunda titreştiğinde harmonik olarak zamanla değişir ve Denklem 3.6'da ifade edilir.

$$v_i(x, t) = z_i(x) \cdot \phi_i(t) = z_i(x) \cdot (a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t) \quad (3.6)$$

Burada a_i ve b_i başlangıç koşullarıyla verilen keyfi katsayılarıdır.

Köprünün her hangi bir konumunda çökmenin genel çözümü, mod süperpozisyon teknikleri kullanılarak elde edilen bütün öz modların toplamıdır ve Denklem 3.7'de verilir.

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} z_i(x) \phi_i(t) \quad (3.7)$$

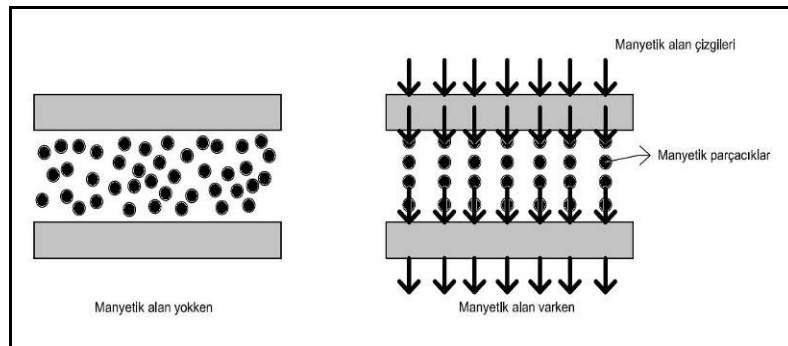
Denklem 3.7'yi, Denklem 3.5'te yerine yazarsak, Denklem 3.8'de gösterilen genel çözümü verir [11, 12].

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left(EI \frac{\partial^4 z_i(x)}{\partial x^4} \phi_i(t) + \mu z_i(x) \frac{\partial^2 \phi_i(t)}{\partial t^2} + 2\mu \omega_b \frac{\partial \phi_i(t)}{\partial t} \right) = f(x, t) \quad (3.8)$$

4.1 MR Akışkanlar

MR (Manyeto Reolojik) akışkanlar, 1940'lı yılların sonlarına doğru J. Robinow tarafından keşfedilmiştir [50]. MR akışkanları ayrıcalıklı kılan, akışkana uygulanan manyetik alana bağlı olarak akışkanın viskozitesinin değişmesidir. Bu sebepe bu akışkanlar kontrol edilebilir ve akıllı malzemeler grubuna girer.

MR akışkan yapı belirli oranda bir taşıyıcı sıvı içerisinde (silikon, madeni yağ vs.) eklenen küçük manyetik parçacıklardan oluşmaktadır. Bu sıvılar manyetik alana maruz kalmadığında normal bir akışkan özelliği gösterir ancak manyetik alana maruz kaldıklarında taşıyıcı sıvı içerisindeki manyetik parçacıklar zincir şeklinde dizilerek sıvı geçişi zorlaştırır. MR akışkanlar, Bu karakterden dolayı yüksek viskoziteye sahipmiş gibi davranırlar. Manyetik alandaki şiddet değiştikçe, sıvının viskozitesini değiştirir ve kontrol edilmesini sağlar. MR sıvıya manyetik alan uygulandığında oluşan zincir dizilimi Şekil 4.1'de verilmiştir.

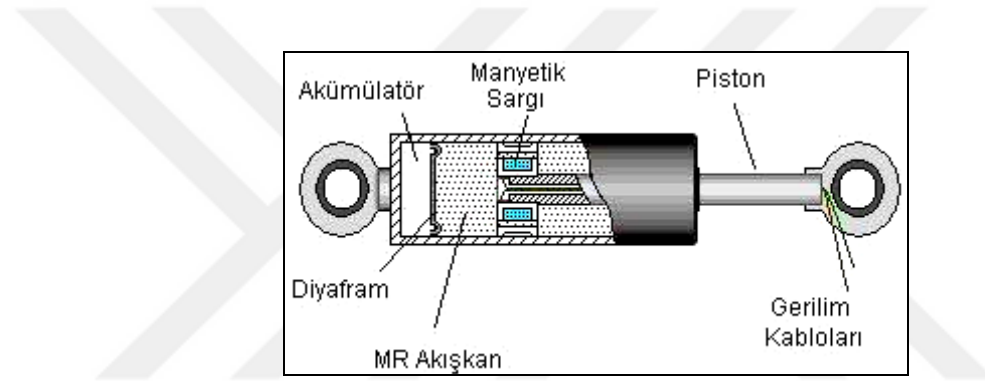


Şekil 4. 1 MR sıvısının manyetik alana tepkisi [48]

Hızlı cevap süresi, yüksek dinamik akma gerilmesi, geniş sıcaklık bandında çalışabilme (-40 °C - 150 °C) gibi özelliklere sahip MR sıvılar, manyetik ve elektrik alan uygulanınca sıvı halden yarı katı hale geçme süresi bir kaç milisaniye gibi çok kısa bir süredir ve uygulanan etki kalkınca aynı hız ile eski durumuna dönebilir. MR sıvılar düşük güç tüketirler ve 12-24 volt gibi düşük gerilim altında sadece 1-2 amper akım ile çalışabilirler [45].

4.2 MR Sönümleyiciler

Bir MR sönümleyicisinin fiziksel modeli Şekil 4.2'te verilmiştir.



Şekil 4.2 MR sönümleyici modeli [49]

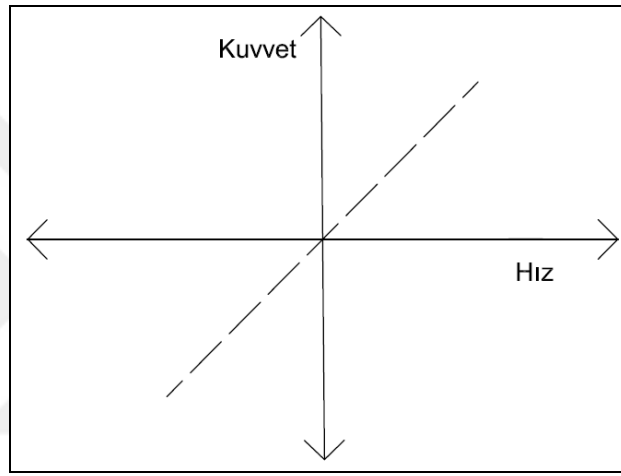
MR sönümleyici bir yarı aktif sönümleyicidir. Diğer bir deyişle, manyetik alan maruz kaldığında bir aktif sönümleyici gibi manyetik alana maruz kalmadığında ise pasif yani normal bir sönümleyici gibi davranır. MR sönümleyici piston, MR sıvısı, akümülatör ve manyetik sargıdan oluşur.

Ucuna uygulanan hareket ile reaksiyon kuvveti meydana getiren MR sönümleyicinin, maruz kaldığı manyetik alanın değişmesi ile de meydana getirdiği kuvvet değişebilir.

MR sönümleyicinin sargılarında manyetik alan oluşturmak için güce ihtiyaç vardır ve bu güç sınırlıdır. Bir akümülatör ile gerekli olan güç sağlanabilir. Bu özellik MR sönümleyicilerin en önemli özelliklerindedir ve ani enerji kesintilerinin yaşanabileceği durumda çok büyük avantaj sağlar. Herhangi bir sebeple elektrik kesintisi yaşanması durumunda bile, MR sönümleyici sisteme bağlı olduğu müddetçe normal bir

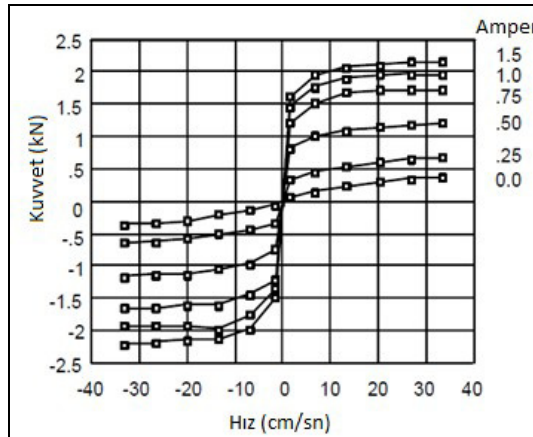
sönümleyici gibi davranacaktır. Ayrıca MR sönümleyiciler sisteme direk olarak enerji ilave etmez ve ucundaki hareket ölçüsünde titreşimi bastırır. Böylece sistemde kararsızlık olma ihtimali ortadan kaybolur. MR sönümleyicinin tek hareketli parçası içinde bulunan pistondur. Böylelikle olabilecek mekanik sorunlar en aza indirgenmiş olur [49].

Pasif sönümleyicilerin lineer davranır ve bu lineerlik sönüm kuvvetinin hız ile orantılı değişmesinden kaynaklanır. Bir lineer pasif sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisini önceden belirlemek mümkündür ve bir tanedir. Pasif sönümleyici kuvvet-hız grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 Pasif sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi [48]

MR sönümleyicilerde bir nonlineerlik durumu olduğu için ise durum farklıdır. Çünkü sönüm kuvveti manyetik alana bağlı olarak değişecektir. Kuvvet-hız eğrisi ise manyetik alana göre değişecektir. MR sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi Şekil 4.4'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 4 MR sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi [60]

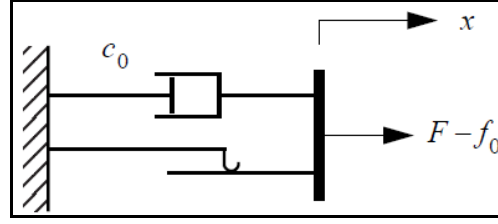
Özetle, sönümleyicileri pasif, yarı-aktif ve aktif olarak üç gruba ayırabiliriz. Pasif sönümleyici dediğimiz kuvvet ve hızın lineer karakterle değiştiği ve gündelik hayatta çok kullanılan basit bir sönümleyicidir. Yarı-aktif sönümleyici ise, MR sönümleyici gibi gibi içinde kontrol edilebilir akışkan bulunan sönümleyicidir ve akıllı malzeme olarak adlandırılır. Aktif sönüm ise, sönüme dışarıdan bir eyleyicinin (actuator) müdahil olduğu sönümleyicidir. Maliyet açısından en uygun olanı pasif sönümleyiciler çoğu durumda yetersiz kalırlar. Aktif sönümleyicilerde ise maliyet açısından yüksektir ancak kontrol kusursuz yapılmadığı taktide sisteme gelen fazla kuvvet sistemi kararsız yapabilir ve bu durum tehlike arzeder. Yarı-aktif sönüm ise manyetik alan uygulanmadığında pasif, manyetik alan uygulandığında aktif bir sönümleyici gibi davranır. Manyetik alan değişimi ise sisteme etki eden voltaj ile bağlantılıdır yani uygulanan voltaja bağlı manyetik alan, manyetik alana bağlı MR sıvısının vizkositesi, buna bağlı olarak sönümlemenin karakteristiği değişir. Sisteme voltaj etki etmediğinde ise sistem güvenli kalıp pasif sönümleyici gibi hareket eder. Yarı-aktif sönümleyicilerin iyi bir performans sağlaması için voltajı bir kontrol algoritması ile kontrol edilmelidir.

4.3 MR Sönümleyicilerin Matematiksel Modeli

MR sönümleyiciler nonlinear histeresiz karaktere sahiptir. MR sönümleyiciyi matematiksel olarak modellerken, nonlinear hareketi en iyi biçimde yansıtan bir modelleme yapılmalıdır. MR sönümleyicinin hareketini yansıtan birçok model geliştirilmeye çalışılmıştır. Literatürde en çok kullanılan modeller Bingham modeli, Bouc-Wen modeli ve geliştirilmiş Bouc-Wen modelleridir. Bu modeller yay ve sönüm elemanı gibi mekanik elemanlar kullanılarak elde edilir [52].

4.3.1 Bingham Modeli

Stanway ve diğerleri, ER (elektro-reolojik) sıvılarının reolojik davranışının bu modeline dayanarak, bir ER damperin davranışı için ideal bir mekanik model önermiş ve bu model Bingham modeli olarak adlandırmıştır [53]. Bingham modeli, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi damper ve sürtünme elemanından oluşmaktadır.



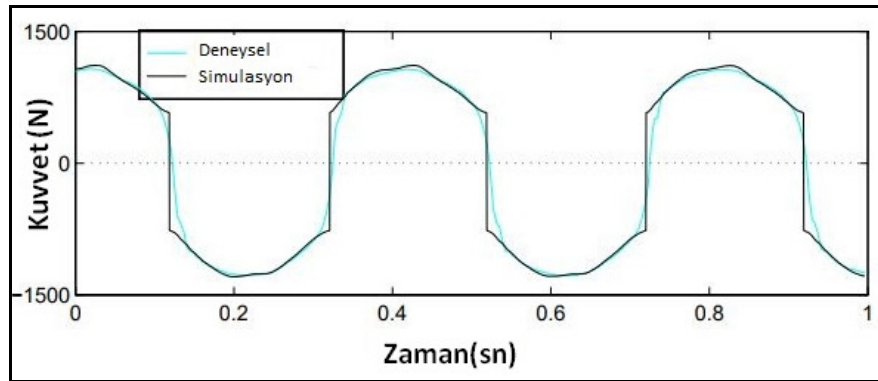
Şekil 4. 5 Bingham modeli [45]

Bu modelde sıfır olmayan piston hızı \dot{x} için, cihaz tarafından üretilen kuvveti Denklem 4.1'de şeklinde yazabiliriz.

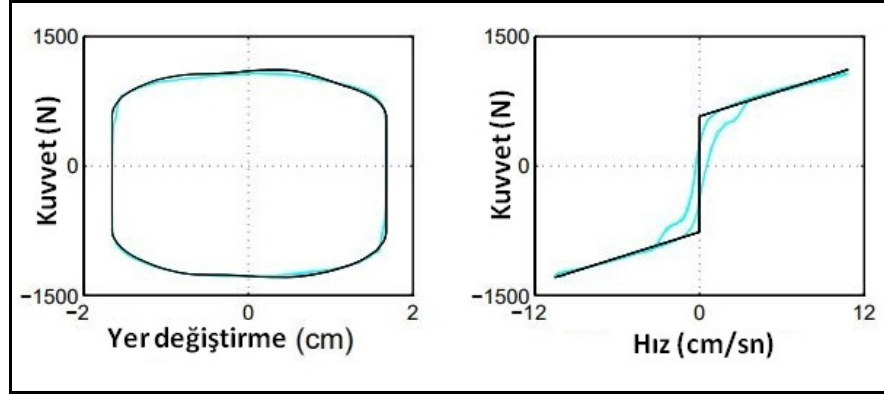
$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (4.1)$$

Burada; c_0 sönüm katsayısı, f_c sürtünme kuvvetini ifade eder. Sürtünme kuvveti sıvının akma gerilmesi ile ilgilidir.

Spencer ve diğerleri [45] tarafından 1996 yapılan çalışmada deneysel sonuçları, Bingham modeli ile bulduğu sonuçlarla kıyaslamıştır. Bingham modelinin deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmış ve Kuvvet-zaman grafiği Şekil 4.6'da, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.6 ve 4.7'de görüldüğü üzere, Bingham modeli MR sönümleyicinin hareketini modellemekte yetersiz kalmaktadır [45].



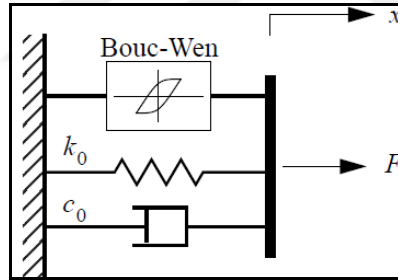
Şekil 4.6 Bingham modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [45]



Şekil 4. 7 Bingham modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [45]

4.3.2 Bouc-Wen Modeli

Nümerik olarak ele alınabilen ve histeresiz modelleme için kapsamlı bir şekilde kullanılan bir model de Bouc-Wen modelidir. Bouc-Wen modeli çok yönlüdür ve çok çeşitli histeresiz davranış gösterebilir. Bu modelin bir şeması Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Bouc-Wen modeli [45]

Bu sistemdeki kuvvet, Denklem 4.2'de tanımlanmıştır.

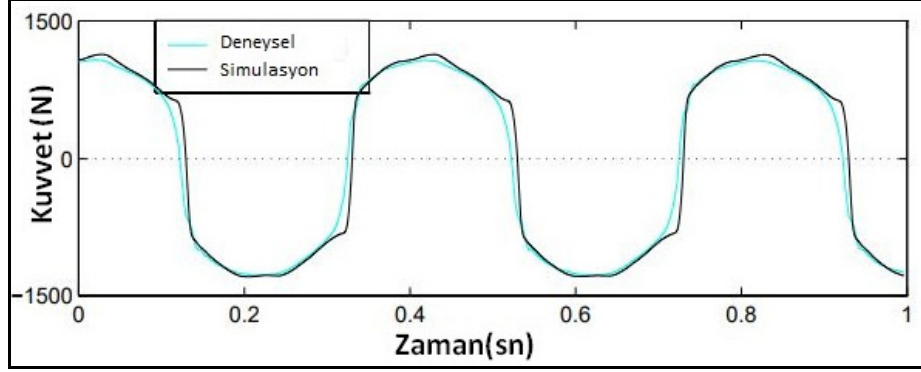
$$F = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z \quad (4.2)$$

Hesaplanabilir değişken z , Denklem 4.3' te tanımlanmıştır.

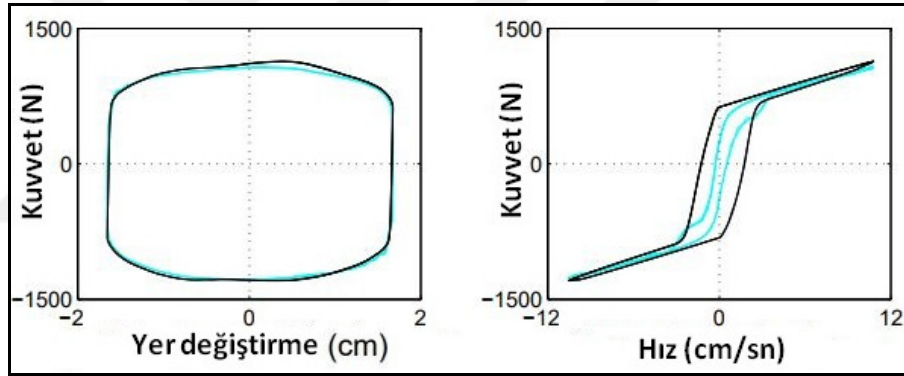
$$z = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (4.3)$$

Burada; γ, A, β MR sönümleyicinin histeresiz karakterinin tanımlanmasında kullanılan ve deneysel veriler sonucunda elde edilen sabitlerdir. x Yerdeğiştirme, \dot{x} hız, f_0 akülümator basınç kuvveti ve k_0 ise lineer yay katsayısıdır. Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlar ile

simulasyon sonuçlarının karşılaştırılmıştır. Kuvvet-zaman grafiği Şekil 4.9'da, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



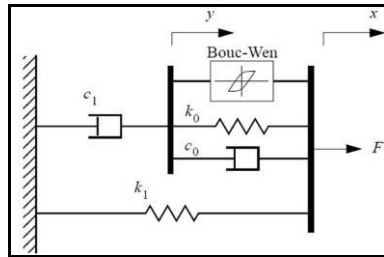
Şekil 4. 9 Bingham modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [45]



Şekil 4. 10 Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [45]

4.3.3 Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli

Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli, MR sönümleyiciyi gerçeğine daha da yakınlaştırmak için Bouc-Wen modelinin modifiye edilmiş halidir ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 11 Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli [45]

Bu modelde kuvvet, Denklem 4.4'te verilmiştir.

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) = c_1\dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (4.4)$$

Burada $c_1\dot{y}$;

$$c_1\dot{y} = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) \quad (4.5)$$

şeklinde olacaktır. Burada z ve y;

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}||\dot{z}|^{n-1}z - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4.6)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y) \} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilir.

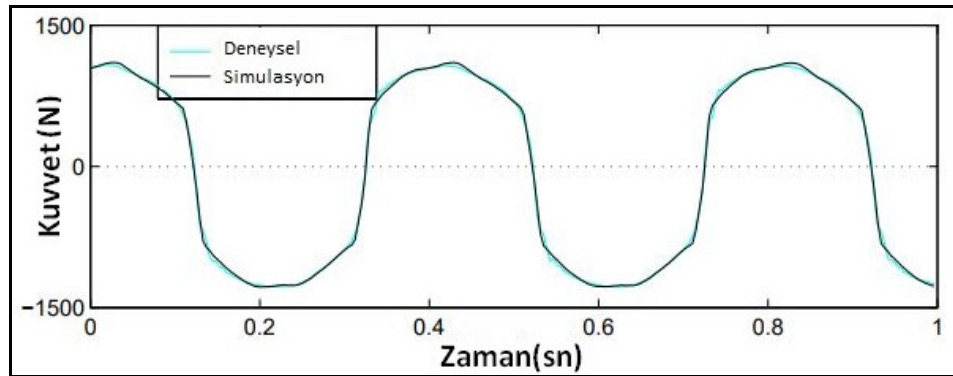
Burada, x toplam bağıl yer değiştirme, x_0 yay sabiti k_1 olan yayın başlangıç yer değiştirmesi, k_0 yüksek hızdaki yay sabiti, k_1 akümülatör yay sabiti, c_0 yüksek hızdaki vizkos sönümü ve c_1 düşük hızlarda kuvvet azalması için vizkos sönümü olarak tanımlanır. MR sönümleyicinin damperin sargılarına uygulanan gerilim sonucu oluşan magnetik alanın MR damper dinamiğine etkisi,

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \\ c_1 &= c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \\ c_0 &= c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \end{aligned} \quad (4.8)$$

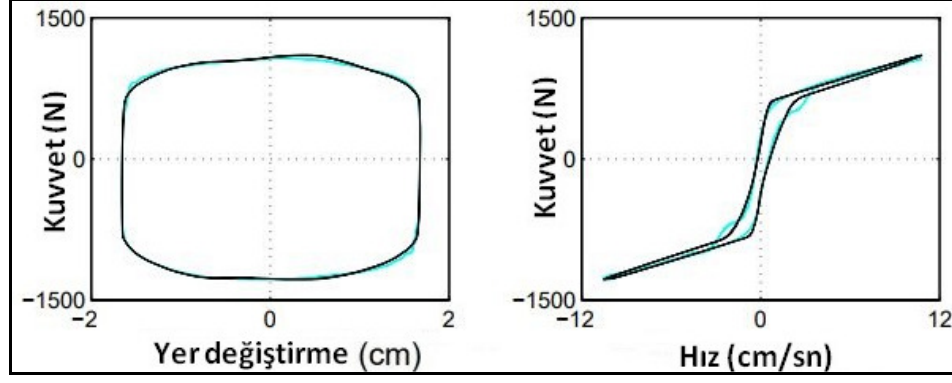
eşitlikleri ile gösterilir. Burada u ifadesi birinci dereceden bir filtre sayesinde,

$$\dot{u} = -\eta(u - V) \quad (4.9)$$

olarak hesaplanır. Burada V ifadesi MR sönümleyicinin sargılarına uygulanan gerilimdir.



Şekil 4. 12 Geliştirilmiş Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [45]



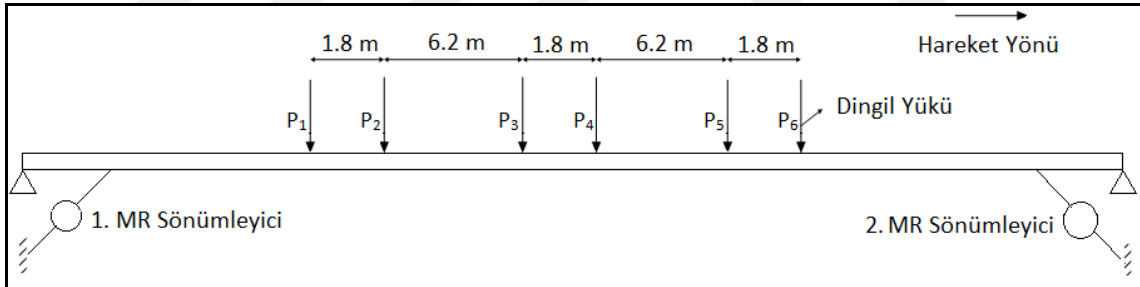
Şekil 4. 13 Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli ve deneysel sonuçların karşılaştırılması kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [45]

Şekil 4.12 ve 4.13'te görüldüğü gibi geliştirilmiş Bouc-Wen modeli MR sönümleyicinin hareketi, Bingham ve Bouc-Wen modeline kıyasla geliştirilmiş Bouc-Wen modelinden daha başarılı olmuştur. Diğer iki modelde de olan kuvvet-hız grafiğindeki hata oranı bu modelde diğerlerine göre daha azdır. Bu çalışmada da MR sönümleyiciyi modellemek için, deneysel sonuçlara en yakın sonucu veren geliştirilmiş Bouc-Wen modeli kullanılmıştır.

DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN MATEMATİKSEL MODELİ

5.1 Köprü Modeli

Şekil 5.1’de demiryolu köprüsü modelini göstermektedir. Köprü, sabit kesit, homojen ve basit mesnetli bir Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiştir. Köprünün altında iki adet ve simetrik olarak yerleştirilmiş Modifiye Bouc-Wen Modeli olarak modellenen MR sönümleyici bulunmaktadır. Buna ek olarak, kuvvetler raylı taşıtın akslarının eksenal kuvvetlerini olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.1 Hareketli yüke maruz kalan MR sönümleyici demiryolu köprüsü [61]

$$m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = \sum_{j=1}^6 \delta(x - vt) P_j + \sum_{j=1}^2 \delta(x = x_{dj}) F_{MRj} \quad (5.1)$$

Burada EI , m , c ve $w(x,t)$ sırasıyla köprünün rijitliği, uzunluk başına kütle, sönüm katsayısı ve köprünün x konumunda ve t zamanındaki düşey yer değiştirmesidir. Köprü parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Denklem 5.1’de görüldüğü üzere, denklemin sağ tarafı, Dirc-delta fonksiyonu ve MR sönümleyici kuvvetleri ile temsil edilen eksenal yüklerdir (P).

Çizilge 5.1. Demiryolu köprüsü parametreleri [17]

Young modülü (N/m ²)	210x10 ⁹
Alan atalet moment (m ⁴)	0.61
Birim uzunluk başına gelen kütle (kg/m)	18400
Köprünün uzunluğu (m)	42
Sönüm oranı	0.1
MR Damper Lokasyonu (m)	5,37
1.Aks kuvveti (N)	70000
2.Aks kuvveti (N)	75000
3.Aks kuvveti (N)	69000
4.Aks kuvveti (N)	80000
5.Aks kuvveti (N)	77000
6.Aks kuvveti (N)	72000

Dirac-delta fonksiyonu ise $\delta(x), x=0$, noktasındaki birim konsantre kuvettir. Dirac-delta fonksiyonu Denklem 5.2’de tanımlanır.

$$a < \xi < b \text{ için } \int_a^b \delta(x - vt)f(x)dx = f(\xi) \quad (5.2)$$

Enine giriş teorisi için, Galerkinin metodu $w(x,t)$ iki ayrı fonksiyon halinde yazılmıştır. Sınır koşullarını tamamlamak üzere x 'e bağlı bir sinus fonksiyonu $\left(\sin \frac{i\pi x}{L}\right)$ seçilmiştir.

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^N T(t) \sin \frac{i\pi x}{L} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5.3)$$

Denklem 5.3’teki deneme fonksiyonunu, Denklem 5.1’e uygulayıp bütün denklemlerde çoğaltılıp ve 0’dan L’ye integrale edildiğinde, Denklem 5.1’deki kısmi diferansiyel denklem, Denklem 5.4’teki adi diferansiyel denkleme dönüşür.

Denklem 5.3, Denklem 5.1’de uygulanıp, 0 dan L’ye integrale edildiğinde, Denklem 5.1’deki kısmi diferansiyel denklem Denklem 5.4’teki adi diferansiyel denklem halini alır.

$$m\ddot{T}_i(t) + c\dot{T}_i(t) + EI \left(\frac{i\pi}{L}\right)^4 T_i(t) = \sum_{j=1}^6 \frac{2P_j}{L} \sin\left(\frac{i\pi(vt - L_j)}{L}\right) + \sum_{j=1}^2 \frac{2F_{MRj}}{L} \sin\left(\frac{i\pi x_{dj}}{L}\right) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5.4)$$

Burada denklemin sağ tarafında, altısı raylı taşıtın dingilinden kaynaklı hareketli yükten (P_1, P_2, \dots, P_6) ve ikisi de MR sönümleyiciden olmak üzere sekiz adet kuvvet vardır. MR sönümleyici kuvvetleri köprünün altınada iki noktaya (x_{d1}, x_{d2}) yerleştirilmiştir.

Köprünün sönümü Rayleigh yapısal sönüm olarak modellenir ve bu da köprünün kütle, rijitlik ve doğal frekanslarına bağlıdır ve Denklem 5.5 ve 5.6’da gösterilmiştir. ω_i ve ω_j

basit mesnetli köprünün doğal frekanslarını temsil eder.

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (5.5)$$

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j}; a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.6)$$

Yukarıda belirtildiği gibi, MR sönümleyici, modifiye edilmiş Bouc-Wen modeli kullanılmıştır ve MR sönümleyici denklemleri, Denklem 5.7 –5.12’de verilmiştir.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} z - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (5.7)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [az + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (5.8)$$

Burada, k_1 akümülatör rijitliği, c_0 yüksek hızlardaki vizkos sönümlenme, c_1 düşük hızlardaki yuvarlanma kuvvetleri için vizkos sönümlenme, x_0 , k_1 yayının başlangıç yer değiştirmesi ve A , β , γ ve n ise MR sönümleyici sabitleridir. MR sönümleyici kuvveti Denklem 5.9’da hesaplanmıştır ve parameter değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir [12].

$$F_{MR} = az + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (5.9)$$

c_0 , c_1 ve α , akım i 'ye göre ifade edilen üçüncü dereceden polinomdur ve Denklem 5.10-5.12’de gösterilmiştir.

$$a(i) = 16566i^3 - 87071i^2 + 168326i + 15114 \quad (5.10)$$

$$c_0(i) = 437097i^3 - 1545407i^2 + 1641376i + 457741 \quad (5.11)$$

$$c_1(i) = -9363108i^3 + 5334183i^2 + 48788640i - 2791630 \quad (5.12)$$

Çizelge 5.2 MR sönümleyici modeli parametreleri [62]

A (m^{-1})	2769
β, γ (m^{-1})	647.46
K_0 (N/m)	137810
n	10
X_0 (m)	0.18
K_1 (N/m)	617.31

HAREKETLİ YÜKE MARUZ KALAN DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN KONTROLÜ

6.1 Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri, fiziksel bir yapıdan oluşurlar ve bir başka fiziksel sistemi değiştirmek, kontrol etmek ya da uyarlamak amacı ile uygulanır [64].

Teknolojinin gelişimiyle, kontrol sistemleri artık gündelik hayatın birçok alanına girmiştir. Hatta insan biyolojik olarak bile kontrol sistemine sahiptir. Örneğin, sıcak vücut sıcaklığımızdan fazla olan bir ortamda vücut sıcaklık dengesini korumak için terler ya da ışıklı ortamda göz bebeğinin küçülüp karanlık ortamda büyümesi buna örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca kontrol sistemlerinin kullanımı insanın yaşamını kolaylaştırıp, maliyetleri düşürüp ve güvenliğini arttırmaya olanak sağlarlar.

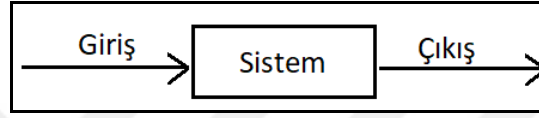
Kontrol sistemleri açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol olmak üzere iki gruba ayrılır. Açık çevrim kontrolde sistem çıkışı fiziksel bir bağlantı ile belirlenmez.

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise fiziksel sistemden elde edilen çıkış bilgileri kullanılır ve denetleyici çıkıştaki hataya bağlı olarak girişi düzeltir.

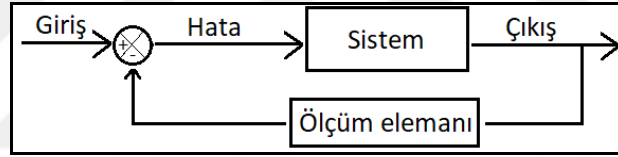
Ayrıca kapalı çevrim kontrol sistemlerinde, bir karşılaştırıcıya veya bir kontrolcüye gereksinim vardır. Bazı durumda kontrol sistemle işleyiş biçimlerine göre ikiye ayrılabilir. Bunlardan ilki, ortamdan aldığı bilgilere göre kendini istenen duruma Buna düzenleyici sistemler (regulatory) denir. Diğer ise izleyici kontrol olarak adlandırılır (tracking control). İzleyici kontrolde, kontrol zamanın bir işlevi olarak yapılır. Kontrol sistemlerinde asıl sorun, sistem çıkış bilgileri, cevapları ya da fiziksel ortamdaki hata işaretleridir. Çünkü, kapalı-devre kontrol sistemlerinde bu bilgiler sistemin işleyişinde

çok büyük rol oynarlar ve sistem bu bilgilere göre yönlendirilir [65].

Açık çevrime örnek olarak, Oda'da belli bir sıcaklık değerinde sürekli çalışan ısıtıcı gösterilebilir. Isıtıcı bu durumda belli bir komuta göre çalışmaz ve referans değer ve ölçüm elemanı olmadığı için karşılaştırma yapamaz. Kapalı çevrim için aynı örneği verilecek olursa, bir oda için termostat ile bağlantılı ısıtıcı ele alınabilir. Bu durumda termostat ölçüm elemanı/sensör görevi görür. Oda sıcaklığını ölçer ve olması istenen sıcaklık değeri ile yani referans değeri ile karşılaştırıp ısıtıcıya geri bildirimde bulunur. Anlık oda sıcaklığı ile olması istenilen sıcaklık aynı duruma geldiğinde ısıtıcı termostat tarafından durdurulur. Açık çevrim ve kapalı çevrim yapısı Şekil 6.1 ve 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 1 Açık çevrimli bir sistem



Şekil 6. 2 Kapalı çevrimli bir sistem

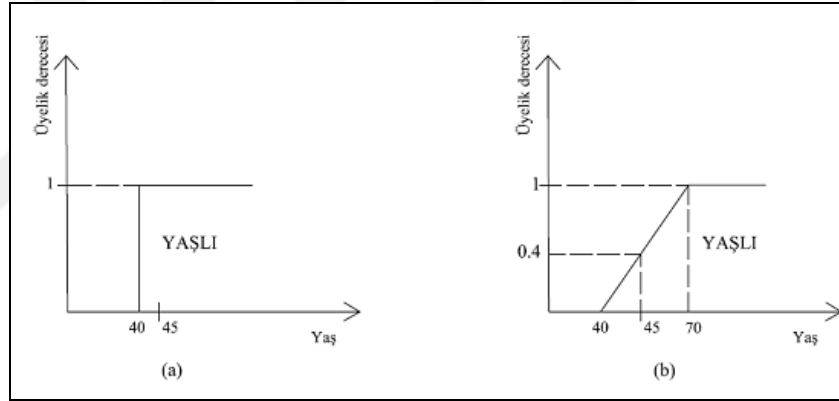
6.2 Bulanık Mantık

Bulanık mantık olgusu ilk olarak Zadeh tarafından [66] "Bulanık Kümeler" isimli makalede ortaya atılmıştır. Bulanık mantıklı kontrolör (BMK) ile ilgili ilk çalışmalar ise Mamadani ve arkadaşları tarafından, Zadeh'in "Bulanık kümeler teorisine dayanan dilsel yaklaşım ve sistem analizi" adlı makalesi sonrasında yapılmıştır. Daha sonra bu konudaki çalışmalar günümüze kadar gelmiştir [67].

Endüstriyel bir süreç için sistemin güvenilir ve karalı olması, kolay anlaşılması, denetlenebilmesi ve sistem performansının istenen seviyede olması istenir. Bunun için kontrol edilecek sistemin yapısını ve dinamiğini çok iyi bilmek gerekir. Sistem değişkenleri matematiksel modellenecek kadar net bilinmeyebilir veya bu değişkenler zaman içinde değişebilir. Bazı sistemlerde modelleme doğru yapılsa bile modelin kontrolcü tasarımı karmaşık olabilir ve bu yüzden bazı kontrol algoritmaları belirsiz,

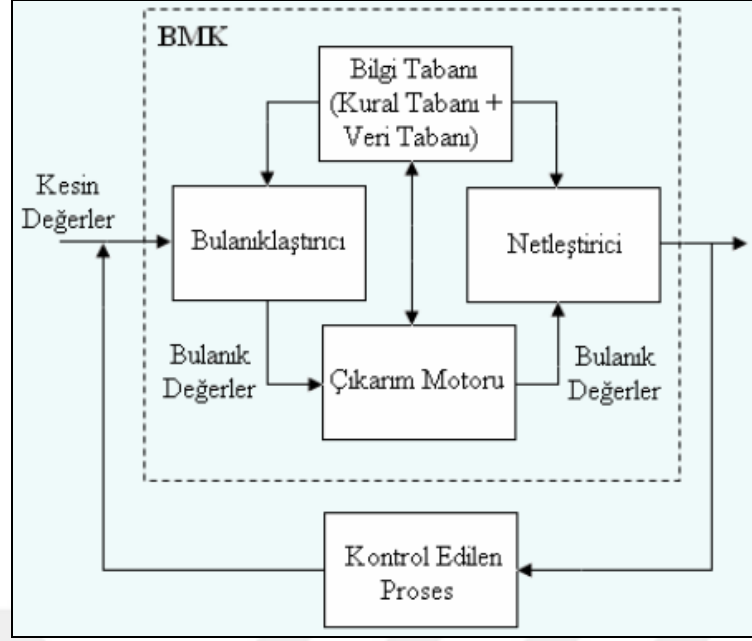
doğru olmayan, iyi tanımlanmamış, zamanla değişen ve karmaşık sistemlere uygulanmayabilir [68].

Gündelik hayatımızda yaşadığımız olaylar çoğu zaman kesinlik ifade etmez ve yaklaşık olarak hesaplanır. Bu sebeple bulanık kontrol sistemleri, uzman kişinin görüşlerine dayanan dilsel bir kontrol stratejisidir. Uzman kişi tarafından oluşturulan kural tabanına göre çalışır ve üyelik fonksiyonları kullanılarak giriş ve çıkış uzayına ait dilsel değişimler önceden tanımlanır. İyi bir bulanık mantıklı kontrol tasarlayabilmek için giriş-çıkış ölçekleme faktörlerinin seçimi, kural tabanının olusturulması, üyelik fonksiyonlarının tasarımı, kuralların icra edilmesi oldukça önemlidir. Klasik mantık sistemler, net bir doğru ya da net bir yanlış ifade eder ancak bulanık mantıklı sistemler, çok doğru, az doğru, çok hızlı, az hızlı, çok yavaş, oldukça yaşlı vb. gibi önermelerle de çalışabilir. Bu durum Şekil 6.3'te basitçe gösterilmiştir. Şekil 6.3 (a)'da 40 yaş ve üzeri kesin yaşlı sınıfına girerken, Şekil 6.3 (b)'de ise bu yaş, kısmen yaşlı olarak kabul edilmektedir.



Şekil 6. 3 (a) Kesin Küme (b) Bulanık Küme [48]

Ölçekleme faktörü sistemin performansına doğrudan etki ettiği için tasarım parametrelerinin en önemlisidir. Genelde kural tabanlarının yapılar birbirlerine benzerlik gösterir ve sistemin cevabı üzerindeki etkileri büyük ölçekte kısıtlıdır. Üyelik fonksiyonlarının şekilleri hesaplama kolaylığı sağladığı için üçgensel biçimde seçilir.

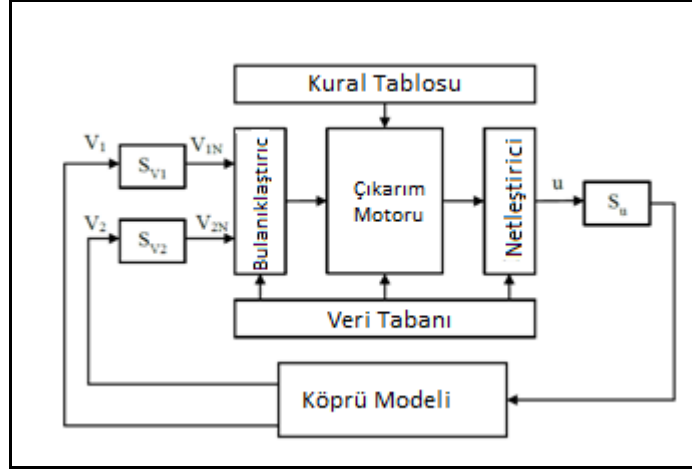


Şekil 6.4 BMK sisteminin genel yapısı [63]

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi BMK yapısı dört ana kısımdan oluşur. Bunlar; bulanıklaştırıcı, bilgi tabanı, çıkarım motoru ve netleştiricidir. Bulanıklaştırıcı sayesinde, gerçek fiziksel değerleri, bulanıklaştırıcı, bu değerlere $[0, 1]$ arası bulanık değerler atanarak bulanık uzaya taşınır. Bilgi tabanı ise uzman kişinin geçmiş bilgi ve tecrübesine dayanarak hazırladığı kurallardır. Çıkarım motoru ile bulanık giriş değerleri kural tabanına göre yorumlanır. BMK'ün çıkışında elde edilen bulanık değerler, fiziksel dünyada kullanılacak forma netleştirici getirir.

6.3 Demiryolu Köprüsünün Bulanık Mantıklı Kontrol Algoritması Yardımıyla Yarı Aktif Kontrolü

Titreşim azaltma problemlerinde sıklıkla BMK (Bulanık mantık tabanlı kontrolörler) kullanılır. Bu yazıda klasik bulanık mantık denetleyicisi, iki girişli bir çıkışlı BMK yapısı temel alınarak kullanılmıştır. Kullanılan kontrolörün genel yapısı Şekil 6.5'te gösterilmektedir.



Şekil 6.5 İki giriş bir çıkışlı BMK algoritması

Bulanık mantık denetleyicisinin yapısı iki giriş ve bir çıkışa sahiptir. Girişler sırasıyla köprü modelinin orta noktasının hızı olarak tanımlanan " V_1 "; ve MR damperin üst uç noktasının hızı olarak tanımlanan " V_2 " dir. Girişleri ve çıktıları ima eden dilsel değişkenler NB NM NS ZO PS PM PB olarak sınıflandırılır. Girişler ve çıkışlar $[-1, 1]$ aralığında normalleştirilir ve çıkış $[0, 1]$ aralığında normalleştirilir ve Şekil 6.6'da gösterilir. Çıktı değerleri olarak kullanılan dilsel değerler şu şekildedir: ZO, VS, S, SM, M, B, VB.

Değişkenler S_{V1} , S_{V2} ve S_u katsayısı ile ölçeklendirilir. Bulanık kontrol kuralı Denklem 6.1'de verilmiştir.

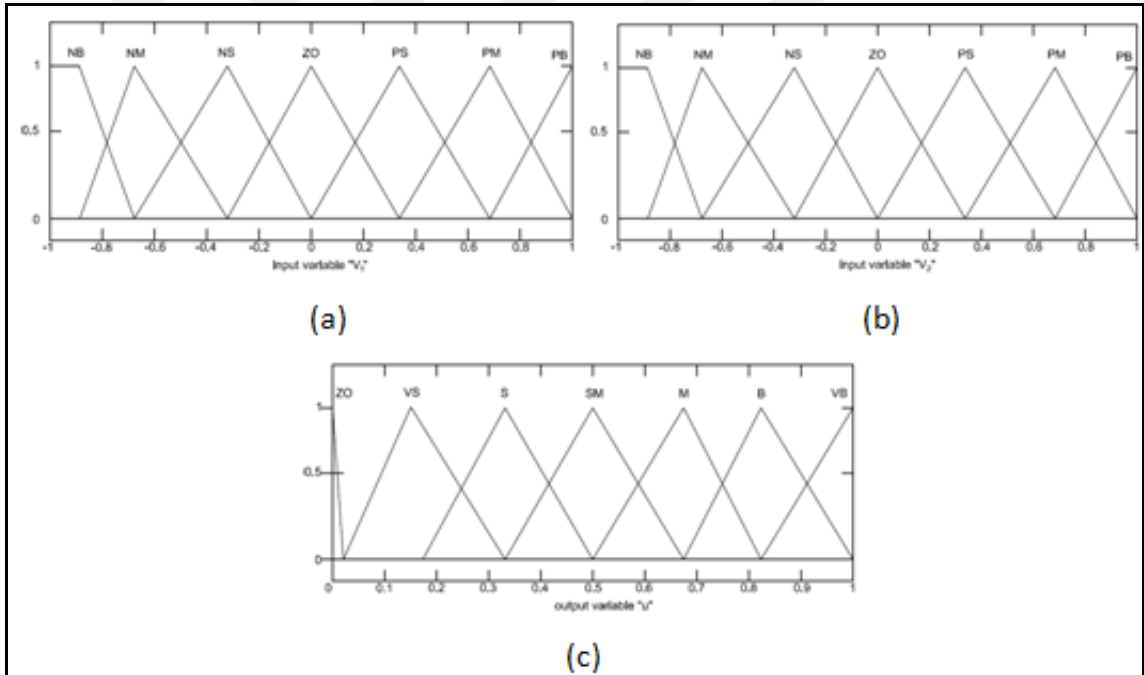
$$\text{Eğer } e=E_i \text{ ve } de=dE_j \text{ ise } V=V_{(i,j)} \quad (6.1)$$

Bu kurallar, Çizelge 6.1'de gösterilen bir kural tabanı arama tablosunda yazılmıştır. Kural tabanı yapısı Mamdani türüdür.

Bulanık kümeleri tanımlamak için kullanılan dilsel etiketler 'Negatif Büyük' (NB), 'Negatif Orta' (NM) 'Negatif Küçük' (NS), 'Sıfır' (ZO), 'Pozitif Küçük' (PS), 'Poizitif Orta (PM) Çok küçük (VS), Küçük (S), Küçük-Orta (SM), Orta (M), Büyük (B), Çok Büyük (VB). Karar kuralları kümesini Çizelge 6.1'de gösterildiği gibi atamak mümkündür. Bu kurallar, kontrol stratejisini tanımlayan girdi/çıkı ilişkilerini içermektedir. Her bir kontrol girişi, yedi bulanık küme olduğundan, 49 bulanık kural vardır.

Çizilge 6.1 Bulanık Mantık Kontrolcü Kural tablosu

V_1/V_2	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	SM	S	VS	ZO	VS	S	SM
NM	M	SM	VS	ZO	VS	SM	M
NS	B	M	S	ZO	S	M	B
ZO	VB	B	SM	ZO	SM	B	VB
PS	B	M	S	ZO	S	M	B
PM	M	SM	VS	ZO	VS	SM	M
PB	SM	S	VS	ZO	VS	S	SM



Şekil 6.6 Giriş V_1 (a), V_2 (b) ve çıkış u (c) için üyelik fonksiyonları girişleri

6.4 Simulasyonlar

Denklem 5.4'e göre, köprünün ilk 5 modu göz önüne alınmıştır ve köprünün cevaplarının yeterli olduğu görülmüştür. MR sönümleyici modeli ve bulanık mantıklı köprü denklemleri MATLAB-Simulink ortamında ode45 çözücü ile çözdürülmüştür. Raylı taşıt hızları 40km/sa, 60 km/sa ve 80 km/sa için çözümler yapılmıştır. Demiryolu parametresi olarak Çizlege 6.2'de ABB raylı taşıt parametreleri kullanılmıştır.

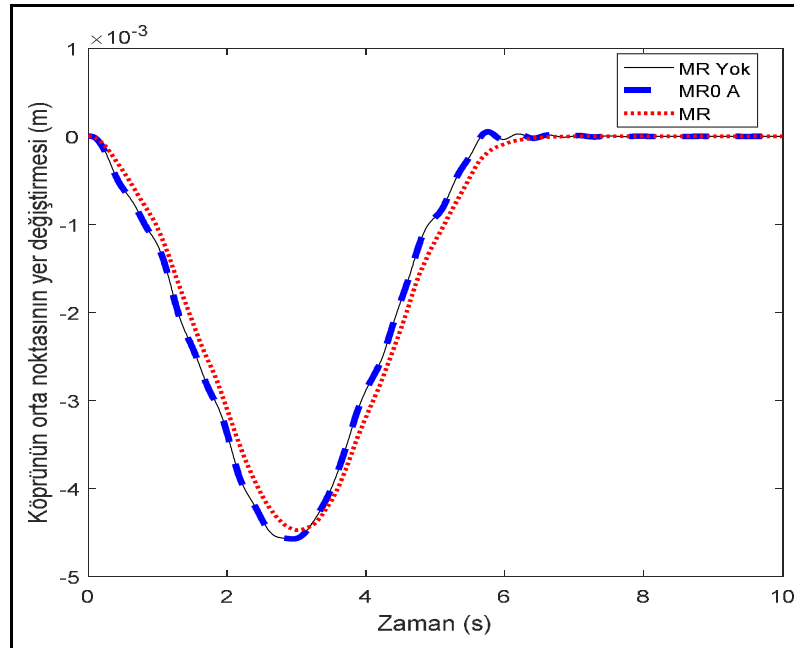
Çizlege 6.2 ABB raylı taşıt parametreleri [63]

Uzunluk (m)	23.2
Genişlik (m)	2.65
Yük kapasitesi(yolcu sayısı)	257
Maksimum tasarım dingil yükü (kN)	80
Tekerlek çapı (m)	0.68-0.6
Tekerlek kalınlığı (m)	0.125
Maksimum hız (km/h)	80

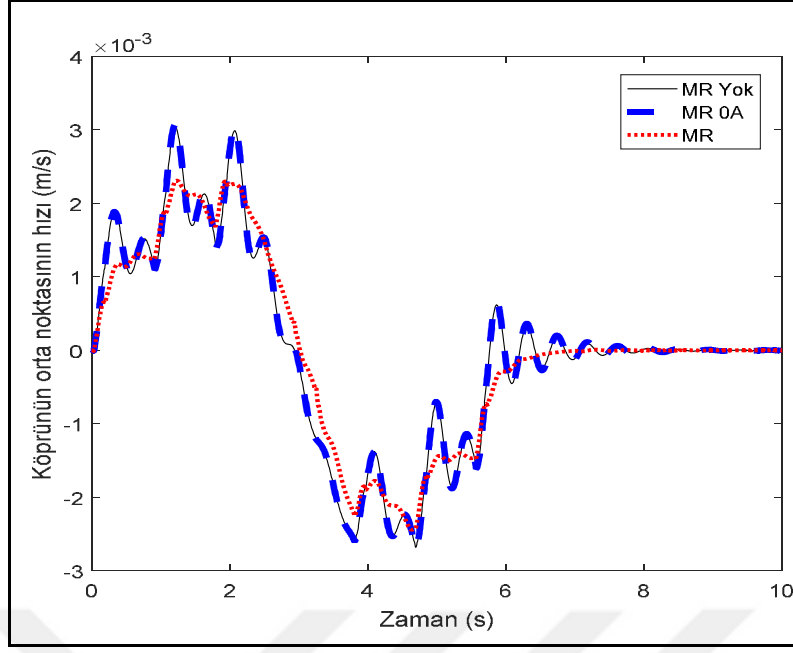
6.4.1 40 km/sa Araç Hızı İçin Simulasyonlar

Bu senaryo için raylı taşıtın hızı 40 km/h'de sabit olduğu varsayılmıştır. Kontrolsüz MR sönümleyici için elektrik akımı 0.05 Amper'de sabitlenmiştir.

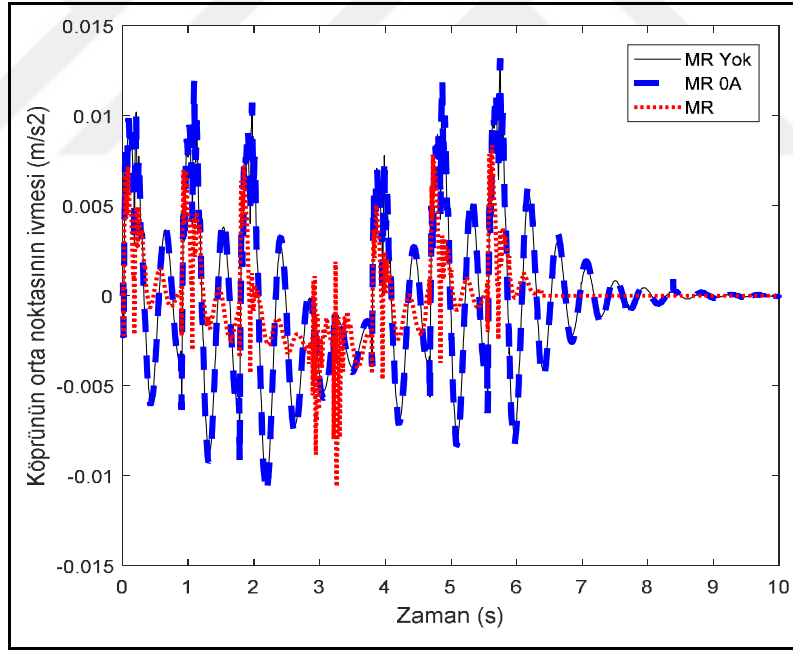
Şekil 6.7-6.9'da, demiryolu köprüsünün dinamik cevapları gösterilmiştir. Düz çizgiler ve kesik çizgiler sırasıyla kontrolsüz ve kontrollü cevaplardır.



Şekil 6.7 Köprünün orta noktasının yer değiştirmesi

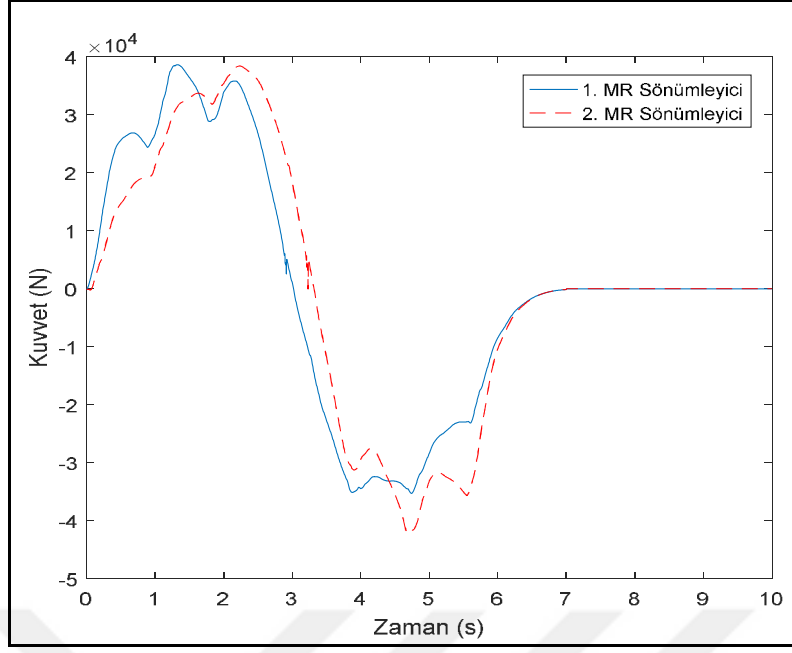


Şekil 6.8 Köprünün orta noktasının hızı

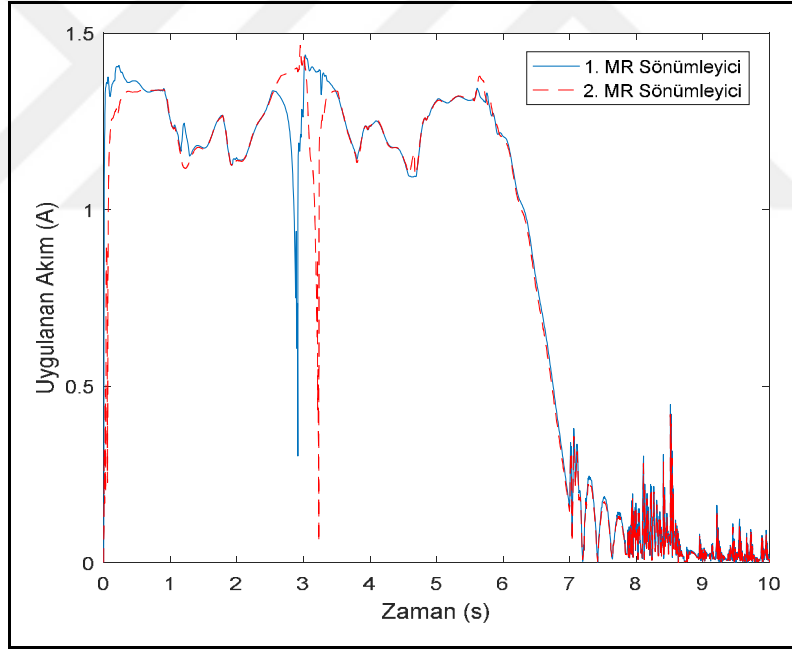


Şekil 6.9 Köprünün orta noktasının ivmesi

Şekil 6.10-6.11'de, MR sönümleyicinin kuvvetleri ve elektrik akımı gösterilmiştir. Düz çizgiler ve kesik çizgiler sırasıyla 1. ve 2. MR sönümleyiciye ait kuvvetleri ve uygulanan akımları göstermektedir.

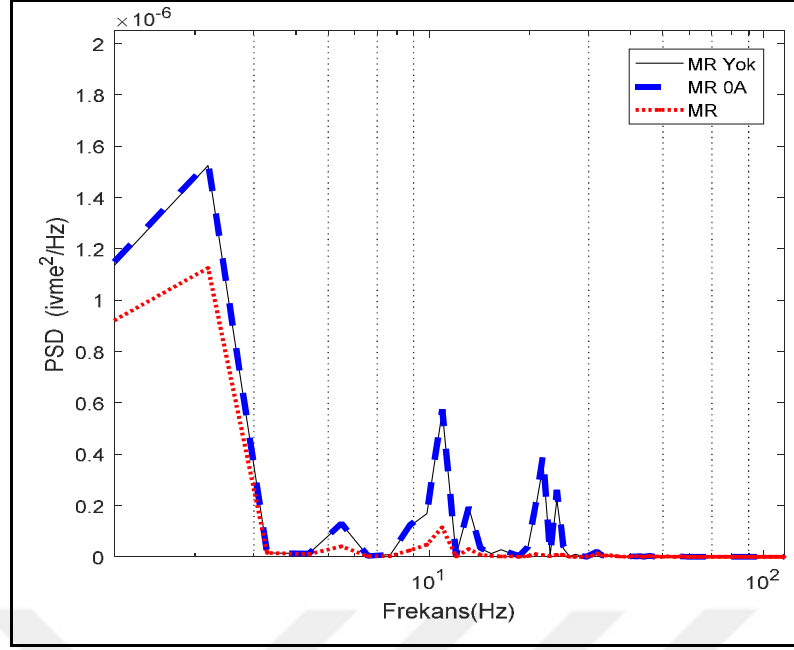


Şekil 6.10 MR sönümleyici kuvvetleri



Şekil 6.11 MR sönümleyicilere uygulanan akım

Köprünün düşey yöndeki ivmelenmesinin güç tayf yoğunluğu (power spectral density), Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

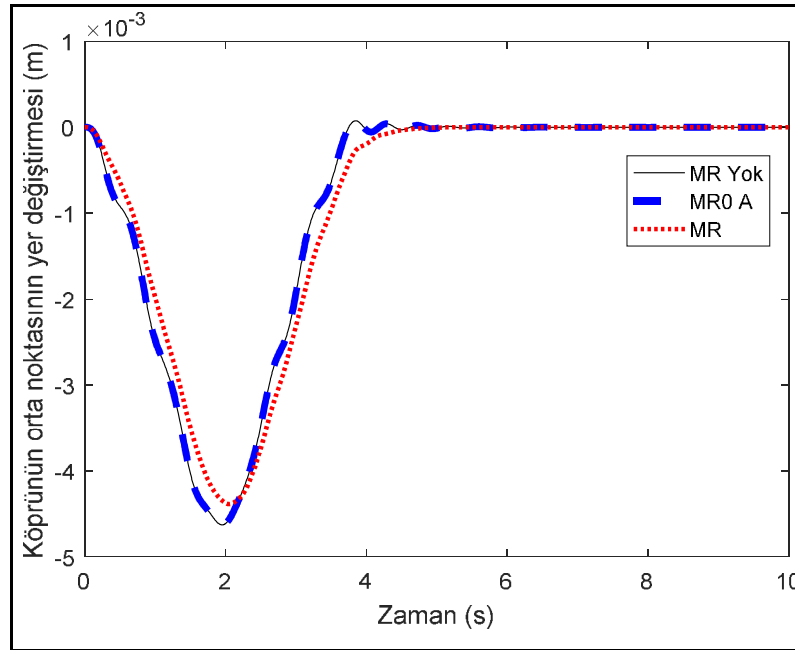


Şekil 6.12 Köprü ivme verisinin güç tayf yoğunluğu (PSD)

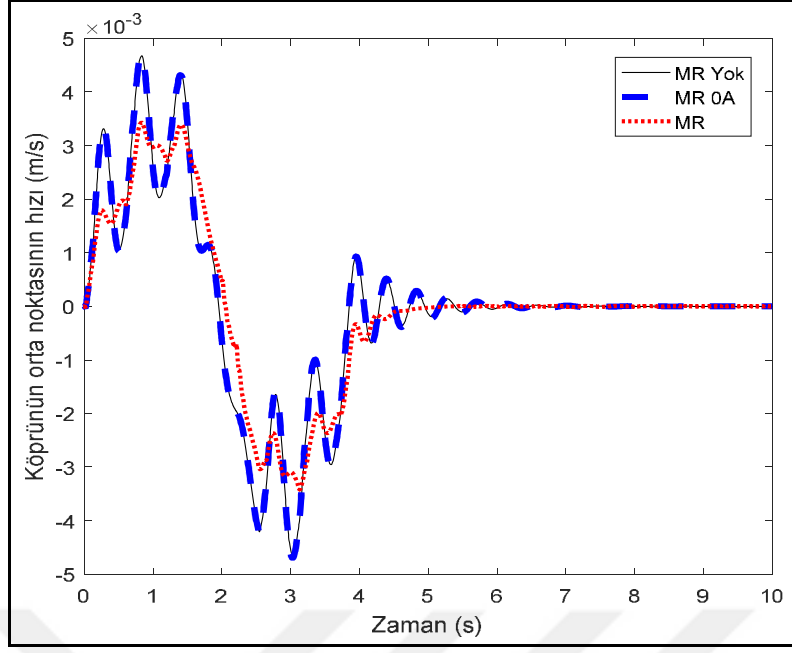
6.4.2 60 km/sa Araç Hızı İçin Simulasyonlar

Bu senaryo için raylı taşıtın hızı 60 km/sa'da sabit olduğu varsayılmıştır. Kontrolsüz MR sönümleyici için elektrik akımı 0.05 Amper'de sabitlenmiştir.

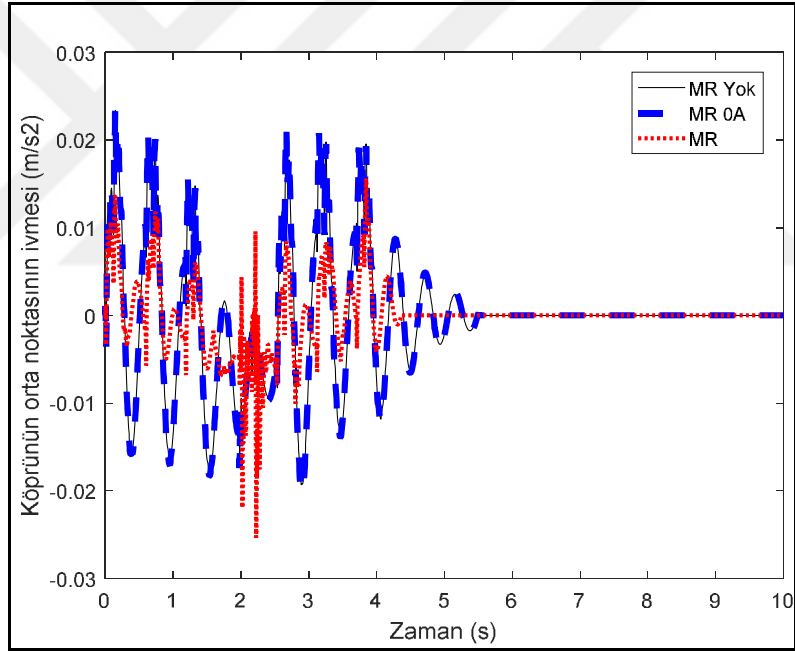
Şekil 6.13-6.15'te, demiryolu köprüsünün dinamik cevapları gösterilmiştir. Düz çizgiler ve kesik çizgiler sırasıyla kontrolsüz ve kontrollü cevaplardır.



Şekil 6.13. Köprü'nün orta noktasının yer değişimi

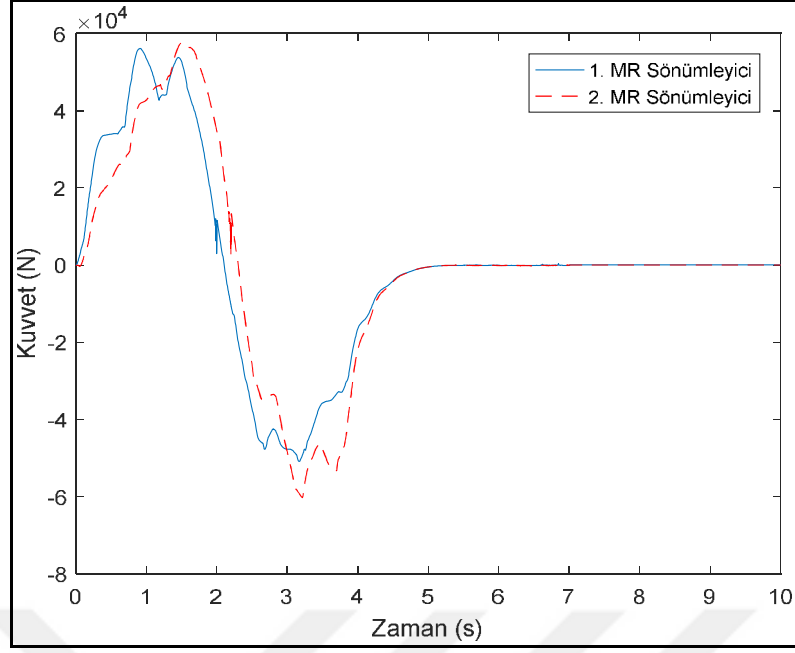


Şekil 6.14 Köprü'nün orta noktasının hızı

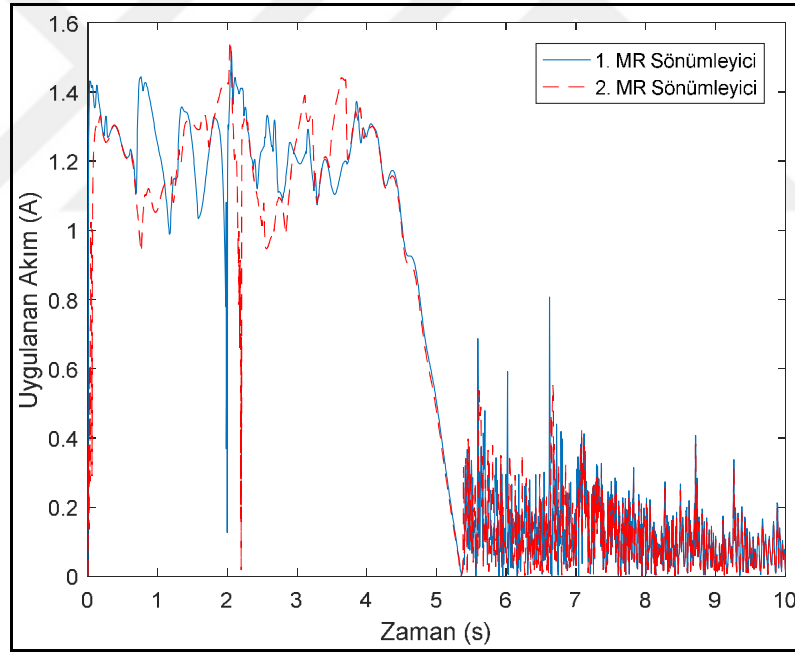


Şekil.6.15 Köprü'nün orta noktasının ivmesi

MR sönümleyici kuvvetleri ve MR sönümleyicilere uygulanan akım Şekil 6.16 ve 6.17'de gösterilmiştir.

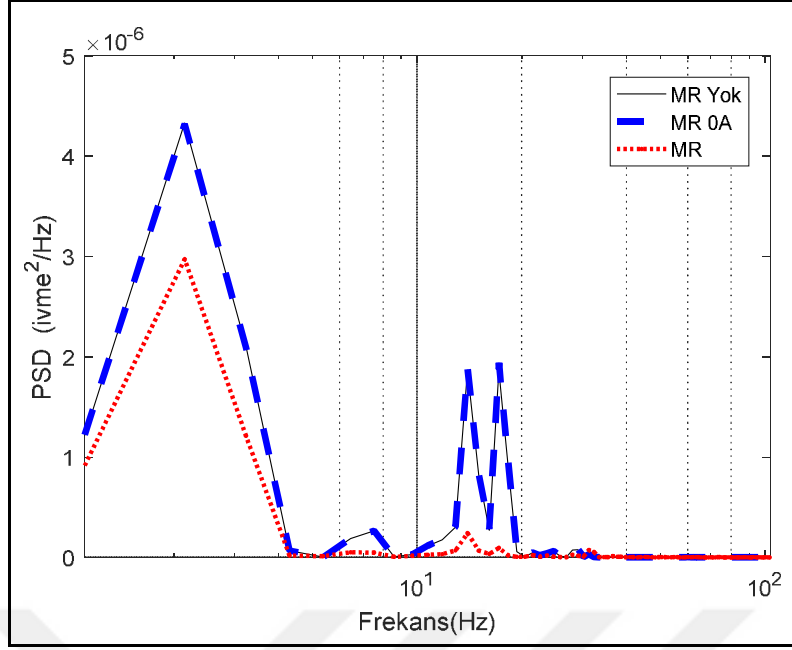


Şekil 6.16 MR sönümleyici kuvvetleri



Şekil 6.17 MR sönümleyicilere uygulanan akım

Köprü'nün düşey yöndeki ivmelenmesinin güç tayf yoğunluğu (power spectral density), Şekil 6.18'de gösterilmiştir.

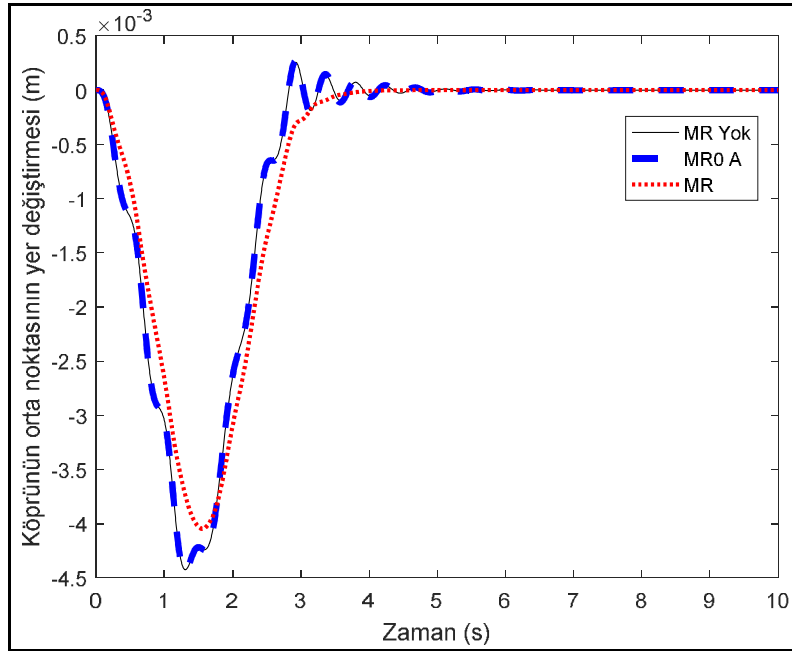


Şekil 6.18 Köprü ivme verisinin güç tayf yoğunluğu (PSD)

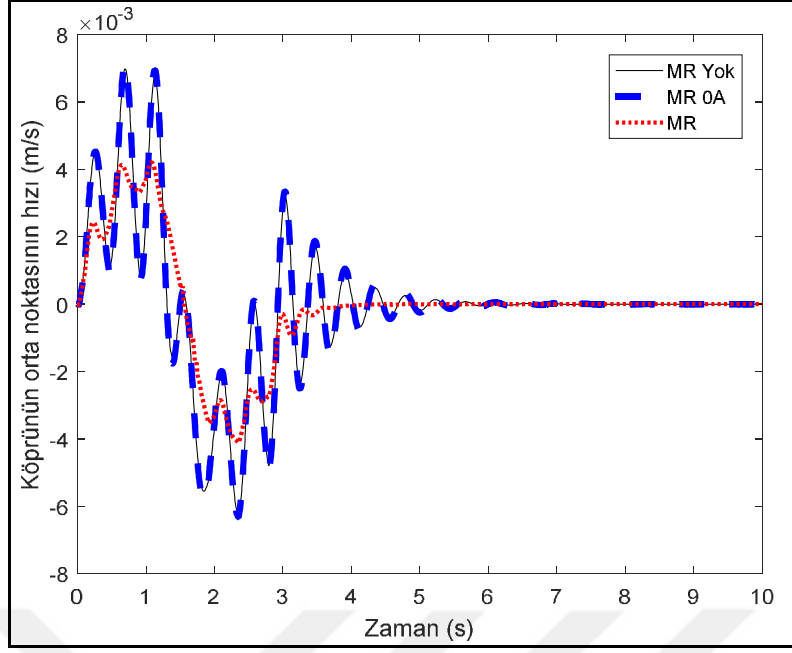
6.4.3 80 km/sa Araç Hızı İçin Simulasyonlar

Bu senaryo için raylı taşıtın hızı 80 km/sa'da sabit olduğu varsayılmıştır. Kontrolsüz MR sönümleyici için elektrik akımı 0.05 Amper'de sabitlenmiştir.

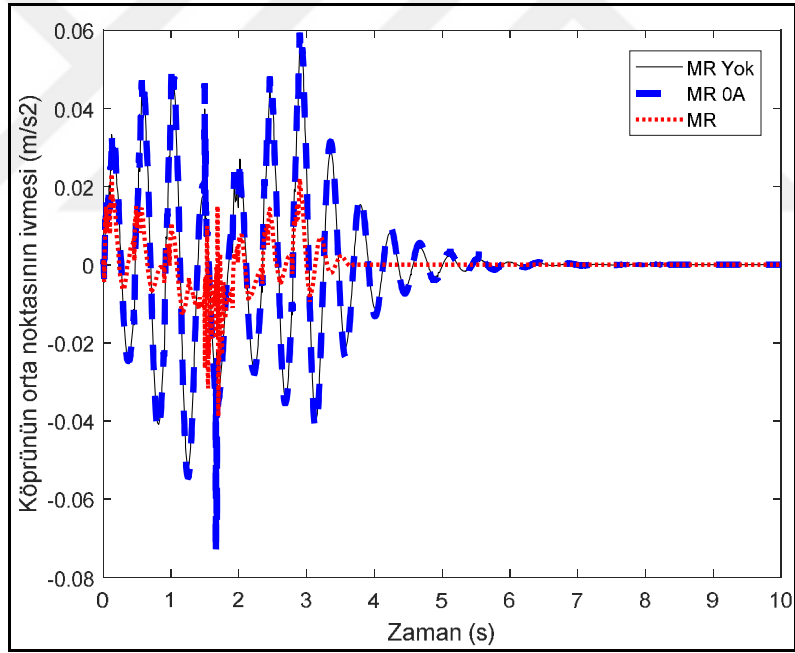
Şekil 6.19-6.21'de, demiryolu köprüsünün dinamik cevapları gösterilmiştir. Düz çizgiler ve kesik çizgiler sırasıyla kontrolsüz ve kontrollü cevaplardır.



Şekil.6.19 Köprü'nün orta noktasının yer değışirmesi

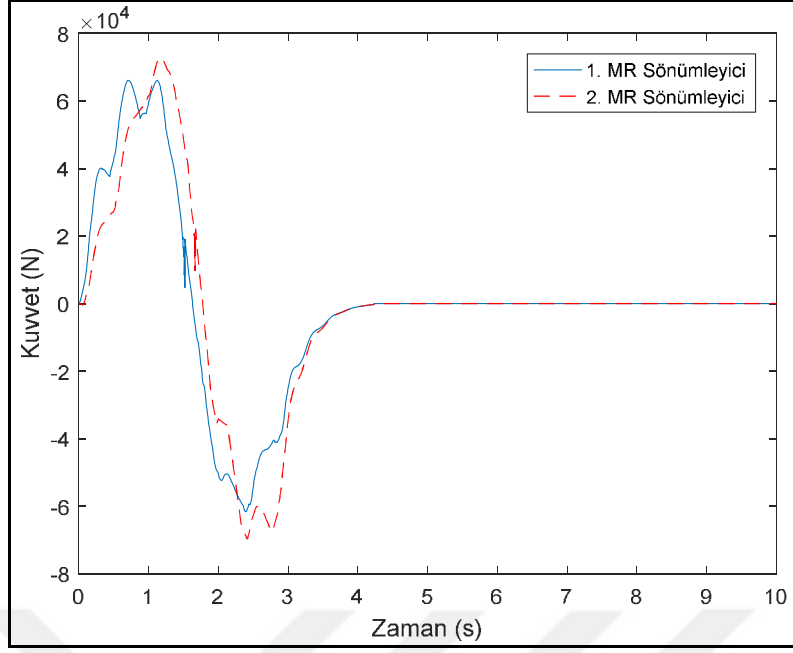


Şekil.6.20 Köprü'nün orta noktasının hızı

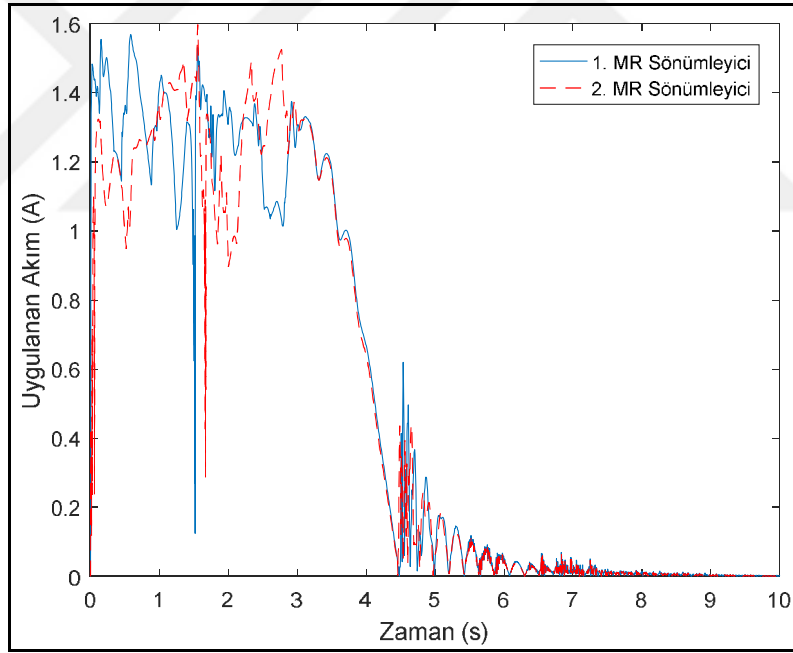


Şekil.6.21 Köprü'nün orta noktasının ivmesi

MR sönümleyici kuvvetleri ve MR sönümleyicilere uygulanan akım Şekil 6.22 ve 6.23'te gösterilmiştir.

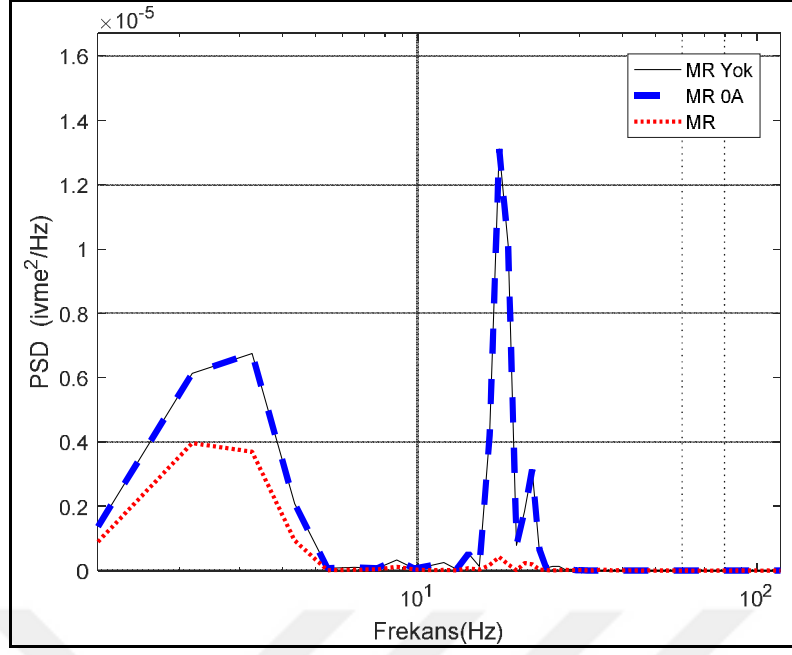


Şekil 6.22 MR sönümleyici kuvvetleri



Şekil 6.23 MR sönümleyicilere uygulanan akım

Köprü'nün düşey yöndeki ivmelenmesinin güç tayf yoğunluğu (power spectral density), Şekil 6.24'de gösterilmiştir.



Şekil 6.24 Köprü ivme verisinin güç tayf yoğunluğu (PSD)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, parametreleri bilinen gerçek bir demiryolu köprüsünün hareketli yük altında titreşimleri analiz edilmiş ve bu titreşimler bulanık mantık kontrol algoritması tabanlı çalışan Manyeto-Reolojik (MR) sönümleyici ile bastırılmıştır.

Çalışmada parametreleri bilinen, tek kirişli (single-span) gerçek bir demiryolu köprüsü seçilmiş ve buna ait yapısal parametreler kullanılmıştır. Dinamik titreşim analizlerini gerçekleştirmek için köprü, Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak basit mesnetli, homojen ve enine kesitli olarak modellenmiştir. Sürekli bir sistem olarak matematik modeli oluşturulan köprü Petrov-Galerkin yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. Köprünün uçlarına simetrik ve çapraz pozisyonda iki adet MR sönümleyici yerleştirildiği düşünülerek titreşimlerin bastırılması hedeflenmiştir. MR sönümleyiciler ise bulanık mantıklı kontrol algoritması yardımıyla simülasyon ortamında kontrol edilmiştir.

Yapılan titreşim analizlerinde köprünün ilk 5 modu incelenmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Ayrıca raylı taşıttan köprüye etkiyen kuvvetler 6 aks yükü olarak ele alınmıştır ve dingil yükleri 69 kN ile maksimum tasarım aks yükü olan 80 kN arasında dağınık olarak ele alınmıştır. Raylı taşıttın hızları 40 km/sa, 60 km/sa ve 80km/sa için senaryolar oluşturulmuştur ve demiryolu köprüsünün doğal frekansları sırasıyla 2.29, 9.17, 20.63, 36.69, 57.32 Hz olarak bulunmuştur.

Yapılan bu analizler sonucunda hareketli yüke maruz kalan köprü üzerinde yer değiştirme, hız ve ivme değerleri kontrolörlü ve kontrolörsüz olarak hem zaman hem de frekans alanında incelenmiştir. MR sönümleyici doğrusal olmadığı için frekans cevabı yerine güç tayf yoğunluğu grafiği verilmiştir. Her iki alanda da elde edilen cevaplar,

uygulanan yarı aktif kontrolün performansını ortaya koymuştur.

Kontrolsüz duruma kıyasla, kontrollü durumda köprü cevabının özellikle hız ve ivme değerleri için maksimum değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca kontrollü köprü sistemindeki oturma cevabı, kontrolsüz sistemden daha iyidir. Bulanık mantıklı kontrolcü ile çalışan MR sönümleyiciler, bütün frekanslarda köprünün ivmelenmesinin büyüklüğünü bastırmıştır. Hız ve MR sönümleyici kuvvet profillerinin benzer olduğu görülmüştür.

Ancak, bulanık mantıkla kontrol edilen MR sönümleyicinin konum ve ivme arasındaki ödünleşmenin yüksek olmasından dolayı bunlardan birinin performansını iyileştirirken diğerinin performansı kötüleşmektedir. Bu sebeple kontrolcü tasarlanırken optimal bir değer seçmeye dikkat edilmelidir.

Demiryolu köprü yapısının yerdeğiştirme ve ivmelerinin azaltılması ile köprünün ömrü uzatılabileceği gibi, demiryolu araçları ve içinde seyahat eden insanların üzerindeki titreşimlerin olumsuz etkilerinin de azaltılması sağlanabilir. Bu çalışmada kullanılan yöntemin simülasyon ortamında üstün performans sergilediği ve bu amaçlar için uygun sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.

Sonuç olarak, yarı aktif sönümleyiciler kontrol algoritması kullanıldığı takdirde titreşimlerin azaltılmasında aktif kontrolcüler kadar etkili olmasada onlara yakın derecede performans göstermektedir ve aktif kontrolcülere kıyasla daha düşük düzeyde enerjiye ihtiyaç duyup ve daha düşük maliyetlidir. Gelecekte gelişen kontrol yöntemleri ile beraber, yarı aktif sönümleyicilerin performansının aktif sönümleyicilere daha da yaklaşılacağı öngörülmektedir.

Gelecekteki çalışmalar için Bulanık Mantık Kontrolör performansı, aşınmadan kaynaklanan ray pürüzlülüğü dikkate alınarak araştırılabilir. Bu şekilde, denetleyicinin performansını artırmak için denetleyicinin giriş ve çıkış parametreleri için uyarlanabilir yöntemler geliştirilebilir. Ayrıca, gerçek köprü sistemlerine uygulanabilir farklı kontrol algoritmaları da karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sevim, R., (2007).İstanbul’da Kent İçi Raylı Sistemler Ve Üstyapı Hesapları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Özalp, O., (2004).Kent içi Raylı Sistemlerin Üstyapısı ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Arlı, V., (2009).Demiryolu Titreşimlerinin Model Hat Üzerinde Çok Yönlü Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Yalçın, S., (2006). Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Senalp, A. D., Arikoglu, A., Ozkol, I. ve Dogan, V., (2010). Dynamic response of a finite length Euler-Bernoulli beam on linear and nonlinear viscoelastic foundations to a concentrated moving force”, Journal of Mechanical Science and Technology, 24:1957-1961.
- [6] Ulu, A., (2016). Hareketli Yük Etkisi Altındaki Demiryolu Üstyapısının Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Björklund, L., (2004). Dynamic Analysis of a Railway Bridge subjected to High Speed Trains, Yüksek Lisans Tezi, Royal Institute of Technology, İsveç.
- [8] Michas, G., (2012). Slab Track Systems for High-Speed Railways, Yüksek Lisans Tezi, Royal Institute of Technology Department of Transport Science Division of Highway and Railway Engineering, Stockholm.
- [9] Esen, İ., (2009).Hareketli Yükler Altındaki Köprülü Kren Kirişlerinin Dinamik (Mukavemet) Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] G. Catania ve S. Sorrentino., (2011). Dynamic analysis of railway bridges by means of the spectral method, Civil engineering Topics, Proceeding of the 29th IMAC Conference on Structural Dynamics, University of Bologna, Italy: pp21-29.
- [11] H. Yang, Z. Chen, S. Li, H. Zhang ve J. Fan., (2015). An integrated coupling element for vehicle-rail-bridge interaction system with a non-uniform continuous bridge, Acta Mech. Solida Sin., 28 313–330, Doi:10.1016/ S0894-9166(15)30018-5.

- [12] Luu M, Martinez-Rodrigo MD, Zabel V, Könke C., (2014). Semi-active magnetorheological dampers for reducing response of high-speed railway bridges. *Control Engineering Practice*. 32:147–160.
- [13] Pisal, A.Y., Jangid., (2016). Dynamic response of structure with tuned mass friction damper, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 8(4):363–377.
- [14] Fryba, L., (1999). *Vibration of solids and structures under moving loads*, Third Edition, Thomas Telford Ltd, Prague, Czech Republic.
- [15] Esveld, C., (1989). *Modern Railway Track*, First Edition, MRT-Productions, Germany.
- [16] Zhai, W. ve Cai, Z., (1997). “Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track”, *Computers and Structures*, 63(5): 987-997.
- [17] Radeström, S., (2017) “Application of fluid viscous dampers to mitigate vibrations of high-speed railway bridges”, *International Journal of Rail Transportation*, 5(1):47-62.
- [18] Lee, H. P., (1998). “Dynamic Response of a Timoshenko Beam on a Winkler Foundation Subjected to Moving Mass”, 55(3): 203-215.
- [19] Kargarnovin, M. H. ve Younesian, D., (2004). “Dynamics of Timoshenko beams on Pasternak foundation under moving load”, 31:713-723.
- [20] Erkul, C., (2002). *Demiryolunun Tarihsel Gelişimi ve Demiryolu Üstyapısı*, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi, İstanbul.
- [21] Erel, A., (2005). *Demiryolu Üstyapısı*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Ders Notu, İstanbul
- [22] Battini, J.M., (2004), , Royal Institute of Technology, *Lecture notes in Structural Dynamics*, Stockholm.
- [23] Cen, (2002), *Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges*, prEN 1991-2:2002 (E).
- [24] Clough, R.W., and Penzien, J., (1993), *Dynamics of Structures*, 2nd ed., Singapore: McGraw-Hill Book Co., ISBN 0-07-113241-4.
- [25] European Rail Research Institute, (2000), *Rail Bridges for Speeds > 200 km/sa– Final Report*, D214FM997691ERPA.DOC/01.
- [26] Karoumi, R., (1998), *Response of Cable-Stayed and Suspension Bridges to Moving Vehicles – Analysis methods and practical modelling techniques*, Doktora Tezi, Royal Institute of Technology, Stockholm, ISSN 1103-4270.
- [27] Union Internationale Des Chemins De Fer, (2003), *UIC Code – Design requirements for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track, bridge and in particular, speed*.

- [28] Broquet, C., Bailey, S.F, Fafard, M. and Brühwiler, E., (2004), Dynamic Behaviour of Deck Slabs of Concrete Road Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 9(2):2-137.
- [29] Mackertich, S., (1992). "Response of a beam to a moving mass", *Journal of Acoustical Society of America*, 92(3):1766-1769.
- [30] Esmailzadeh, E., ve Ghorashi, M., (1997). "Vibration analysis of a Timoshenko beam subjected to a travelling mass", *Journal of Sound and Vibration*, 199(4):615-628.
- [31] Hügül, S. , (2005).Vibration Analysis Of Systems Subjected To Moving Loads By Using The Finite Element Method, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [32] Michaltsos, G., Sophianopoulos, D., ve Kounadis, A. N., (1996). "The effect of a moving mass and other parameters on the dynamic response of a simply supported beam" *Journal of Sound and Vibration* 191(3):357-362.
- [33] Lee, H. P., (1996). "Dynamic response of a beam with a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, 191(2):289-294.
- [34] Lee, H. P., (1995). "On the dynamic behavior of a beam with an accelerating mass", *Archive of Applied Mechanics*, 65:564-571.
- [35] Dehestani, M., Mofid, M., ve Vafai, A., (2009). "Investigation of critical influential speed for moving mass problems on beams", *Applied Mathematical Modeling*, 33:3885-3895.
- [36] Stanisic, M. M., ve Lafayette, W., (1985). "On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses", *Ingenieur-Archiv*, 55: 176-185.
- [37] Lee, H. P., (1998). "Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass", *Applied Acoustics*, 55(3):203-215.
- [38] Avramidis, I. E. ve Morfidis, K., (2006). "Bending of beams on three-parameter elastic foundation" *International Journal of Solids and Structures*, 43:357-375.
- [39] Kerr, A. D., (1964). "Elastic and viscoelastic foundation Models", *Journal of Applied Mechanics*, 31(3): 491-498.
- [40] Zhaohua, F., ve Cook, R. D., (1983). "Beam element on two-parameter elastic foundations", *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 109(6):1390-1402.
- [41] Mallik, A. K., Chandra, S., ve Singh, A. B., (2006). "Steady-state response of an elastically supported infinite beam to a moving load" *Journal of Sound and Vibration*, 291:1148-1169.
- [42] De Rosa, M. A., (1995). "Free vibrations of Timoshenko beams on Two-parameter elastic foundation", *Computer and Structure*, 57(1):151-156.

- [43] Lou, P., Dai, G. L., ve Zeng, Q.Y., (2006). "Finite-element analysis for a Timoshenko beam subjected to a moving mass", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 220:669-678.
- [44] Yavari, A., Nouri, M., ve Mofid, M., (2002). "Discrete element analysis of dynamic response of Timoshenko beams under moving mass", *Advances in Engineering Software*, 33:143-153.
- [45] Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. ve Carlson, J.D., (1996). "Phenomenological Model of a Magnetorheological Dampers", *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 123(3):230-238.
- [46] Lau, Y.K. ve Liao, W.H., (2005). "Design and Analysis of Magnetorheological Dampers for Train Suspension", *Journal of Rail and Rapid Transit*, 219(4):261–276.
- [47] Ahmadian, M. ve Pare, C.A., (2000). "A Quarter-Car Experimental Analysis of Alternative Semiactive Control Methods", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11:604-612.
- [48] Paksoy, M. (2013). Taşıt Titreşimlerinin MR sönümleyici ile Yarı Aktif Bulanık Kontrolü Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] Çetin, Ş. (2010). Yapıların Nonlineer Aktif Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [50] Çetin S., Zergeroğlu E., Sivrioğlu S., Yüksek I., (2011), "A new semiactive nonlinear adaptive controller for structures using MR damper: Design and experimental validation", *Nonlinear Dynamics*, 66 (4), 731-743.
- [51] Dong X., Yu M., Liao C., Chen W., (2010), "Comparative research on semi-active control strategies for magneto-rheological suspension", *Nonlinear Dynamics*, 59 (3), 433-453.
- [52] Rajala S., (2011), "Control Design of An Active Vehicle Suspension System", Yüksek lisans tezi, Tampere University of Technology.
- [53] Terasawa T., Sakai C., Ohmori H., Sano A., (2004), "Adaptive Identification of MR Damper for Vibration Control", 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2297 -2303, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 14-17 December.
- [54] Guglielmino E., Sireteanu T., Stammers C. W., Ghita G., Giuclea M., (2008), "Semi-Active Suspension Control", Springer.
- [55] Choi S. B., Lee S. K., Park Y. P., (2001), "A Hysteresis Model For The Field Dependent Damping Force of A Magnetorheological Damper", *Journal of Sound and Vibration*, 245 (2), 375-383.
- [56] Jansen, L.M., ve Dyke, S.J. (2000). "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study." *J. Engrg. Mech., ASCE*, 126(8):795–803.
- [57] Leitmann, G. (1994). "Semiactive control for vibration attenuation." *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 5:841–846.

- [58] Song, X., Ahmadian, M., Southward, S. ve Miller, L.R., (2005), "An Adaptive Semiactive Control Algorithm for Magnetorheological Suspension Systems", *Journal of Vibration and Acoustics*, 127: 493-502.
- [59] Yan, G., ve Zhou, L.L., (2006), "Integrated Fuzzy Logic and Genetic Algorithms for Multi-Objective Control of Structures using MR Dampers", *Journal of Sound and Vibration*, 296,368-382.
- [60] Jolly, M.R., Bender, J.W. ve Carlson J.D., (1999). "Properties and Application of Commercial Magnetorheological Fluids", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10:5-13.
- [61] Ulu.A., Paksoy M.E., Metin, M., Yücel,M.E., "Vibration Mitigation of Railway Bridge by Using Magnetorheological Damper," 3rd International Symposium on Electrical Railway Transportation Systems (ERUSIS 2017), October 27-28, 2017, Eskişehir, Turkey.
- [62] Yang, M., (2015) "Longitudinal vibration control for a suspension bridge subjected to vehicle braking forces and earthquake excitations based on magnetorheological dampers", *Journal of Vibration and Control*, 22(17): 3659-3678, 2015.
- [63] Metin, M.,(2007). "Raylı sistem araçlarının modellenmesi ve titreşimlerinin kontrolü", Yüksek lisans tezi ,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [64] Ogata, K. (1990) *Modern Control Engineering*, New Jersey, Prentice-Hall.
- [65] Baykal, N., Beyan, T., (2004), *Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleticiler*, Bıçaklar Kitabevi, Ankara.
- [66] Zadeh, L., (1965), "Fuzzy Sets", *Journal of Information and Control*, 8, 338-353.
- [67] Küçükdemiral,İ.B., (2002), *Nöral-Genetik Tabanlı Optimal Bulanık Kontrolörün Gerçeklenmesi ve DC Servomotora Uygulanması*, Doktora Tezi, Y.T.Ü., İstanbul.
- [68] Şen, Z., (2001), *Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri*, Bilge Kültür Sanat Yayınları,İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat Emre YÜCEL
Doğum Tarihi ve Yeri :06.07.1987 - Uzunköprü
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : emreyucel1987@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2018
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Yusuf Çapraz Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017	İnan Makina A.Ş.	Analiz Mühendisi
2015	Tırsan Treyler A.Ş.	Test Mühendisi
2013	Tubitak-SAGE	Test Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Metin, M., Yücel, M.E., Paksoy, M., and Çetin, Ş., “Controlling Rail Vehicle Vibrations Using Magnetorheological Damper,” 3rd International Symposium on Railway Systems Engineering (ISERSE’16), October 13-15, 2016, Karabuk, Turkey.
2. Ulu.A., Paksoy M.E., Metin, M., Yücel,M.E., “Vibration Mitigation of Railway Bridge by Using Magnetorheological Damper,” 3rd International Symposium on Electrical Railway Transportation Systems (ERUSIS 2017), October 27-28, 2017, Eskişehir, Turkey.

