

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ BİLİM DALI

ANKASTRE ESNEK KİRİŞİN OPTİMAL KONTROL
METODLARIYLA AKTİF TİTRESİM KONTROLUNUN
GERCEKLESTİRİLMESİ

Emrah KUZU

Danışman
Doç. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI

İkinci Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Serkan ÇAŞKA



MANİSA, 2024

EMRAH
KUZU

ANKASTRE ESNEK KIRIŞIN OPTİMAL KONTROL METODLARIYLA
AKTİF TİTRESİM KONTROLUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Emrah KUZU



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER TABLOSU	iv
TABLO DİZİNİ	vi
TEŞEKKÜR	vii
ÖZET	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür	1
1.2 Tezin Amacı	13
1.3 Tez Organizasyonu	15
2. MATERYAL VE YÖNTEMLER	16
2.1 Mekanik Titreşimler	17
2.1.1 Titreşim Analizi	20
2.1.2 Sönümsüz Serbest Titreşim	20
2.1.3 Sönümlü Zorlamalı Titreşim	23
2.1.4 Rezonans	25
2.1.5 Frekans Cevabı Modeli	26
2.2 Deney Seti Modellenmesi	27
2.2.1 Katı Modelleme	27
2.2.2 Analiz ve Simülasyon	30
2.2.3 Modal Analiz	31
2.2.4 Matematiksel Model	37
2.3 Gerçek Zamanlı Donanım Kurulumu	41
2.3.1 Sensör (Strain gauge)	42
2.3.2 Wheatstone köprüsü	43
2.3.3 Op-Amp (işlevsel Yükselteç)	44
2.3.4 Stm32f407 Mikroişlemci	46
2.3.5 Stm32 ile PİD	56
2.4 Otomatik Kontrol Yöntemi	61
2.4.1 Açık Çevirim Kontrol	64
2.4.2 Kapalı Çevirim Kontrol	65
2.4.3 PİD Kontrol	67
2.4.4 Parçacık Sürü Optimizasyon	70

2.4.5	Genetik Algoritma	72
2.4.6	Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon.....	74
3.	ARAŞTIRMA VE BULGULAR	77
3.1.	Logaritmik azalım ile Sönüm katsayısı.....	79
3.2	PİD Parametreleri.....	82
4.	SONUÇ ve ÖNERİLER	90
5.	KAYNAKÇA.....	95
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ω Doğal frekans

α Faz

θ Faz açısı

F Zorlama kuvvet genliği

a Genlik

ADC Analog Dijital Çevirim

DMA Doğrudan Erişimli Bellek

GA Genetik algoritma

MEMS Mikro elektromekanik sistemler

PİD Oransal, İntegral, Türevsel Denetleyici

PSO Parçacık Sürü Optimizasyonu

PWM Darbe Genişlik Modülü

WDO Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon

x Kirişin enine yer değiştirmesi

ζ Sönüm katsayısı

A Kiriş kesit alanı

E Kirişin elastisite modülü

I Kiriş alan atalet momenti

N Eksenel kuvvet

T Kinetik enerji

V Potansiyel enerji

l Kiriş uzunluğu

r Kirişin kesit yarıçapı

x, y Kartezyen koordinatlar

δ Dirac delta

ρ Kiriş yoğunluğu

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 1 Aktif Titreşim Kontrolü Adımları	15
Şekil 2 Ankastre Kiriş	16
Şekil 3 Basit Harmonik Hareket.....	18
Şekil 4 Kütle Yay Sistemi	20
Şekil 5 Sönüm Oranı Farkı.....	22
Şekil 6 Geçirgenlik Oranı.....	24
Şekil 7 Frekans Cevabı Modeli	27
Şekil 8 Deney Seti Önden Görünüş.....	28
Şekil 9 Deney Seti Arkadan Görünüş	28
Şekil 10 Deney Seti Önden Görünüş.....	29
Şekil 11 Deney Seti Arkadan Görünüş	29
Şekil 12 ANSYS Model	31
Şekil 13 Thermo Scientific Niton XL5	32
Şekil 14 Thermo Scientific	33
Şekil 15 Mod Frekansları	34
Şekil 16 1. Mod	34
Şekil 17 2. Mod	35
Şekil 18 3. Mod	35
Şekil 19 Static Response	36
Şekil 20 Frekans Response.....	36
Şekil 21 Ankastre Kiriş Modeli.....	37
Şekil 22 Strain gauge.....	42
Şekil 23 Wheatstone Bridge	43
Şekil 24 Genel Op-Amp	44
Şekil 25 Op-Amp Devresi	45
Şekil 26 STM32F407 Mikroişlemci.....	46
Şekil 27 ADC DAC	47
Şekil 28 ADC Çözünürlük	48
Şekil 29 CubeMX Configürasyon.....	50
Şekil 30 ADC NVIC Yapısı	51
Şekil 31 ADC DMA Ayarları.....	52
Şekil 32 ADC Çevirim Süresi Hesaplama	52
Şekil 33 PWM	54
Şekil 34 PWM % 40 Doluluk.....	55
Şekil 35 PWM üretim süreci	56
Şekil 36 CubeMX.....	57
Şekil 37 Stm32 Clock Configuration	58
Şekil 38 STM32 ADC Configuration.....	59
Şekil 39 STM32 DMA	59
Şekil 40 STM32 UART Bağlantı Yapılandırma	60
Şekil 41 STM32 PWM.....	61
Şekil 42 Açık Kontrol	64

Şekil 43 K_p Katsayısı Birim Basamak Cevabı	68
Şekil 44 K_d Katsayısı Birim Basamak Cevabı	68
Şekil 45 K_i Katsayısı Birim Basamak Cevabı	69
Şekil 46 Parçacık Sürü Optimizasyonu	71
Şekil 47 Genetik Algoritma.....	73
Şekil 48 Rüzgâr GÜdümlü Optimizasyon.....	76
Şekil 49 Logaritmik Azalım	79
Şekil 50 Serbest Titreşim Ölçümü	81
Şekil 51 Serbest Titreşim Ölçümü Osiloskop	81
Şekil 52 Ankastre Kirişin Serbest Titreşim Ölçülmüş Grafiği.....	82
Şekil 53 Gerçek ve Simüle Edilen Sinyal	82
Şekil 54 Genetik Algoritma Mutlak Hata	84
Şekil 55 Genetik Algoritma Katsayıları PİD Sonucu.....	85
Şekil 56 Parçacık Sürü Optimizasyonu Mutlak Hata.....	85
Şekil 57 Parçacık Sürü Optimizasyonu Katsayıları PİD Sonucu	86
Şekil 58 WDO Mutlak Hata	87
Şekil 59 Rüzgâr GÜdümlü Optimizasyonu Katsayıları PİD Sonucu.....	87
Şekil 60 WDO Katsayıları PİD Sonucu	88
Şekil 61 WDO PİD Kontrol ve Kontrolsüz Serbest Titreşim	88
Şekil 62 Araştırma Süreci	90

TABLO DİZİNİ

Tablo 1 Malzeme Bilgileri	33
Tablo 2 Ansys Mod Frekansları	37
Tablo 3 STM32F4 ADC Pinleri	49
Tablo 4 Stm32 Bağlantı İsimleri	58
Tablo 5 Katsayıların Etkisi.....	70
Tablo 6 Mod Frekansları	79
Tablo 7 Performans Kriterleri	93



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın tamamlanması sürecinde, beni her adımda cesaretlendiren, yönlendiren ve destekleyen birçok kişiye içten teşekkürlerimi sunmak isterim. İlk olarak, değerli danışmanım sevgili kıymetli hocam, Doç. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI özel ilgisi, sabrı ve bilgi birikimi için teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmamın farklı aşamalarında yardımlarını esirgemeyen sayın Dr. Öğretim üyesi Serkan ÇAŞKA hocama teşekkür etmek isterim.

Zorlu fakat bir o kadarda eğitici bu süreç sonunda tamamlamış bulunmaktayım. Bir işin insanın içine sine sine yapması yaptığı işten gurur duyması ayrı bir nimet ve her tez çalışması yapan öğrenci için bu nimeti tatmasını temenni ederim. Bu sınavı geçmemle birlikte düşündükçe her tebriğin aslında sadece bana değil bu sınavda bana yardımcı olan emeğini esirgemeyen o sayısız insanlara da gelmekte olduğunu belirtmeden edemeyeceğim. Gönül her birisine ayrı ayrı teşekkür etmek ister, yazamadıklarına buradan da ayrıca teşekkür ederim. Bu çalışmanın her anında benimle beraber emek veren destek olan kıymetli ömürlük yol arkadaşım Servet KUZU Hanımefendi'ye, bunca yıl ayırmam gereken vakitten fazlasını aldığım sevgili evlatlarım T. Emir KUZU ve Ö. Asaf KUZU' ya , beni bugüne kadar yetiştirmede haklarını ödeyemeyeceğim kıymetli validem ve sevgili babama, benimle her daim anlayışla konuşan ve yaklaşan Rahmetli kayınpederime ve çok sevdiğim kayıinvalideme, Hayatımdaki ilk arkadaşım ben düşerken elimden tutan zamanını zamanıma katan sevgili abim Üzeyir KUZU' ya Öğr. Gör Dr. B. Emre YAPANMIŞ'a ve sevgili genç öğrencim M. Mert TUNCEL' e

Gönülden, samimi ve minnet dolu teşekkürlerimi arz ediyorum.

Saygılarımla,
Emrah KUZU
Manisa, 2024

ÖZET

Doktora Tezi

ANKASTRE ESNEK KİRİŞİN OPTİMAL KONTROL METODLARIYLA AKTİF TİTRESİM KONTROLÜNÜN GERCEKLESTİRİLMESİ

Emrah KUZU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI

İkinci Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Serkan ÇAŞKA

Bu tez çalışması, aktif titreşim kontrolü konseptini ele almakta ve Proportional-Integral-Derivative (PID) kontrol algoritmasının aktif titreşim kontrolünde kullanılabilirliğini incelemektedir. Titreşim, bir sistemdeki istenmeyen salınımları ifade eder ve birçok endüstriyel uygulama ve mühendislik sistemlerinde sorunlara neden olabilmektedir. Bu çalışma, PID kontrol algoritmasının, titreşim kontrolünde geleneksel olarak kullanılan yöntemlere alternatif bir çözüm sunup bu çözüm için en optimal PID katsayılarının bulunmasında kullanılan meta-sezgisel algoritmaları değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Tez, öncelikle titreşim kontrolü ve PID kontrol algoritması hakkında genel bir literatür taraması yaparak başlamaktadır. Ardından, PID kontrol algoritmasının temel prensipleri ve uygulama alanları üzerinde odaklanılarak, aktif titreşim kontrolü için nasıl adapte edilebileceği incelenmektedir. Çalışma, PID parametrelerinin ayarlanması, sistem modelleme teknikleri ve gerçek zamanlı kontrol uygulamalarını içeren pratik uygulamalarla desteklenmektedir.

Deney ve simülasyon sonuçları, PID kontrol algoritmasının aktif titreşim kontrolünde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, PID kontrol algoritmasının, titreşim kontrolü uygulamalarında alternatif bir çözüm olarak değerlendirilebileceği sonucunu desteklemektedir.

Sonuç olarak, bu tez, PİD kontrol algoritmasının optimal metotlarla aktif titreşim kontrolünde etkili bir şekilde kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu bulgular, mühendislik uygulamalarında titreşim kontrolüne yönelik yeni ve daha etkili çözümler arayan araştırmacılar ve mühendisler için önemli bir kaynak olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim, Aktif, Kontrol, PİD, PSO, WDO

2024, 119 sayfa



ABSTRACT

PhD Thesis

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF CANTILEVER FLEXIBLE BEAM USING OPTIMAL CONTROL METHODS

Emrah KUZU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Doç. Dr. Süleyman Murat BAĞDATLI

Co-Supervisor: Dr. Öğretim Üyesi Serkan ÇAŞKA

This thesis addresses the concept of active vibration control and examines the applicability of the Proportional-Integral-Derivative (PID) control algorithm in active vibration control. Vibration refers to undesirable oscillations in a system and can lead to problems in various industrial applications and engineering systems. This study aims to evaluate meta-heuristic algorithms used in finding the optimal PID coefficients for providing an alternative solution to traditional methods commonly used in vibration control.

The thesis begins with a general literature review on vibration control and the PID control algorithm. It then focuses on the basic principles of the PID control algorithm and its areas of application, exploring how it can be adapted for active vibration control. The work is supported by practical applications including the adjustment of PID parameters, system modeling techniques, and real-time control implementations.

Experimental and simulation results indicate that the PID control algorithm can be successfully used in active vibration control. These findings support the conclusion that the PID control algorithm can be considered as an alternative solution in vibration control applications.

In conclusion, this thesis demonstrates the effective use of the PID control algorithm in active vibration control with optimal methods. These findings could serve

as a valuable resource for researchers and engineers seeking new and more efficient solutions for vibration control in engineering applications.

Keywords: Vibration, Active, Control, PID, PSO, WDO

2024, 119 pages



1. GİRİŞ

Günümüzde teknoloji ve mühendislik alanındaki hızlı gelişmeler, birçok uygulama ve endüstriyel süreçte titreşim kontrolünün önemini artırmıştır. Titreşimler, yapısal hasara, performans kaybına ve konfor sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, titreşim kontrolü mühendislik projelerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu bağlamda, aktif titreşim kontrolü, titreşimleri azaltmak veya istenen bir şekilde yönlendirmek için kullanılan etkili bir yöntem olarak önem kazanmıştır.

Aktif titreşim kontrolü, bir sistemin titreşimlerini sensörler, denetleyiciler ve aktüatörler aracılığıyla sürekli olarak izler ve müdahale eder. Bu yöntem, titreşimleri azaltmanın yanı sıra, yapıların dayanıklılığını artırmak, enerji verimliliğini iyileştirmek ve uygulama alanlarını genişletmek gibi bir dizi avantaj sunar. Aktif titreşim kontrolünün endüstriyel ve akademik açıdan büyük bir ilgi gördüğü bu dönemde, bu tez, aktif titreşim kontrolünün teorik temellerini ve pratik uygulamalarını incelemeyi amaçlamaktadır.

Bu tez, aktif titreşim kontrolünün gelişimi, çalışma prensipleri, mevcut teknolojileri ve gelecekteki potansiyeli hakkında derinlemesine bir inceleme sunacaktır. Ayrıca, çeşitli endüstriyel ve mühendislik alanlarındaki uygulama örneklerini ve aktif titreşim kontrolünün bu alanlardaki katkılarını ele alacaktır.

Sonuç olarak, aktif titreşim kontrolünün önemi ve potansiyeli, modern mühendislik uygulamalarında kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. Bu tez, bu önemli konuyu daha iyi anlamamıza ve gelecekteki mühendislik projelerinde aktif titreşim kontrolünün daha yaygın bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

1.1 Literatür

Pasif kontrol tekniklerin bir sınıra ulaşması özellikle de düşük frekanslarda olan yetersizliğinden son yıllarda gerek akademik gerekse endüstriyel alanda Aktif Titreşim Kontrolü üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır.[1] Teknolojinin hızla gelişmesi ile sadece düşük doğal frekanslara sahip basit yapılar haricinde daha

karmaşık yapılarda Aktif Titreşim Kontrolü için çalışma alanına girmiştir. Kontrol için geri besleme sinyalleri içeren deney düzenekleri hazırlanmış, kirişin birinci modu üzerine çalışılmıştır. Akıllı yapıların ve malzemelerin süreç içerisinde kullanımı artmıştır. Akıllı malzemelerin bilhassa piezoelektrik malzemelerin hem algılayıcı hem de sürücü(eyleyici) görevini almaktadır. Akıllı yapılarda titreşim kontrolü için, kapalı döngü denetçisi kullanılmaktadır.[4]

Çeşitli çalışma ortamlarında veya eylemsel işlemlerde kullanılan yapıların dinamik davranışlarının iyileştirilmesi için yenilikçi aktif titreşim kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır [2]. Aktif Titreşim Kontrolü dinamizmin olduğu her yapıda kullanılabilmektedir [3]. Endüstriyel uygulamaların yanı sıra, yapılan akademik çalışmaların pek çoğunun basit, esnek ve hafif çubuk ve plaka yapılar üzerinde gerçekleştirildiği belirlenmiş ve bu konudaki çalışmalar sınıflandırılmıştır [5].

Z. Mohamed ve arkadaşları çok esnek ve yüksek sürtünmeli bir manipülatör sisteminin titreşim kontrolü için ileri besleme ve geri besleme kontrol şemalarının geliştirilmesi üzerine deneysel araştırmalar yapmışlardır. Kontrolörlerin performansları, PD kontrolü yanıtına kıyasla giriş, izleme kapasitesi ve titreşim azaltma açısından değerlendirmişlerdir. Giriş şekillendirme ve gerinim geri besleme kontrolünü içeren hibrit kontrol şemaları ile sistem titreşiminde önemli bir azalmanın sağlandığı gözlemlenmiştir. Giriş şekillendirme ve gerinim geri besleme kontrolünü içeren hibrit kontrol şemaları ile sistem titreşiminde önemli bir azalmanın sağlandığı sonucunu bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmada alçak geçiren filtre ile kabul edilebilir bir titreşim sönümlleme seviyesi elde etmişlerdir [6].

Shao M., Huang Y. ve Silberschmidt V. Yapmış oldukları çalışmada esnek mesnetli, esnek bir manipülatörün titreşim problemini incelemiştir. Ana aşamaları şu şekilde hazırlamışlardır. Esnek bir bağlantı ve eklem ile manipülatörün bir sonlu elemanlar modelinin oluşturulması; bir indirgeme yöntemiyle modelin boyutsuzlaştırılması; CRRM' nin (düzenlenmiş azaltılmış yeniden oluşturulmuş model) azaltılmış Sonlu elemanlar modelini güncellemesini ve sistemin dinamik özelliklerinin gerçeğe uymasını sağlaması. CRRM kütle matrisini düzeltmek için bir model rekonstrüksiyon yöntemi hazırlamak ve sistemin istenmeyen tepkisini ölçmek. Çıkış sisteminin durum fonksiyonunun oluşturulması, yeniden yapılandırılmış model

için bir LQR optimal kontrolörünün tasarlanması ve kontrol edilen sistemin simülasyonlarının gerçekleştirilmesi. Tüm benzetim sonuçları dinamik özellikler ve kontrollü etki açısından olumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Yeniden yapılandırılmış modelin kontrolsüz yanıtı, manipülatör eklemının yüksek frekanslı titreşimin esnek bağlantıya iletilmesini engelleyebileceğini görülmüştür. Yeniden yapılanma modelinin ilk iki modülü tarafından titreşim neredeyse sönümlenmiştir. Titreşim senaryosu gerçek ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [7].

Wang B. Ve Lou J. Çalışmasında Harmonik tahrikli esnek manipülatörünün dinamik modellemesini ve parametre tanımlamasını problemini incelemiştir. Harmonik ve kaplin sistemin karakterleri iki transfer fonksiyonu modeli ile açıklanmıştır: $G(s)$ ve $H(s)$. $G(s)$ ikili pseudorandom (kendini tekrarlamayan rasgele dizi) m-dizisi sinyalinin uyarılması ile modellenmiştir ve $G(s)$ in düzeltilmesi de doğruluğu ispatlanmıştır. $H(s)$, gerçek sistemin zaman ve frekans alanında başarılı tahminlemesi ve düzeltilmesi kanıtlanmıştır [8].

Auwalu M. Abdullahi ve diğerleri yaptıkları çalışmada, bir PD tipi bulanık mantık denetleyicisi (PDFLC), denetleyicinin girişleri olarak türeviyle tasarlanmıştır. Giriş takibi ve uç sapma düzenlemesi olmak üzere iki kontrol maksadıyla MATLAB Bulanık Araç Kutusu (Fuzzy) kullanılarak uygulanmıştır. Kontrol cihazının hem izleme hem de düzenleme kontrolünü başarıyla elde ettiğini, aynı zamanda propose (önleyici) kontrolünün avantajını çeşitli yüklemelerde görülmüştür. Aşırı yük, yükselme süresi, yerleşme süresi ve yüksüz sonuç ile karşılaştırıldığında, kontrolör sıfır kararlı durum hatası ile harici değişikliklerle oturma süresi uzayabilmektedir. Bunun için kontrol şeması kural tabanını tasarlamak zaman alan bir süreçtir. Simülasyon süresi daha uzun sürmektedir. Bu birçok üyelik fonksiyonunun ve birçok kural tabanının kullanılmasının doğal sonucudur. Daha az üyelik işlevine karşılık çok sayıda üyelik daha iyi sonuç aldığını vurgulamıştır [9].

Run-Min Hou yayınlamış olduğu makalede, dinamik model sırasında titreşimi azaltmak için ters ANFIS model kontrolörünün üzerine çalışmıştır. Gelişmiş kontrolörlerin bir esnek manipülatör sistemi içinde uygulanmıştır. PID-PID kontrol cihazı ile uç nokta ivmelenmesinde titreşim azaltma ve mafsallarda artma, ters

ANFIS kontrol cihazı ile elde edilenle karşılaştırmıştır. Modelleme ve kontrolün amacı başarılı olduğu gözlenmiştir [10].

Nura M. Tahir ve çalışma arkadaşları LQR'li zaman gecikmeli girdi şekillendiricilerinin ve LQR'li çıktı tabanlı girdi şekillendiricinin performansları baz almıştır. Titreşim sönümleme ve istenilen değer ulaşılmasına göre değerlendirilmiştir. Yüksek dereceli türevlere sahip zaman geciktirme filtreleri, titreşim sönümleme ve daha fazla kuvvet uygulanmasında daha iyi performans verdiği izlenmiştir. Bununla birlikte, türevin sırasının arttırılması, sistemde gecikmesine sebep olmaktadır. LQR'li çıkış tabanlı giriş şekillendirici hem titreşim kontrolünde hem de sıfıra yakın uç sapması ile referans takibinde daha başarılı olduğunu belirtmiştir [11].

Musa ve diğerleri, LQR-OFB (Çıkış Temelli Filtre) ve PİD-OFB kontrolörleri kullanarak tek bağlantılı esnek manipülatörün konumunu ve kalıcı titreşim kontrolünü incelemiştir. İki kontrolörün performansı değişken yüke karşı sağlamlık açısından karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, LQROFB kontrol cihazının istenen nokta(set-point) izleme ve uç nokta titreşimi sönümleme ayrıca yük taşıma varyasyonuna mukavemet açısından PİD-OFB kontrol cihazından daha iyi performans gösterdiğini incelemiştir [12].

Ahmed A. Ali b Klasik Pİ kontrolörünün ayarlanması için sayısal SIMO Pİ- (tek giriş çoklu çıkış) bulanık mantığa dayalı kendinden ayarlamalı kontrolör kullanıldı. Aktif titreşim kontrolü, akıllı manipülatör yapısal çökme süresinin %74'ünü etkili bir şekilde sönümlledi. Bulanık kontrolörün ticari sonlu eleman çözücüyeye entegrasyonu, çok iyi bir uyum ile deneysel olarak ölçülen cevaplarla ispatlanmıştır. Mevcut çalışma, Pİ kontrol cihazı kazanımlarını ayarlamak için bir FE (sonlu eleman) çözücüsünde (ANSYS) bulanık mantık için etkili bir uygulamadır. Önceden aktif titreşim kontrolü için karmaşık yapıları simüle etmede gerekli olan bir dizi karmaşık işlem gerek olmayabilir. Birden fazla çözücünün kullanıldığı önceki çalışmalara dayanarak, doğru sonuçları tahmin etmek için yeterince kesin sonuçlar olmayabilir ancak bu çalışmanın sonuçları, karmaşık yapılar üzerinde yapılan bulanık analizlerle tek bir çözücünde kesin simülasyonun daha net sonuçlar verebilmektedir. Enerji kullanımı sorunu da bu yöntemle geliştirilmektedir [13].

Auwalu M. Abdullahive arkadaşları yapmış olduğu çalışmada, tek mesnetli esnek manipülatör sisteminin titreşim kontrolü için bir hibrit kontrol şeması hazırlanmıştır. Kontrol, titreşim kontrolü için sistemin rezonans frekanslarına dayalı olarak tasarlanmış bir rezonant kontrolörden ve sıfır kararlı durum hatasına uygun bulanık bir mantık kontrolöründen oluşur. Bulanık mantık, mafsalsal açısal hatası ve giriş olarak türevi ile tasarlanmıştır. Bulanık mantık denetleyicisi, Simulink' te MATLAB bulanık araç kutusu kullanılarak hazırlanmıştır. Rezonans kontrolörü, iç döngü kontrolü ve bulanık dış döngü kontrolü olarak tasarlanmıştır. Kontrol şemasının performansı MATLAB' daki simülasyon ile araştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, kontrol cihazının hem izleme hem de titreşim kontrolüne başarılı olduğu sonucuna varmışlardır. Kontrol şemasının sağlamlığını test etmek için, farklı yük değerleri seçilmiştir ve sonuçlar, sıfır yük sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, tepe, yükselme süresi ve sönüm süresinde küçük değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir [14].

Fadhil Yousif Mohammed, Yasin Yousif Mohammed ve Hussein Ali Hussein yapmış oldukları çalışmalarında, esnek plaka yapısı genetik modelleme tekniği ile modellemişler. Girdi / Çıktı haritalaması, ortalama kare hatası ile korelasyon testleri sonucu doğruluğu ispatlamışlardır. GA tabanlı modelleme tekniğinin sistem tepkisine yaklaşımda iyi performans gösterdiğine dikkat çekilmişlerdir. Bu şekilde geliştirilen ve onaylanan esnek plaka yapısının parametrik modelleri, esnek yapılarda titreşim sönümleme kontrol stratejilerinin geliştirilmesi araştırmalarında kullanılabilir olduğunu vurgulamışlardır [15].

Erdi GÜLBAHÇE, Mehmet ÇELİK ve Mustafa TINKIR çalışmalarında, alüminyum konsol kirişin aktif titreşim kontrolü için matematiksel modeli oluşturmuşlardır. Esnek yapının dinamik özelliklerini incelemek için iki modal analiz yöntemi ve iki tahmin modeli kullanmışlardır. Modal analizler ve modelleme sonuçları, bulanık mantık modelinin başarıyla uygulandığını ve deney düzeneğinin aktif titreşim kontrolünden başarılı olduğunu göstermektedir. Kontrollü ve kontrolsüz sistem arasındaki farkları bulmak için bir örnek kontrolör (PID) kullanmışlardır. Bu kontrolörün etkinliği simülasyonlar kullanılarak gerçekliğini doğrulamışlardır [16].

Noor Fadhilah Mat Ros ve çalışma arkadaşları yapmış olduğu çalışmada; kiriş modeli, öz yinelenmeli en küçük kare algoritması kullanılarak sistem tanımlama tekniği

temel alınarak geliştirilmiştir. Tanımlama işleminden önce, girişin doğal frekanslarını bulmak için rezonans testi yapılmış ve ardından kare dalga sinyali kullanılarak giriş-çıkış veri toplama yapılmıştır. Model ve ölçülen çıktı arasındaki karşılaştırma grafiği yoluyla modelin doğrulanması ve hatanın küçük olduğunu bulmuşlardır. ARX modelleri arasında 4. Ve 12. Model en uygun olarak seçmişlerdir [17].

Mohd Sazli Saad çalışmasında, esnek bir girişim aktif titreşim kontrolü üzerine çalışmıştır. RLS (özyinelemeli kare sinyal.) kullanılarak belirlenen modele EA (geleneksel algoritma) tarafından PID parametreleri kullanılarak geliştirmişlerdir. Bu yeni yaklaşım, girişin harici etkilere maruz kaldığı, test cihazında gerçek zamanlı PID kontrolöründe deneysel olarak test edilmiştir. DE (farklılaşım) ve GA (genetik algoritma) tarafından ayarlanan PID' nin performansı geleneksel PID ayarıyla karşılaştırmışlardır (Ziegler Nichols yöntemi kullanılarak). Deneysel sonuçlar EA tarafından ayarlanan PID'nin geçici tepki açısından geleneksel ayarlama yönteminden daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Ancak, titreşim zayıflaması açısından, DE, GA ve ZN arasındaki performans yaklaşık aynı sonuçları verdiğini vurgulamışlardır [18].

Mohsen Gol Zardian ve Amran Ayob çalışmalarında, gürültüden kaynaklanan istenmeyen titreşimleri bastırmak amacıyla esnek manipülatörün doğrusal ve doğrusal olmayan modellemesi için bir PID kontrolör tasarımı üzerine çalışmışlardır. Önerilen modeller sırasıyla doğrusal ve doğrusal olmayan model için FRF (frekans çıkış fonksiyonu) ve korelasyon testi kullanılarak doğrulanmıştır. PID kontrolörü, titreşimi sönmölemek için her iki modelde de uygulanmıştır. Kontrol döngüsünde giriş sinyali ve gürültünün varlığında, tüm frekans alanı için sistem yanıtının genliği doğrusal model için yok sayılmaktadır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan model için sistem yanıtının genliği, özellikle düşük frekans bölgesinde sönmömesi zor olmuştur. Her iki modelde de farklı PID denetleyici performansının değerlendirmesi, doğrusal modellerde daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir [19].

E H Koroishi ve arkadaşları çalışmasında, Bulanık Modal Kontrolörleri kullanılarak akıllı kompozit yapılarda aktif titreşim kontrolü üzerine çalışmıştır. Sonuçlar aktif titreşim kontrolündeki Bulanık Modal Kontrolörlerin etkinliğini göstermiştir. Sonuçlar, düşünülen modların (2 mod) tatmin edici bir kontrol elde etmek

için yeterli olduğunu ortaya koymuştur. Bu aşamada sistem kontrolün önemini vurgulamışlardır. Sistemin dinamik davranışı ile ilgili modları önem düzeyine göre sıralamalıdır. Bu dikkate alınan modların sistem yanıtı için önemli olduğunu vurgulamışlardır. Sağlamlık analizi, Bulanık Modal Kontrolörlerin temel olarak yukarıda sunulan ikinci durum için uygun olduğunu göstermiştir [20].

C.M.A. Vasques ve J. Dias Rodrigues araştırmalarında, titreşim kontrolü ile ilgili klasik kontrol stratejileri, sabit genlik ve sabit kazanç hızı geri bildirimi (CAVF ve CGVF) ve en uygun kontrol stratejileri, doğrusal kuadratik regülatör (LQR) ve doğrusal kuadratik Gauss (LQG) kontrolörünün analizi ve karşılaştırılması akıllı piezoelektrik kirişlerin kontrolü üzerine çalışmalardır. Kontrol modelleri, piezoelektrik katmanlardan birinin dağıtılmış bir sensör, diğerini dağıtılmış bir aktüatör gibi davrandığını ve sensör sinyalinin kapalı döngü kontrol sistemlerinde geri besleme referansı olarak kullanıldığını varsaymıştır.

Yüzeye monte edilmiş asimetrik bir çift kol lokasyonlu piezoelektrik yama içeren bir konsol alüminyum kirişin aktif titreşim kontrolü ile ilgili bir deney düzeneği hazırlamışlardır. Maliyet fonksiyonu ağırlıkları ve performans kriterleri arasındaki ilişki, klasik kontrolün hantal hale geldiği yüksek dereceli ve çoklu giriş-çıkış sistemleri için bile uygun olduğu görülmüştür. LQR'li büyük bir sınırlaması, kontrolü oluştururken tüm durumların ölçülmesi gerektiğidir. LQG kontrolörü, gürültülü kısmi çıktı bilgileri kullanan bir Kalman-Bucy filtresi kullanarak durumları tahmin ederek ve LQR performansında bazen verimliliği artırabilecek sıklıkla meydana gelen değişikliklerde daha iyi performans sunduğu ölçülmüştür. Bununla birlikte, azaltılmış (kesilmiş) veya gözlemlenmemiş model dinamikleri ile ilgili gözlem ve kontrol yayılma problemlerin çözümü için uygun olmadığı belirtilmiştir [21].

R. Rimašauskienė arkadaşları ile yapmış olduğu çalışmada, ince cidarlı kompozit kiriş için aktif ve pasif titreşim kontrol teknikleri geliştirilmiş ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Titreşim kontrolü uygulamaları için iki kalıcı kübik mıknatıs (pasif titreşim kontrolü) arasındaki manyetik kuvvetlerle birlikte bir MFC (Makro Fiber Kompozit) aktüatörü kullanmışlardır. Aktif titreşim kontrolü (MFC aktüatörü) ile yapılan deneylerden sonra, her durumda, analiz edilen sistemin titreşim sönümlemesinin rezonans frekansında çok daha yüksek olduğu bulmuşlardır. Bununla

birlikte, deneysel sonuçlar nedeniyle, aktif ve pasif titreşim kontrol sistemlerinin ince cidarlı kompozit kirişin titreşim genlik kontrolü için etkili olduğu sonucunu gözlemlemişlerdir. İnce cidarlı kompozit kiriş titreşim kontrol analizi için metodoloji geliştirilmiş ve makalede sunmuşlardır [22].

Parameswaran ve çalışma arkadaşları yaptıkları çalışmada, titreşimlerin oluşumu çeşitli faktörlere bağlı olduğu için kontrol edilememektedir. Ancak sistemin verimli çalışması için bu titreşimlerin belirtilen sınırlar dâhilinde kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Titreşimli yapının hafif, hızlı ve çok modlu kontrolü, piezoelektrik sensörler, aktüatörler ve geri besleme kontrol algoritmaları kullanılarak mümkün olduğunu vurgulamışlardır. Bu yazıda, dirsekli kiriş üzerinde doğrudan çıkış geri beslemesine dayalı aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır. Deney sonucunda, ölçümlerin Gerçek Zamanlı İşletim Sistemi (Real –Time Operating System) kullanılarak yapılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Mancang JIA, Shijie ZHENG ve Rongbo HE makalede fotostriktif aktüatörlerle lamine edilmiş kompozit kirişin sonlu eleman formülasyonu hesaplamışlardır. Optimal kontrol ve bulanık algoritmanın kombinasyonu temelinde optimal bir bulanık aktif kontrol algoritması da önermişlerdir. Sayısal simülasyonlar, sonlu elemanlar formülasyonunun doğruluğunu ve optimal bulanık aktif kontrol stratejisinin etkinliğini doğrulamıştır. Sonlu elemanlar simülasyonu için, fotoelektrik alan ile foto-kaynaklı PLZT (lanthanum zirconate titanate) arasındaki histerezis problemi dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak: Optimum bulanık aktif kontrol algoritmasının çok modlu titreşim kontrolünü etkili bir şekilde gerçekleştirebildiğini ve optimal bulanık kontrol, optimum durum geri besleme kontrolünden daha iyi kontrol ettiğini göstermiştir. LQR parametresi -k değeri ne kadar yüksek olursa, titreşim genliğindeki azalma o kadar hızlı olduğu sonucuna varmışlardır. Optimal bulanık aktif kontrol algoritması, diğer doğrusal olmayan sistemlerin optimum durum geri besleme kontrolü için referans olabileceği sonucuna varmışlardır [24].

Chih-Liang Chua, Bing-Song Wua ve Yih-Hwang Linb çalışmalarında, elastik bir zemine monte edilmiş esnek bir kirişin aktif titreşim kontrolünü üzerine çalışmıştır. Timoşenko kiriş teorisi, ANSYS sonlu elemanlar analiz yazılımı tarafından öngörülenle uyumlu olan matematiksel modeli oluşturmak için kullanmışlardır.

Önerilen kontrol stratejisinin sadece tek bir titreşim modunu kontrol etmekle kalmayıp aynı zamanda bir aktüatör kullanırken aynı anda iki modu kontrol edebildiği sonucuna varmışlardır. Bu çalışmada sunulan kontrol stratejisinin uygulanması, esnek bir zemine monte edilmiş esnek bir kirişin üstün dinamik kontrolünü sağladığı gözlenmiştir [25].

Zhi-cheng Qiu ve çalışma arkadaşları ile yaptığı çalışmada, esnek bir kirişin yapısal modlarının sınır koşullarına göre belirlenmesi gerçeği doğrultusunda ABC (aktif sınır kontrolü) üzerinde çalışılmıştır. ABC, bir kirişin belirlenen yerinde istenen bir sınır koşulu oluşturmayı amaçlamaktadır. İlk olarak, ABC sisteminin ileri beslemeli kontrol yasası, bir transfer matrisi yöntemi kullanılarak türetilmiştir. Geleneksel dört sınır koşullarına ek olarak, ABC tarafından iki sınır koşulunun daha üretildiği bulunmuştur. ABC bir kirişin belirlenmiş bölgesinde tamamen titreşimsiz bir durumun (ne ön dalgaların ne de yansıyan dalgaların) oluşturulmasına olanak tanır. Son olarak, ABC'nin geçerliliğini doğrulamak amacıyla, bir filter-x LMS algoritmasına dayanan uyarlanabilir bir ileri besleme kontrolü kullanılarak bir deney gerçekleştirmişlerdir. ABC'nin bir kirişin belirlenmiş bir yerinde istenen bir sınır oluşturduğunu ve bir kirişin belirlenmiş bir alanında tamamen titreşimsiz bir durum oluşturulduğunu uygulamışlardır [26].

Zhuo-wei Xie çalışmalarında, esnek bir akıllı giriş titreşimini aktif olarak sönmölemek için bir tür pinomatik kontrol şeması üzerine çalışmışlardır. Aynı anda konumlandırma ve titreşim kontrolü için PWM (dalga modülasyonu) modunu kullanarak piston çubuğunun hareketini kontrol etmek için bir çubuk silindir kullanmışlardır. Pinomatik tahrik tabanlı esnek giriş sisteminin detayları anlatılmıştır. Sistem modellemesi ayrıntılı olarak hazırlanmış ve durum-uzay formu olarak ifade edilmiştir. Model daha sonra GA tabanlı optimizasyonla kontrolör tasarımı için özel maliyet fonksiyonu kullanılarak çevrimiçi adaptasyon ile kullanmışlardır. Aktif titreşim kontrolü için sayısal simülasyonlar ve deneyler, farklı durumlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, birinci modun büyük genlik titreşiminin çok daha düşük olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, simülasyon ve deneysel sonuçlar bunu desteklemektedir. Sunulan pinomatik sürüş sistemi şemasının fizibilitesi ve kabul edilen kontrol algoritmalarının etkin olduğu görülmüştür [27].

Rahman T. A. Z., Esnek bir kiriş sisteminin aktif titreşim kontrolü üzerine çalışmışlardır. Model tanımlama ve kontrol tasarımı, her iki durumda da optimal parametreleri aramak için kaotik fraktal arama algoritmasının kullanıldığı bir optimizasyon problemi olarak ele almışlardır. Optimizasyon algoritması sistemin gerçek ve tahmin edilen çıktıları arasındaki ortalama kare hatasını en aza indirmeye amaçlamışlardır. Böylece, yeterli ve kararlı bir model çıkarabilen algoritma daha iyi bir kontrol stratejisi performansı elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak, simülasyon çalışması, CFS algoritmasının esnek kiriş yapısının yeterli ve kararlı bir modelini çıkarma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir [28].

A Ramaratna, Nader Jalili' ve Darren M. Dawson çalışmalarında sertliğini değiştirebilecek bir piezoelektrik aktüatör eki ile donatılmış esnek bir konsol kiriş üzerine çalışmışlardır. Kiriş ucunun dengeye göre pozisyonuna bağlı olarak sertlik, (yani PZT konfigürasyonu) değiştirilerek, enerji yayılımı en üst düzeye çıkarılmıştır. Kayda değer bir titreşim sönümleme sağlanmıştır. Önerilen hız gözlemcisi ile anahtarlamalı sertlik tekniği kullanılarak esnek kirişler için titreşim sönümlemesinin deneysel çalışması yapmışlardır [29].

Zhi-cheng Qiua ve arkadaşları, PZT sensörleri ve aktüatörleri ile bağlanmış esnek bir konsol plakasının titreşim sönümlemesinin teorik analizini ve deneysel sonuçları üzerine çalışmışlardır. Teorik çalışmalardan ve deneysel sonuçlardan, konsol plakası için sunulan optimal yerleştirme yönteminin uygulanabilir olduğunu gözlenmiştir. İki dereceli Butterworth bant geçiren filtre ve çoklu piezoelektrik seramiklerin ortalama etkisi kullanılarak, bükülme ve burulma modlarının ayrılması gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Kapalı döngü bant genişliğinde yayılma sorunu önlenmektedir. Gerçek süreç üzerindeki simülasyonlar ve deneysel sonuçlar, PPF (olumlu konum geri besleme) ve PD'yi birleştirerek önerilen kontrol yönteminin, özellikle titreşim bozulma işlemi ve daha küçük genlik titreşimi için titreşimi etkili bir şekilde sönümleyebildiğini göstermiştir [30].

Li Sui, Xin Xiong Gengchen Shi çalışmalarında yeni bir PZT motor montajı konsepti sunmuşlardır. Aktüatör tasarımı, aktif motor montaj sistemindeki kilit parçadır, bu çalışma PZT aktüatör tasarımı için bir konsept olduğu sunulmuştur. PZT

aktüatör matematiksel modelini mevcuttur. Simülasyon sonucu, aktif PZT motor takozunun çok iyi bir izolasyon performansına sahip olduğunu ve yaklaşık %80 titreşimi azaltabildiğini ve hem düşük hem de yüksek frekansta çok iyi hareket edebildiği sonucunu elde etmişlerdir [31].

Xing Shen yapmış oldukları çalışmada, ucuna gömülü bir çift piezoelektrik aktüatörlü bir rüzgâr tüneli üzerine çalışmışlardır. Üç algoritmanın etkinliğini doğrulamak için LabVIEW FPGA modülüne dayanan bir ölçüm ve kontrol sistemi oluşturulmuştur. Klasik bir PD, bir NNPID (yapay sinir ağı PID) ve bir LQR kontrol cihazı ayrıntılı olarak tasarlanmıştır. Aktif sönümleme değerlendirme testlerinde, tüm kontrolörler için, sokma modunun yer değiştirme tepkisinin %80'inden fazlasının ortadan kaldırılabilceği bulunmuştur. Tipik olarak, NNPID ve LQR titreşimin yaklaşık %90'ını sönümlemektedir. Deneylerin başarısı, algoritmaların yeni uygulama alanını kanıtlamaktadır ve rüzgâr tüneli testi için mevcut bir referans olabilecek yenilikçi yöntemleri ön plana çıkarmaktadır [32].

Kermani yapılan çalışmada, PZT parametrelerinin bir PZT'nin performansı üzerindeki etkileri, sistemin dinamik denklemlerinin türetilmesi ve frekans cevabının çalışılan frekans aralığı üzerinden değerlendirilmesini incelemiştir. Bu makalede, PZT kalınlığının titreşimleri sönümlemek için performansını büyük ölçüde etkileyebileceği gösterilmiştir. Bir dizi modu kontrol etmek için tek bir PZT'nin optimum konumunu bulmak, tüm etkin modları kontrol etmek için makul konum gerekmektedir. Bununla birlikte, kontrol edilecek modların sayısı arttıkça gereken enerji de artacaktır. Bu çalışmada elde edilen optimum değerler duruma bağlı olsa da, bu değerleri bulmak için kullanılan yöntemler benzer diğer durumlar için de geçerli olduğu sunulmaktadır [33].

Dan Stancioiu ve Huajiang Ouyang çalışmada, sabit bir hızda hareket eden bir kütlenin kat ettiği kırıta oluşturduğu titreşiminin optimum kontrolünü incelemektedir. Problemin özelliklerinden yararlanmak için, sistem denklemleri, hareketli yük etkisini dikkate alan ve teorik ve sayısal işleme uygun olan hesaplamışlardır. Farklı pratik gereksinimlere dayanan çeşitli kontrol yöntemlerine matematiksel olarak yorumlamış ve sayısal simülasyon ile karşılaştırılmıştır. İncelenen belirli bir husus, aktüatör sayısının ve konumunun etkisi ile ilgilidir.

Aktüatör konumunun kontrol tasarım yöntemini büyük ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Bu bağlamda, aktüatörler destekleyici yapının sadece bir ucuna yerleştirildiğinde, kontrol yönteminin problemin zamanla değişen karakterini hesaba katması gerekmektedir. Sayısal simülasyon ile zaman ayarlı denetimin, zamanla değişmeyen kontrolden daha fazla titreşim azalmasına yol açtığı ve farklı performans indekslerinin optimal kontrol çözümünün etkilediği bulunmuştur. Riccati denklemi yöntemi kullanılarak bu soruna iyi bir çözüm sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır [34].

SM Khot ve ekibi makalede, konsol kirişin aktif titreşim kontrolü, piezoelektrik sensör/aktüatör ve PİD tabanlı çıkış geri besleme kontrolörü kullanılarak çalışılmıştır. Kontrolörün tasarımı için gerekli olan kirişin matematiksel modeli, ANSYS'de yapılan modal analiz sonuçlarından MATLAB'da çıkarılır. MATLAB ve ANSYS modellerinin geçici yanıtlarının, model çıkarma sürecini doğrulayan yakın bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Daha sonra model boyutsuzlaştırma yapılır ve tam ve modellerin cevapları karşılaştırılır ve bunlar da yakından eşleştirilir. Bu şekilde elde edilen kiriş modelleri daha sonra SIMULINK'te PİD tabanlı bir çıkış geri besleme kontrolörü tasarlamak için kullanılmıştır. Modellerin tepkilerinin birbirine yakın olduğunu bulmuşlardır [35].

Zhang, James ve Mills çalışmalarında, Modal gerilme hızı geri beslemesine (MSRF) dayanan modal filtreler ve ikinci kompensatörler (bir nevi takoz) kullanılarak bağlanmış üç PZT kontrol çifti ile esnek mafsallara sahip hareketli bir 3-PRR paralel manipülatör için aktif bir titreşim kontrol stratejisi için deney düzeneği hazırlanmıştır. Kalıcı filtreler basitleştirilmiştir ve deneysel kip testleri ile onaylanan varsayılan mod şekilleri ile tasarlanmıştır. Aktif titreşim kontrol deneyleri, bir esnek mafsal ile uygulanan bir, iki veya üç PZT kontrol çifti ile gerçekleştirilir. Deneysel sonuçlar, mafsal titreşiminin, aynı anda üç PZT kontrol çifti kullanılarak önerilen kontrol stratejisinde etkili bir şekilde azaltıldığını, dolayısıyla üç PZT kontrol çiftinin bir bağlantı üzerinde aynı anda kullanılmasının doğru olduğunu göstermektedir. Titreşim kontrol deneyleri, bu çalışmada kontrol için hedeflenen birinci mod, deneylerde ara bağlantıların titreşiminin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir [36].

J. W. SOHN Bu çalışmada, akıllı esnek bir kirişin titreşim kontrolü ve pozisyon izleme kontrolünü SMA tel aktüatörleri kullanılarak yapılmıştır. Kirişin hareket

denklemleri, SMA aktüatörünün dinamik özellikleri değerlendirildikten sonra elde edilmiştir. Etkili kontrol performansı için parametre varyasyonu ve dış bozulma üzerinde doğal bir sağlamlığa sahip olan, kayan mod kontrol cihazı tasarlanmıştır. Zorlanmış titreşim kontrolü ve uç pozisyon izleme kontrolü üzerine deneysel araştırma yapılmış ve bilgisayar simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Sağlam kayar mod kontrolüne sahip SMA aktüatörlerinin, aktüatör belirsizliği (ısıtma ve soğutma aşamaları arasındaki tepki süresi farkı) ile nispeten büyük yer değiştirme özellikli titreşim ve izleme kontrolü için iyi kontrol performansları sağladığı gözlenmiştir [37].

Arun P Parameswaran ve KV Gangadharan Bu çalışmada, RTC platformunun yanı sıra normal GPOS'ta (genel amaçlı işletim sistemi) AVC Stratejilerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını vurgulamaktadır. GPOS platformunda yürütülen kontrol, deterministik olmadığı gözlenmiştir. GPOS'un zaman-çoğullamalı yapısı sonucu olduğu benimsenmiştir. Labview uygulamasının Win7 üzerinde yapılan deneyde işlemcinin tam verimli olarak çalışmadığı görülmüştür. Bu nedenle, aktif titreşim kontrolü elde edilmiş olsa da sonuçlar, kirişin dinamiklerinde tutarsız sonuçlar göstermiştir. Ancak, aynı kontrol stratejilerinin gerçek zamanlı olarak uygulanmasıyla, sistemin operasyonel verimliliğini ve kararlılığını arttırdığı izlenmiştir. Bu nedenle, akıllı sistemlerin titreşim kontrolü deneysel çalışmalarında, stratejilerin kesinlikle gerçek zamanlı bir platformda tasarlanması ve uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır [38].

Sarah Deif ve arkadaşları Tek mafsallı esnek bir kirişin konum ve titreşim kontrolü için deney düzeneği hazırlamıştır. Yeni bir mutasyon operatörü ve üç farklı objektif fonksiyon tanımlamış ve bir PD kontrolörün geri besleme kazanımlarını ayarlamak için karşılaştırılmıştır. Modifiye edilmiş GA'nın çok amaçlı optimizasyon konseptiyle kombinasyonu, daha hızlı bir yakınsama, optimum çözüme ulaşmak için yüksek başarı oranı ve mafsal açısı konumlandırma ve titreşim sönümlemede daha iyi bir kontrol sağladığı görülmüştür [39].

1.2 Tezin Amacı

Aktif titreşim kontrolü, titreşimi kontrol etmek için elektrikli aktüatörler kullanan bir yöntemdir. Aktüatörler, titreşimi dengelemek için sisteme titreşim enerjisi

uygular. Aktif titreşim kontrolü, pasif titreşim kontrolüne göre daha etkili bir yöntem olabilir, aktif kontrol sistemleri, titreşimi gerçek zamanlı olarak takip edebilir ve düzeltebilir kapasiteye sahiptirler.

Aktif titreşim kontrolünün amacı, titreşimi azaltmak veya ortadan kaldırmaktır. Titreşim, makinelerin ve diğer mekanik sistemlerin performansını ve verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Titreşim, makinelerin arızalanmasına da neden olabilmektedir. Aktif titreşim kontrolü, titreşimi azaltarak bu sorunların önlenmesine etkin bir çözüm sunmaktadır.

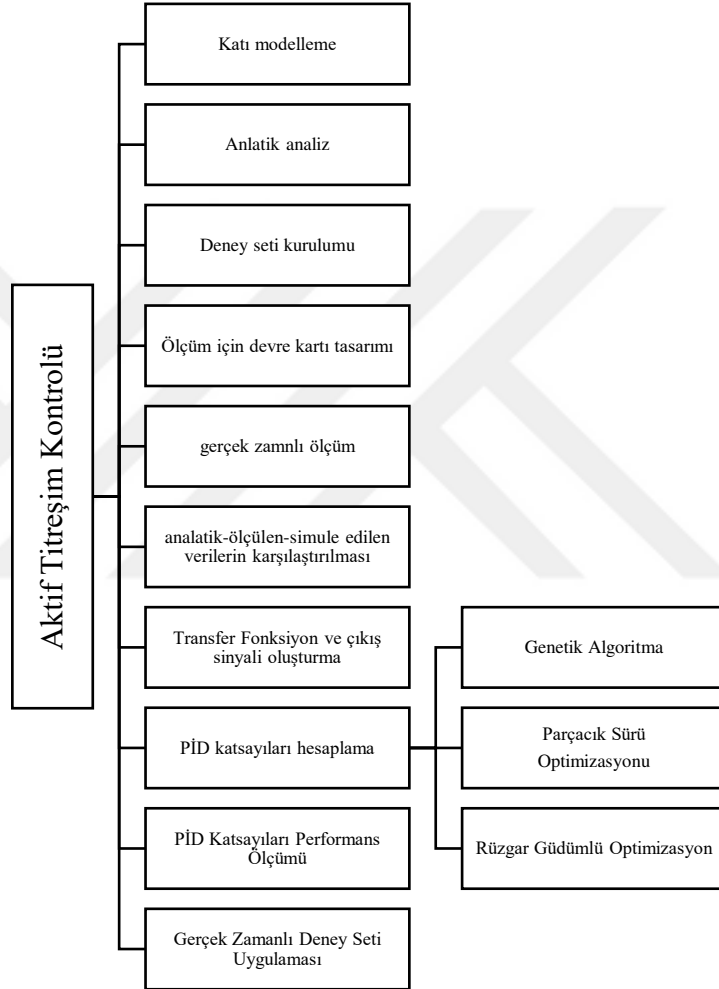
Aktif titreşim kontrolünün bir başka amacı da titreşimi kontrol ederek sistemin performansını iyileştirmektir. Örneğin, aktif titreşim kontrolü, bir makinenin hassasiyetini artırabilir veya bir makinenin titreşimden kaynaklanan gürültüsünü azaltabilmektedir. Aktif titreşim kontrolü, çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin, aktif titreşim kontrolü, makinelerde, uçaklarda, köprülerde ve diğer yapılarda kullanılmaktadır. Aktif titreşim kontrolü, karmaşık bir konudur ve iyi bir şekilde tasarlanması için makine mühendisliği, elektrik mühendisliği ve kontrol mühendisliği gibi çeşitli alanlardan bilgi gerektirmektedir.

Aktif titreşim kontrolü ile ilgili bazı yaygın araştırma konuları şunlardır: Aktüatörlerin tasarımı ve performansı, Kontrol sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu, Titreşim modelleme ve simülasyon, Aktif titreşim kontrolü için yeni algoritmalar geliştirilmektedir. Aktif titreşim kontrolü, makine mühendisliği ve diğer mühendislik alanlarında önemli bir gelişmedir. Aktif titreşim kontrolünün gelişmesi ile titreşimi azaltmak ve ortadan kaldırmak için daha etkili yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir.

Özetle tezin amacı: ankastre mesnetlenmiş kirişte oluşan titreşimi aktif olarak sönmölemek için gerekli PİD parametrelerinin meta sezgisel yöntemlerle performans incelemesi gerçekleştirilmiştir.

1.3 Tez Organizasyonu

Bu tez çalışması için öncelikle deney seti hazırlanmış, deney seti ile Ansys ile analiz edilmiş, analitik olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar ile modellemesi gerçekleştirilmiş ve sistem cevabı elde edilmiştir. Deneyel çalışma için deney seti hazırlanmış, deney setinden ölçülen ile hesaplanan değerler karşılaştırılmış ve deney setinin güvenilirliği ispatlanmıştır.

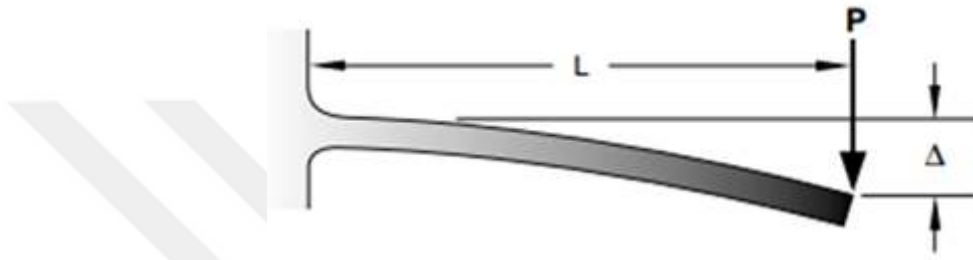


Şekil 1 Aktif Titreşim Kontrolü Adımları

Daha sonra transfer fonksiyon elde edilmiş ve birim basamak cevabına göre PİD katsayıları için Rüzgâra Dayalı Optimizasyon (WDO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Genetik Algoritma (GA) kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. MATERİYAL VE YÖNTEMLER

Ankastre kiriş, bir ucundan sabitlenmiş ve diğer ucundan serbest bırakılmış olan bir kirdiştir. Ankastre kirdişler, köprülerde, binalarda ve diğer yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ankastre kirdişler, normal kirdişlere göre daha karmaşık bir davranışa sahiptir. Ankastre kirdişlerde, sabit uğta bir moment ve serbest uğta bir yer değiştirme oluşur. Ankastre kirdişler, normal kirdişlere göre daha fazla moment ve daha az yer değiştirmeye sahiptir.



şekil 2 Ankastre Kiriş

Ankastre kirdiş modelleri, ankastre kirdişlerin davranışını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Ankastre kirdiş modelleri, ankastre kirdişlerin moment ve yer değiştirmelerini hesaplamak için kullanılmaktadır.

Ankastre kirdiş modelleri, aşağıdaki gibi çeşitli yöntemlerle oluşturulabilir:

Deneyisel yöntem: Ankastre kirdişler üzerinde deneyler yapılarak elde edilen veriler kullanılarak ankastre kirdiş modelleri oluşturulabilir.

Teorik yöntem: Ankastre kirdişler için geçerli olan matematiksel denklemler kullanılarak ankastre kirdiş modelleri oluşturulabilir.

Hesaplama yöntemi: Bilgisayar yazılımları kullanılarak ankastre kirdiş modelleri oluşturulabilir.

Ankastre kiriş modelleri, ankastre kirişlerin tasarımı ve analizi için önemli bir araçtır. Ankastre kiriş modelleri, ankastre kirişlerin güvenli ve verimli bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olmaktadır.

Ankastre kiriş modelleri ile ilgili bazı yaygın araştırma konuları şunlardır:

- Ankastre kirişlerde moment ve yer değiştirmelerin analizi
- Ankastre kirişlerde titreşimin analizi
- Ankastre kirişlerde burkulma analizi
- Ankastre kiriş modellerinin doğruluğu ve güvenilirliği

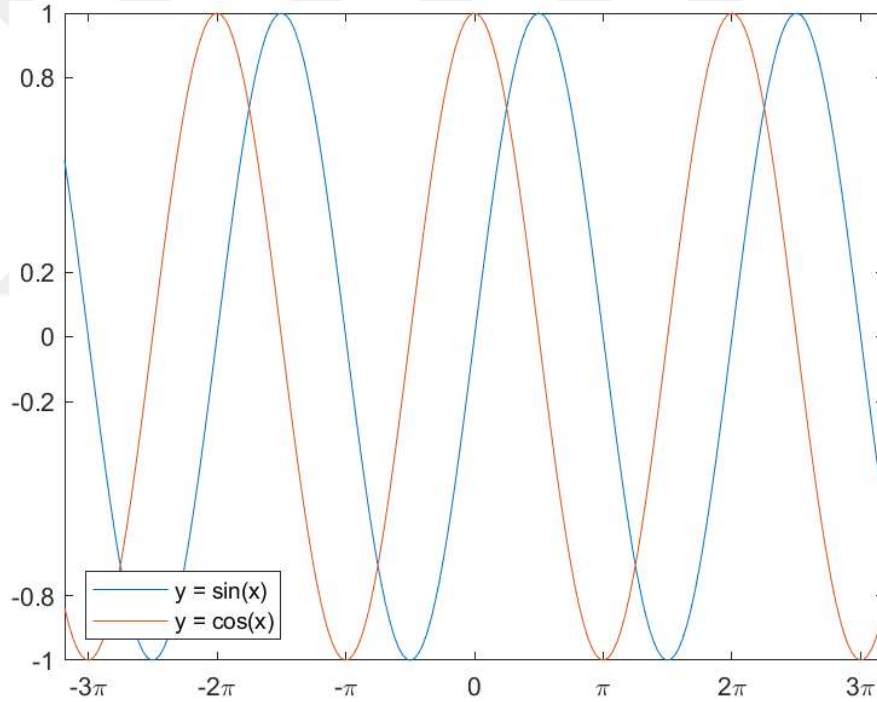
Ankastre kiriş modelleri, ankastre kirişlerin davranışını anlamamıza ve ankastre kirişlerin tasarımını ve analizini iyileştirmemize yardımcı olan önemli bir araçtır. Bu bölümde ankastre mesnetlinmiş kirişlerin hareket denklemleri ve sınır şartları elde edilmiştir. Hareket denklemleri ve sınır şartları Hamilton prensibi yardımıyla elde edilmiştir.

Daha önce yapılmış olan matematiksel hesaplama ek olarak ANSYS programı ile modal analiz yapılmıştır. Çalışma için deney düzeneği hazırlanmış olup, bu deney düzeneği önce modellenmiştir. Kiriş modeli üzerine çalışılması için modelden ayrılmıştır ve kiriş modeli üzerinde gerekli analiz çalışmaları incelenmiştir. Modal analizde kirişin ilk modu örneklenmiş olup, harmonik kuvvet cevabı için sonuçlar elde edilmiştir.

2.1 Mekanik Titreşimler

Dinamiğin bir alt kolu olan titreşim tekrarlanan hareketler ile ilgilenir. Müzikal enstrümanların birçoğunda, bilhassa telli enstrümanlarda, titreşim aranılan bir olaydır. Öte yandan titreşim birçok mekanik sistem için istenmeyen, bazı durumlarda da yıkıcı bir durumdur. Örneğin uçak gövdesindeki titreşimler yorulmaya neden olur ve sonuç

olarak hasara yol açar. Deprem kaynaklı titreşimler binalarda çatlaklara ve hasarlara sebep olabilmektedir. Günlük hayatta titreşim sıkça karşılaşılan bir etkidir ve genellikle titreşim seviyelerinin azaltılması temel ilgi alanıdır. Titreşim, cisimlerin sabit bir referans eksene veya nominal bir pozisyona (denge konumu) göre tekrarlanan hareketi olarak ifade edilir. Titreşim her yerde mevcut olan ve mühendislik tasarımlarının yapısını etkileyen bir olgudur. Titreşim karakteristikleri mühendislik tasarımları için belirleyici faktör olabilir. Titreşim bazen zararlı olabilir ve kaçınılmalıdır, bazen de oldukça yararlıdır ve istenilir. Her iki durumda da titreşimin nasıl analiz edileceği, ölçüleceği ve kontrol edileceği mühendislik için önemli bir bilgidir. Titreşim teorisi cisimlerin ve ilgili kuvvetlerin salınımlı (oscillatory) hareketleri ile ilgilenir. Şekil 3’de görülen salınımlı hareket Harmonik Hareket olarak adlandırılır. [38]



Şekil 3 Basit Harmonik Hareket

Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır. Bu salınımlar bir sarkacın hareketi gibi periyodik olabileceği gibi çakıllı bir yolda tekerleğin hareketi gibi rastgele de olabilir ve aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$x(t) = X \cos \omega t \quad (2.1)$$

Titreşim bazen arzu edilir. Örneğin; bir akort çatalının, üflemeli çalgılarda veya mızıkada dilin, veya bir hoparlörde koninin hareketi birçok aletin doğru kullanılması için gerekli olan arzu edilir titreşimdir.

Daha sıklıkla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcar ve istenmeyen ses ve gürültü oluşturur. Örneğin, motorların, elektrik motorlarının ya da herhangi mekanik aracın çalışma esnasındaki hareketi istenmeyen titreşimler üretir. Böyle titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler.

Ses ve titreşim çalışmaları birbirleriyle oldukça yakın şekilde bağlantılıdır. Ses, basınç dalgaları, ses telleri gibi yapıları titreştirerek oluşturulur ve basınç dalgaları da kulak zarı gibi yapıların titreşimine sebep olur. Bu yüzden, gürültüyü azaltmaya çalışmak sıklıkla bir titreşimi azaltma problemidir.

2.2.1 Titreşim türleri

Serbest titreşim, bir başlangıç hareketi verilen ve sonra serbestçe salınmaya bırakılan sistemlerde oluşan titreşim türüdür. Bir çocuğu salıncakta sallarken ardından itirmek ve sonra serbest bırakmak veya bir akort çatalına vurmak ve sonra salınmaya bırakmak bu titreşim türünün bir örneğidir. Mekanik sistem, doğal frekansları ve sönümlemelerin bir veya daha fazlasında hareketsiz olana kadar titreme hareketi gerçekleştirir.

Zorlamalı titreşim, mekanik bir sisteme zamanla değişen bir etki (yük, yer değiştirme, hız veya ivme) uygulandığı zaman dilimidir. Bu etki, periyodik ve kararlı durum girişi, geçici giriş veya rastgele giriş olabilmektedir. Periyodik girdi, harmonik veya harmonik olmayan bir etki olabilir. Bu tür titreşimler bir dengesizlik nedeniyle çamaşır makinesinin sallanması, bir motorun veya bozuk yolun neden olduğu taşıma titreşimi veya depremde binanın titreşimi örnek olarak verilebilir. Doğrusal sistemler için periyodik, harmonik bir girdinin uygulanmasından kaynaklanan kararlı durum

titreşim tepkisinin frekansı, uygulanan kuvvetin veya hareketin frekansına eşittir ve tepki büyüklüğü gerçek mekanik sisteme bağımlı bir değişkendir.

Sönümlü titreşim: Titreşimli sistemin enerjisi sürtünme ve diğer dirençler tarafından kademeli olarak dağıtıldığında, titreşimlerin sönümlendiğinden bahsedilir. Titreşimler kademeli olarak azalır veya frekansı veya yoğunluğu değişir veya durur ve sistem denge konumunda kalır. Bu tür titreşime bir örnek, amortisör tarafından sönümlenen araç süspansiyonu ‘dur.

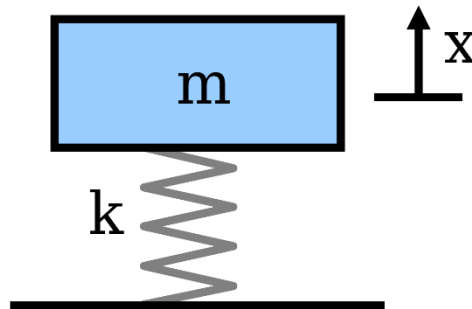
2.1.1 Titreşim Analizi

Titreşim analizinin temelleri, basit kütle-yay-sönüm elemanı modeli incelenerek anlaşılabilir. Aslında bir otomobil gibi karmaşık bir yapı dahi bir basit kütle-yay-sönüm modellerinin toplamı olarak modellenenir. Kütle-yay-sönüm modeli ise bir basit harmonik osilatör örneğidir ve bu yüzden bunun davranışını tanımlamak için kullanılan matematik RLC devresi gibi diğer basit harmonik osilatörlerdeki ile benzer özellikler göstermektedir.[40]

2.1.2 Sönümsüz Serbest Titreşim

Kütle-yay-sönüm modelini incelemek için sönümün göz ardı edilebilir olduğunu ve kütleye hiçbir dış kuvvetin etkimeğini varsayılmaktadır.

Yay tarafından kütleye uygulanan kuvvet yayın uzaması “ x ” ile orantılıdır (Yayın kütlenin ağırlığı dolayısıyla sıkıştırıldığını varsayıyoruz). Orantı sabiti, “ k ” yayın direngenliğidir ve birimi kuvvet/uzama cinsindendir.



Şekil 4 Kütle Yay Sistemi

$$F = -cv = -c\dot{x} = -c \frac{dx}{dt} \quad (2.2)$$

Kütle üzerindeki kuvvetleri toplayarak aşağıdaki adi diferansiyel denklemi elde ederiz:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.3)$$

Kütle tarafından üretilen kuvvet ise Newton'un ikinci hareket kanununda verilen kütlenin ivmesiyle orantılıdır:

Bu denklemin çözümü sönümün miktarına bağlıdır. Eğer sönüm yeterince küçükse sistem titreşecek fakat zaman geçtikçe titremesi sona erecektir. Bu durumda sistem az sönümlü olarak ifade edilir titreşim analizinin en çok ilgi çeken kısmıdır. Eğer sönümü sistemin artık salınmadığı noktaya kadar aratılırsa kritik sönüme ulaşılmış olur (eğer sönümü kritik sönümün üzerine de çıkarırsak sistem aşırı sönümlü sistem olarak adlandırılır). Kütle yay sönüm modelinde kritik sönüm için sönüm katsayısının ulaşması gereken değer denklem 2.4'te verilmiştir.

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (2.4)$$

Sistemdeki sönümü tanımlamak için sönüm oranı (sönüm faktörü ve % kritik sönüm de denir) denen bir oran kullanılır. Bu oran sistemdeki gerçek sönümün, kritik sönüme ulaşması için gereken sönüme oranıdır. Kütle yay sönüm modeli için sönüm oranı (ζ) formülü ise denklem 2.5'te verilmiştir.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{c_c} \quad (2.5)$$

Örneğin; metal yapılar (uçak gövdeleri, motor krank milleri gibi) 0.05 den daha küçük sönümleme faktörlerine sahipken, otomotiv süspansiyonları 0.2-0.3 aralığındadır.

Az sönümlü kütle yay sönüm sistemi için çözüm denklem 2.6 da verilmiştir.

$$x(t) = X e^{-\zeta \omega_n t} \cos \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t - \phi, \omega_n = 2\pi f_n \quad (2.6)$$

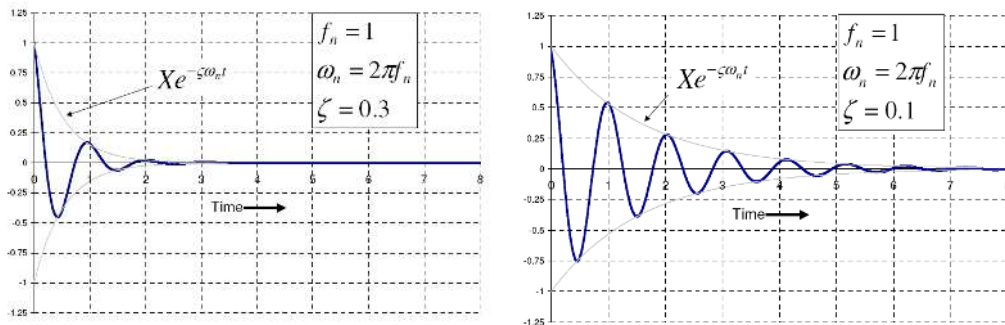
Başlangıç genliği “X” ve faz farkı “Ø” yayın ne kadar sıkıştırıldığına göre değişir. Bu değerlerin formülleri referanslarda bulunabilir.

Bu çözümde fark edilmesi gereken önemli nokta eksponansiyel terim ve kosinüs fonksiyonudur. Eksponansiyel terim sis temin ne kadar hızlı sönüleceğini belirleyen terimdir, sönüm oranı büyüdükçe sistem daha hızlı sönümlenmektedir. Kosinüs fonksiyonu ise çözümün salınım yapan kısmıdır ve salınımın frekansı sönümsüz durumdan farklı olmaktadır.

Bu durumdaki frekansa sönümlü doğal frekans, ω_d , denir ve 2.7 de belirtilen denkleme göre sönümsüz doğal frekansla ilişkilidir.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.7)$$

Sönümlü doğal frekans sönümsüz doğal frekanstan daha düşüktür, fakat birçok pratik durumda sönüm oranı göreceli olarak küçüktür ve bu yüzden aradaki fark göz ardı edilebilir. Bu yüzden sönümlü ve sönümsüz tanımlamalar, doğal frekanstan bahsedildiğinde, büyütülmüş olur.



Şekil 5 Sönüm Oranı Farkı

Şekil 5 de 0.1 ve 0.3 katsayıları ile sönüm oranlarının zaman geçtikçe sistemin sönümlenmesini nasıl etkilediğini göstermektedir. Pratikte sıklıkla yapılan ise bir darbeden sonra (örneğin; bir çekiçe vurduktan sonra) deneysel olarak serbest titreşimi ölçmektir ve bundan sonra salınım oranını ölçerek sistemin doğal frekansı hesaplanır ve düşüş oranı ölçülerek sönüm oranı bulunur. Doğal frekans ve sönüm oranı sadece serbest titreşimde değil aynı zamanda sistemin zorlama altındaki titreşiminde nasıl davranacağını da belirler.

2.1.3 Sönümlü Zorlamalı Titreşim

Bu bölümde kütle yay sönüm modeline formülü aşağıdaki gibi olan, harmonik değişen bir kuvvet eklediğimizde modelimizin nasıl davranacağına bakacağız. Böyle bir kuvvet örneğin dönmede dengesizlikten kaynaklanabilir.

$$F = F_0 \cos(2\pi f_n t) \quad (2.8)$$

Eğer yine kütle üzerindeki kuvvetleri toplarsak, aşağıdaki adi diferansiyel denklemleri elde ederiz:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos(2\pi f_n t) \quad (2.9)$$

Bu problemin kararlı durum çözümü şu şekilde yazılabilir;

$$x(t) = X \cos(2\pi f_n t - \phi) \quad (2.10)$$

Sonuç, kütle için uygulanan kuvvetle aynı frekansta, f , salınacağını fakat arada bir faz farkı olacağını gösterir. Titreşimin genliği X ise aşağıdaki formülde olduğu gibi tanımlanır:

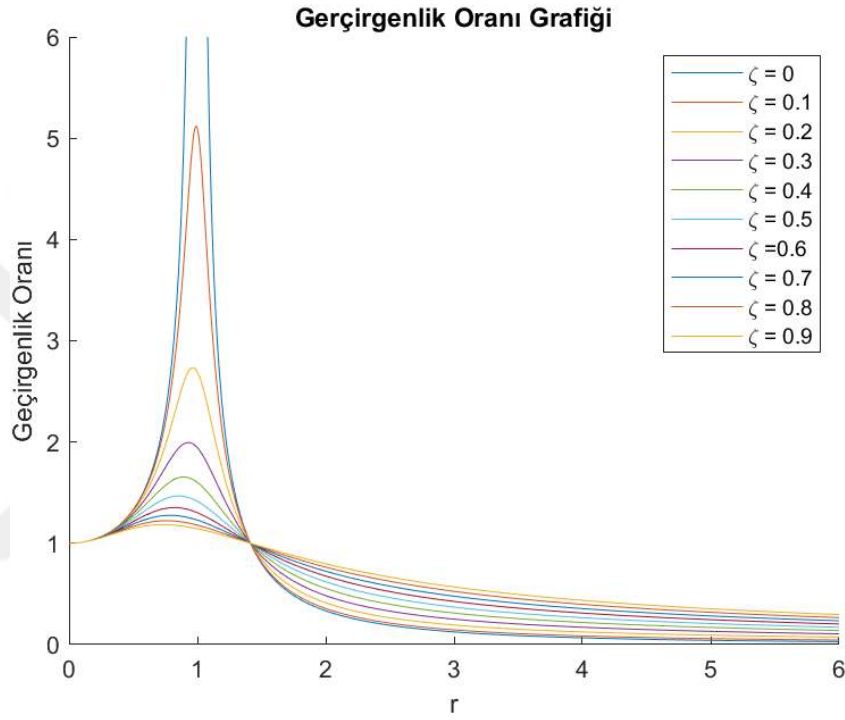
$$\frac{X}{\frac{F_0}{k}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.11)$$

Burada “ r ” harmonik kuvvetin frekansının sönümsüz kütle-yay-sönüm modelinin doğal frekansı olarak tanımlanır.

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.12)$$

Faz farkı, ise aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$\phi = \arctan \left(\frac{2\zeta r}{1 - r^2} \right) \quad (2.13)$$



Şekil 6 Geçirgenlik Oranı

Bu fonksiyonların çizimi, sistemin frekans cevabı denir, zorlamalı titreşimin en önemli özelliklerinden birini gösterir. Zorlama frekansının doğal frekansla hemen hemen aynı olduğu $r \approx 1$ çok az sönümlü sistemlerde titreşimin genliği çok yüksek olabilir. Bu olgu rezonans-mekanik rezonans olarak adlandırılır. (Böyle bir durumda sistemin doğal frekansı sıklıkla rezonans frekansı olarak adlandırılır)

Eğer rezonans mekanik bir sistemde meydana gelirse çok zararlı olabilir bu sistemde nihai bir bozulmaya sebep olabilir. Sonuç olarak titreşim analizinin en önemli sebeplerinden biri rezonansın ne zaman meydana geleceğini tahmin etmek ve gerçekleşmesini önlemek için ne gibi önlemlerin alınacağına karar vermektir. Genlik çizimlerinde görüldüğü gibi, sönüm eklemek titreşimin genliğini önemli derecede azaltır. Aynı zamanda genlik, sistemin kütlesi veya direngenliği

değiştirilerek doğal frekansın zorlama frekansından uzaklaştırılmasıyla da düşürülebilir. Eğer sistem değiştirilemiyorsa, belki zorlama frekansı değiştirilebilir (örneğin kuvvete sebep olan makinenin dönme hızını değiştirerek).

Aşağıdakiler ise zorlamalı titreşimin frekans cevabı çizimleri ile ilgili diğer noktalardır:

Belirli bir frekans oranında, titreşimin genliği, “ X ”, doğrudan zorlamanın genliği F_0 ile orantılıdır. Kuvveti ikiye katlarsanız titreşimde ikiye katlanır.

Çok az ya da sıfır sönümde, titreşim zorlama ile aynı fazdadır ve $r < 1$ dir ve eğer 180 dereceli faz farkı mevcutsa frekans oranı $r > 1$ dir.

r 1’den çok küçükse ($r \ll 1$) genlik sadece statik kuvvet F_0 altındaki yayın uzamasıdır. Bu uzama δ_{st} statik uzama olarak adlandırılır. Bu yüzden $r \ll 1$ olduğunda sönüm ve kütlenin etkileri minimumdur.

$r \gg 1$ iken titreşimin genliği statik uzamadan δ_{st} daha azdır. Bu bölgede kütle tarafından üretilen kuvvet ($F = m \cdot a$) hakimdir, çünkü kütlenin maruz kaldığı ivme frekans arttıkça artar. Bu bölgede yaydaki uzama, X , azaldığından, yay tarafından zemine iletilen kuvvet ($F = k \cdot x$) azalır. Böylece kütle-yay-sönüm sistemi harmonik kuvveti zeminden izole eder—buna titreşim izolasyonu denir. İlginç olarak $r \gg 1$ olduğunda daha fazla sönüm titreşim izolasyonunun etkisini azaltır çünkü sönüm kuvveti ($F = c \cdot V$) de zemine transfer edilmektedir.

2.1.4 Rezonans

Eğer kütle ve yayı enerji depolama elemanları olarak görürseniz rezonansı anlamak çok kolaydır—kütle kinetik enerji depolarken yay ise potansiyel enerji depolar. Daha önce de bahsedildiği gibi, kütle ve yay üzerinde hiçbir kuvvet yoktur, onlar enerjilerini doğal frekansa eşit oranda bir ileri bir geri dönüştürürler. Diğer bir deyişle eğer enerji verimli bir şekilde kütle ve yayın içerisine pompalansaydı enerji kaynağının doğal frekansa eşit oranda beslenmesi gerekirdi. Bir kütle ve yaya bir

kuvvet uygulamak bir çocuğu salıncakta sallamaya benzer, eğer daha yükseğe sallamak istiyorsanız doğru zamanda itirmek zorundasınız. Salıncak örneğinde olduğu gibi daha büyük bir hareket elde etmek için uygulanan kuvvetin illaki çok yüksek olması gerekmemektedir. Bu itmeler sadece enerjinin sistemin içine eklenmesini sağlar.[42]

Sönüm ise enerji depolamak yerine enerjiyi harcar. Sönüm kuvveti hızla orantılı olduğundan, hareket büyüdükçe enerji daha fazla sönümlenir. Böylece sönüm elemanı tarafından sönümlenen enerji ile kuvvet tarafından beslenen enerjinin eşit olduğu bir noktaya ulaşılır. Bu noktada sistem kendi maksimum genliğine ulaşır ve uygulanan kuvvet aynı kaldığı sürece bu genlikte titremeye devam eder. Eğer hiç sönüm yoksa, enerji yutacak hiçbir şey yoktur ve böylece hareket teorik olarak sonsuza gider.

2.1.5 Frekans Cevabı Modeli

Bir titreşim probleminin çözümünü bir girdi/çıkı ilişkisi olarak görebiliriz. Burada kuvvet girdi titreşim ise çıktıdır. Eğer kuvveti ve titreşimi frekans tabanında gösterirsek (genlik ve faz) aşağıdaki ilişkiyi yazabiliriz:

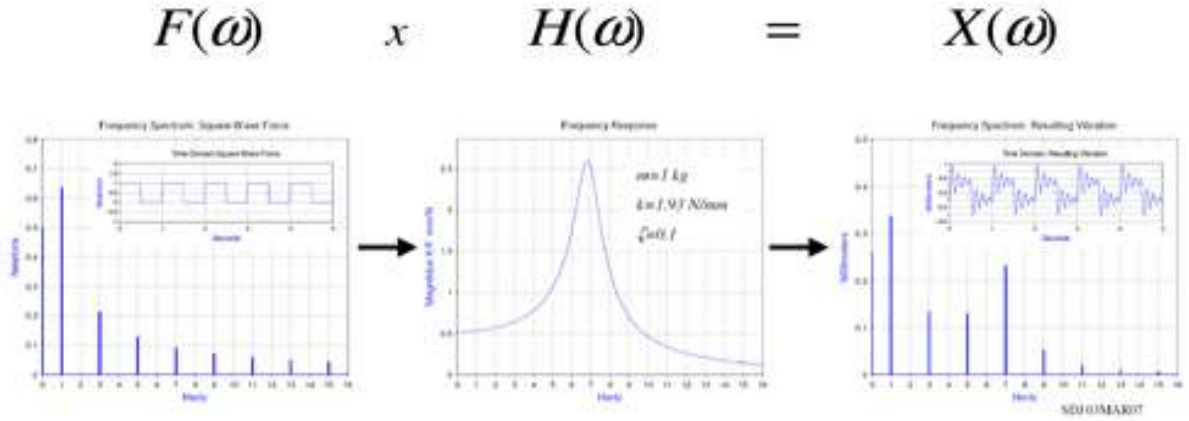
$$X(\omega) = H(\omega) * F(\omega) \quad (2.14)$$

$H(\omega)$ Frekans cevabı fonksiyonu olarak adlandırılır (aynı zamanda transfer fonksiyonu olarak da adlandırılır fakat teknik olarak çok doğru değildir) ve hem genlik hem de faz bileşenlerini (eğer kompleks sayı olarak gösterilirse reel ve sanal bileşenler) içerir. Frekans cevabı fonksiyonunun (FRF-Frequency Response Function) genliği daha önce kütle-yay-sönüm modeli için gösterilmiştir.

$$|H(\omega)| = \frac{|X(\omega)|}{|F(\omega)|} = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.15)$$

Frekans cevabı fonksiyonunun (FRF) sistemin kütlesi, direngenliği ve sönümü bilinerek hesaplanması gerekmez; deneysel olarak da ölçülebilir. Eğer

bilinen bir kuvvet uygulanır ve frekansı ölçümü ve ardından çıkış fonksiyonunu ölçersek frekans cevap fonksiyonunu hesaplayabilir ve böylece sistemi karakterize etmiş olunur. Bu teknik bir yapının titreşim karakteristiklerini belirlemek için deneysel modal analiz alanında kullanılır [55].



Şekil 7 Frekans Cevabı Modeli

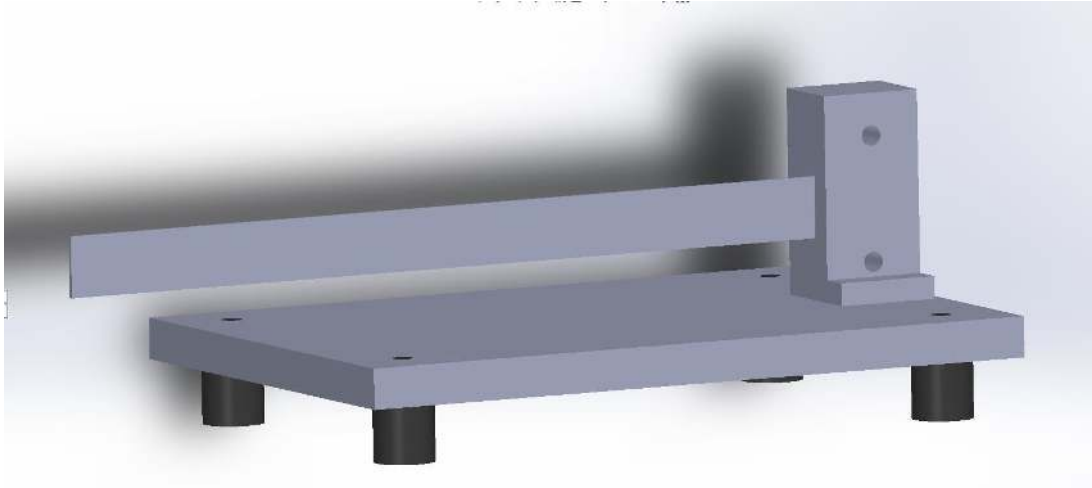
2.2 Deney Seti Modellenmesi

Bu çalışmada teorik olduğu kadar deneysel çalışma üzerine de çalışılmıştır. Deneysel çalışma için fiziksel olarak deney düzeneği modellenmiş ve sonrasında üretilmiştir.

Modelleme için Solidworks kullanılmıştır. Düz bir tabla üzerine mengene sistemi hazırlanmış böylelikle daha sonraki çalışmalar için daha farklı kiriş veya malzeme için uygun hale getirilmiştir. Zemin ile olan izolasyon için ise plastik takoz kullanılmış olup bu takozlar da tablaya vidalanarak sabitlenmiştir.

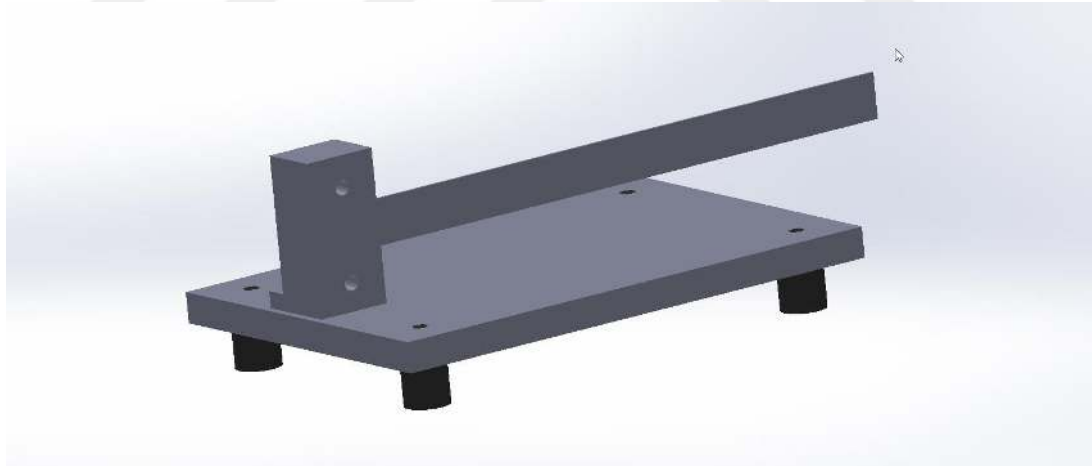
2.2.1 Katı Modelleme

Modellemek için Solidworks programı kullanılmış olup çalıştığımız kiriş ve tabla olarak modellemesi gerçekleştirilmiştir. Alüminyum levha üzerine mesnet için mengene sistemi hazırlanmış ve monte edilmiştir. Yer ile olan titreşim temasını en aza indirmek için 4 adet plastik takoz ile izole edilmiştir.



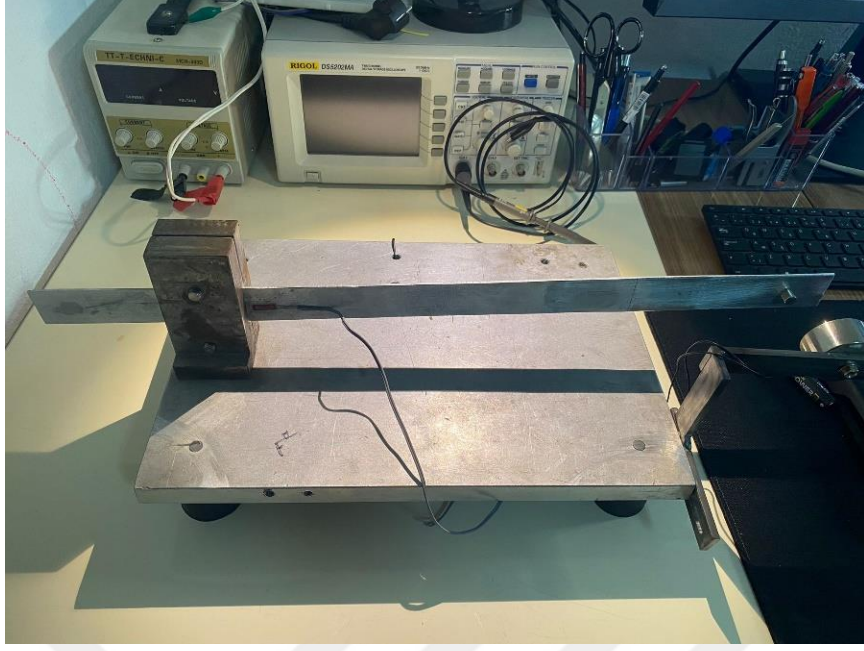
Şekil 8 Deney Seti Önden Görünüş

Deney setinde kullanılan malzemeler alüminyum olarak seçilmiş mengene sistemi için ise demir-çelik alaşımı tercih edilmiştir.



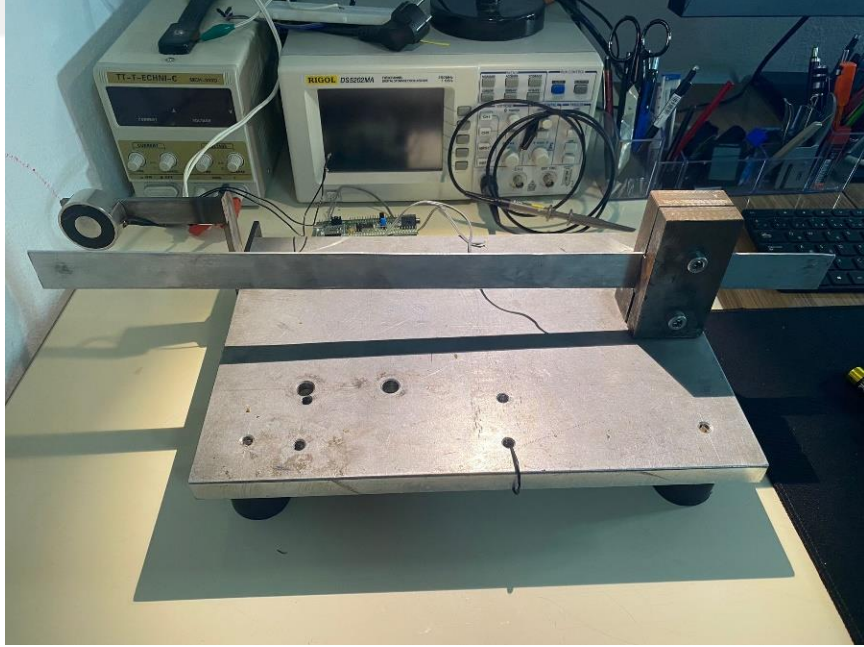
Şekil 9 Deney Seti Arkadan Görünüş

Deney setinde kullanılan kiriş alüminyum malzeme olup 400mm boyunda 2mm kalınlığında ve 30mm kalınlığındadır.



Şekil 10 Deney Seti Önden Görünüş

Alt tabla olarak kalın alüminyum levha kullanılmıştır. Kiriş kontrolü için elektro mıknatıs montajı için tutucu kol eklenmiştir.



Şekil 11 Deney Seti Arkadan Görünüş

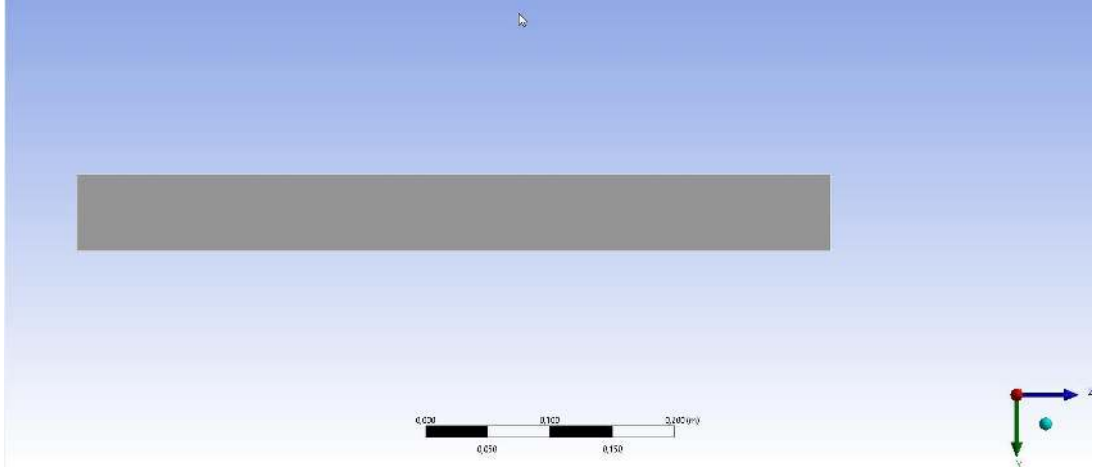
Deney seti modellenip üretildikten sonra analiz için Ansys programı kullanılmıştır. Analitik modelleme için Matlab kullanılmıştır.

2.2.2 Analiz ve Simülasyon

ANSYS, bilgisayar destekli çalışmalarında analiz ve simülasyonların yapılabildiği bir bilgisayar destekli mühendislik programıdır. ANSYS programı yapısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, mekanik ve ısı transferi gibi farklı disiplinlerde etkili çalışmalara olanak verir.

Mühendislik uygulama CAE (bilgisayar destekli mühendislik) programlarının başında gelen ANSYS programı analiz için sonlu elemanlar yöntemini uygulamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile tek parça halinde analizi zor olan iç içe geçmiş geometrideki cisimlerin küçük ve çok sayıda parçalara bölünerek ayrı ayrı analizleri yapılmaktadır. Sonlu sayıdaki elemanın analizi sonucu elde edilen sonuçlar tek ve tutarlı bir analiz sonucu için birleştirilerek elde edilir.

Deney setinde modellenen alüminyum giriş Ansys programı üzerinde modal analiz için tekrardan modellenmiş olup giriş için doğal frekansları elde edilmiştir. Deney setinden elde ettiğimiz ölçümler ile Ansys 'ten elde edilen sonuçlar karşılaştırılacak ve ölçümlerimizin güvenilirliği sağlanmış olacaktır.



Şekil 12 ANSYS Model

Ansyes modelleme yapıldıktan sonra modal analiz ile kiriş için dinamik davranışlarını incelenmiştir.

2.2.3 Modal Analiz

"Modal analiz," bir sistem veya yapının dinamik davranışını inceleyen bir mühendislik ve fizik konseptidir. Bu analiz türü genellikle yapısal mühendislikte, mekanik sistemlerde veya diğer fiziksel sistemlerde titreşimleri ve dinamik tepkileri değerlendirmek için kullanılır. Modal analiz, bir sistemdeki doğal frekansları, modları ve bunlara bağlı olarak titreşim davranışını belirlemeyi amaçlar.[44]

Modal analizde kullanılan temel terimler şunlardır:

Doğal Frekanslar (Natural Frequencies): Bir sistemdeki serbest titreşim frekanslarıdır. Bir yapıyı etkileyen dış kuvvetler olmadan, sadece yapının kendi elastik özellikleri ile titreştiğinde ortaya çıkan frekanstır.

Modlar (Modes): Bir sistemdeki modlar, doğal frekanslara karşılık gelen titreşim desenleridir. Her mod, yapıdaki belirli bir şekildeki deformasyonu temsil eder.

Mod Şekilleri (Mode Shapes): Her modun, yapı içindeki belirli bir şekildeki deformasyonunu gösteren grafik veya çizimlerdir.

Mod Çiftleri (Mode Pairs): Bir yapının modal analizi sırasında, her doğal frekansta genellikle bir çift mod bulunur. Bu mod çiftleri, yapıdaki simetri ve anti simetri durumlarını temsil eder.

Modal analiz, mühendislik tasarımında ve kalite kontrolünde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır, sistemlerin dinamik tepkilerini anlamak, yapıların dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırabilir.

Metal alaşım doğrulama birçok sektörde kritik bir öneme sahiptir. Metal üreticileri ve geri dönüşümcüler zorlu koşullarda metallerin elementel analizini ve kalitesini hızlı bir şekilde belirlemek isterler. Thermo Scientific Niton XL5 taşınabilir XRF analiz cihazları gelişmekte olan metal sektörünün ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmıştır.



Şekil 13 Thermo Scientific Niton XL5



Şekil 14 Thermo Scientific

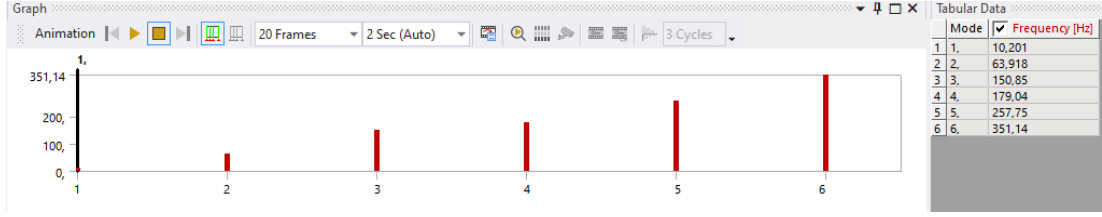
Yapılan ölçümler ile kullandığımız malzemenin alüminyum 6000 serisi 6060 olduğu sertleştirme olarak ise t5 olduğu bulunmuştur. Sertlik için ayrı durajet g5 model malzeme tanımı için Thermo Scientific Niton XL5 ayrı cihaz kullanılmıştır.

6060 tipi malzeme kullanılmış olup üretim kataloğundan elde edilen bilgiler:

Tablo 1 Malzeme Bilgileri

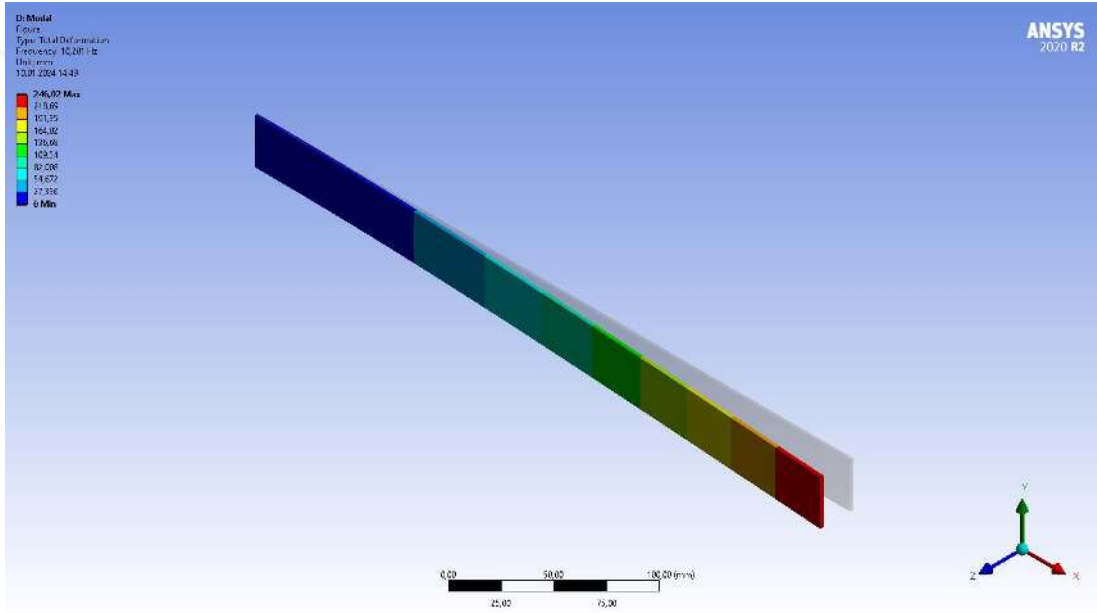
Elastisite Modülü	: 69 GPa
Poisson Oranı	: 0.33
Young Modülü	: 71.6 GPa,
Kayma Modülü	: 27.4 GPa,
Yoğunluk	: 2770 kg/m ³

Mekanik özellikleri Ansys te tanımlanmıştır.



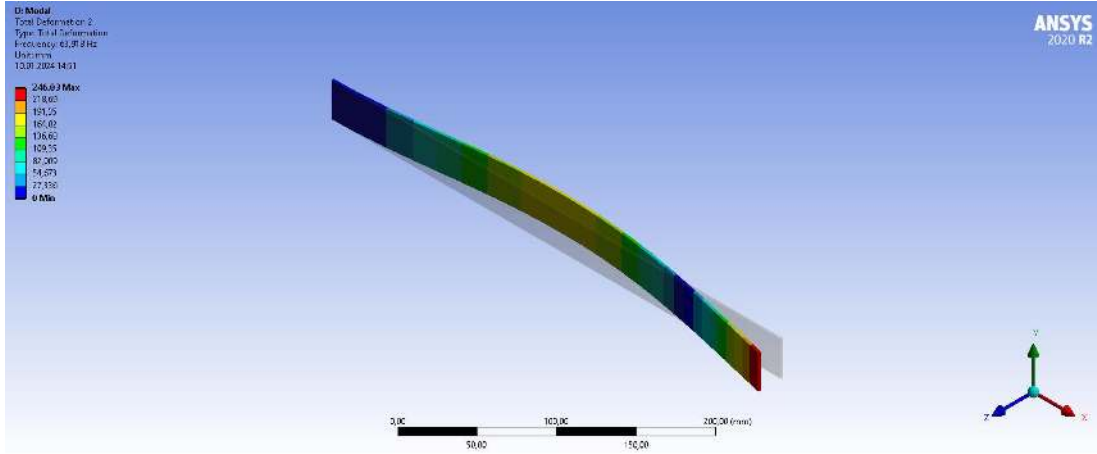
Şekil 15 Mod Frekansları

İlk olarak kirişimizin dinamik davranışını gösteren modelde doğal frekans ve mod frekanslarımızı elde edilmiştir.



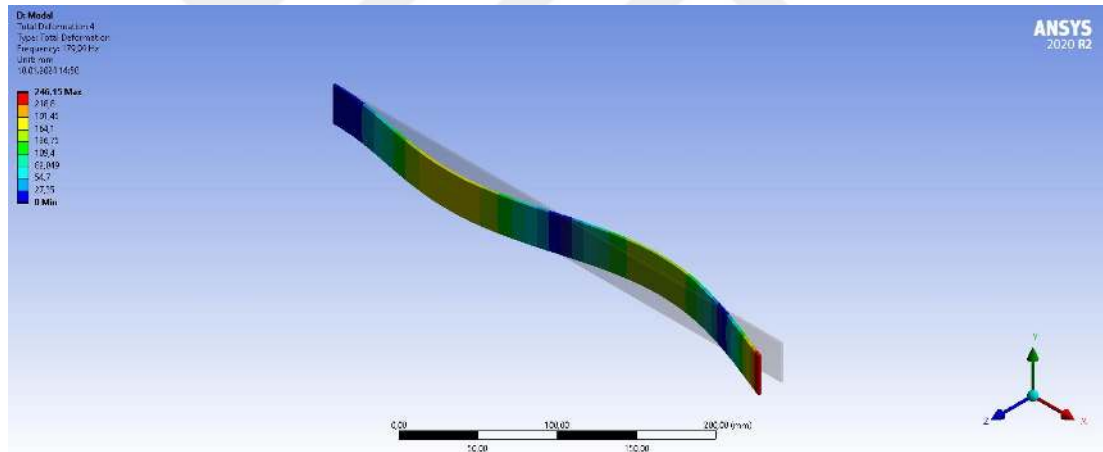
Şekil 16 1. Mod

Ansys ile 1. Mod deformasyonu şekil 16’da gösterilmiştir. Burada kırmızı ile belirtilen alan en çok deplasmana sahip nokta olur en fazla yer değiştiren bölgedir. Mavi yoğunluğu fazla olan kısım ise deplasman az fakat en fazla deformasyona uğrayan bölgedir. Bu sebeple gerinim ölçer bu bölgeye montajı yapılmış olup buradan veriler okunmuştur.



Şekil 17 2. Mod

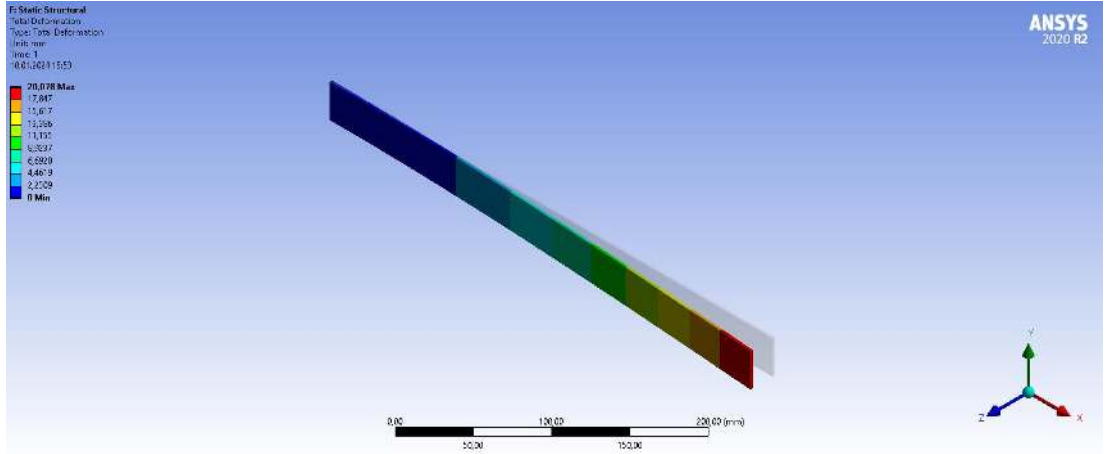
Şekil 14'te kirişin 2. Mod şekli görülmektedir. Ansys ile 2. Mod frekansı 63,918 Hz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 18 3. Mod

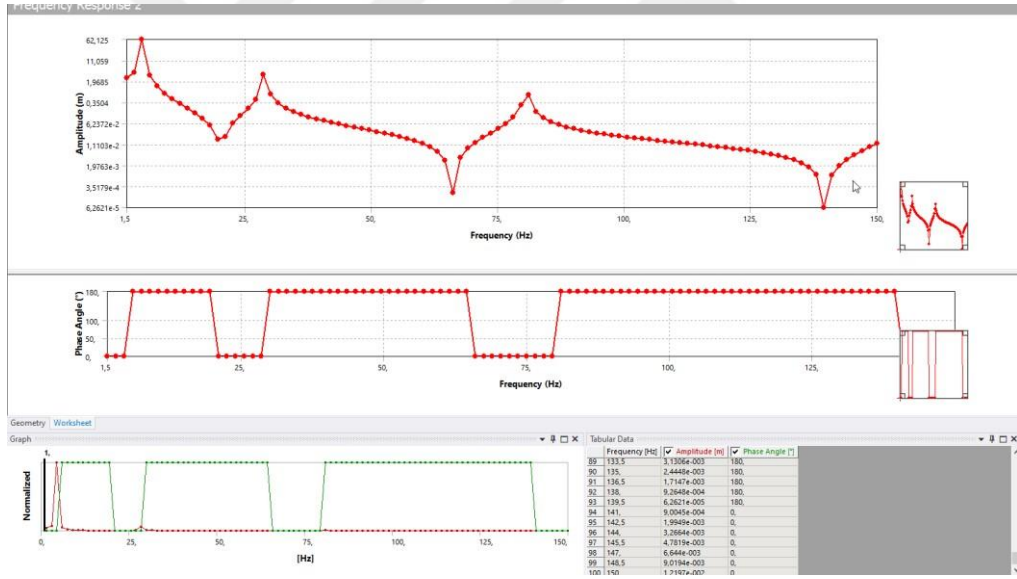
Şekil 14'te kirişin 3. Mod şekli görülmektedir. Ansys ile 2. Mod frekansı 179,04 Hz olarak hesaplanmıştır.

Modal analizden sonra kirişin harmonik sistem cevabı incelenmiştir. Buna göre; 2N harmonik bir kuvvet ile kirişimizde meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir.



Şekil 19 Static Response

Şekil 16 da modellenmiş kirişin statik davranışı incelenmiş olup $1.35N$ kuvvet karşılığında yaptığı deplasman görülmektedir. $20mm$ Deplasman hesaplanmış olup kirişte ani darbe için $20mm$ başlangıç konumu olarak belirlenmiştir.



Şekil 20 Frekans Response

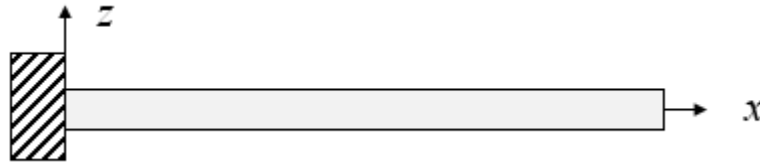
ANSYS yazılımında frekans tepki analizi, bir yapı veya sistem üzerindeki frekansta nasıl davrandığını anlamak için kullanılır. Bu analiz, yapısal mukavemet, titreşimler, rezonans durumları ve benzeri konularda bilgi sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Frekans tepki analizi, bir sistemdeki belirli frekansta meydana gelen deformasyon, stres, titreşim gibi fiziksel etkileri anlamak için önemlidir. Şekil 17 de tepe noktaları bize malzemenin mod frekanslarını vermektedir.

Tablo 2 Ansys Mod Frekansları

	Frekans
1. Mod	10,02Hz
2. Mod	63,81Hz
3. Mod	176,7Hz

2.2.4 Matematiksel Model

Doğal frekans formülü, bir sistem veya yapısal elemanın doğal frekansını hesaplamak için kullanılan bir matematiksel ifadedir. Genel olarak, bir kirişin doğal frekansları, çubuğun elastik özellikleri, geometrisi ve sınırlayıcı koşulları tarafından belirlenir.



Şekil 21 Ankastre Kiriş Modeli

Ankastre mesnetlenmiş bir kiriş için $x = 0$ mesnet ve $x = L_x$ de serbest olan bir kiriş için sınır koşulları şöyledir:

$x = 0$ 'da sabitlenmiş nokta: Bu durum, kirişin sabit uç noktasında dikey yer değiştirmeye veya dönüşe izin verilmediği anlamına gelir. Sınır şartı,

$$w(0) = 0 \quad , \quad \frac{\partial w}{\partial x}(0) = 0 \quad (2.16)$$

Burada $w(0)$ kirişin yer değiştirmesini temsil eder.

$x = L$ Serbest uça, yatay bir kısıtlama olmadığı ve kirişin dönmeye serbest bırakıldığı anlamına gelir.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(L) = 0 \quad , \quad \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(L) = 0 \quad (2.17)$$

Eğilme modları için doğal frekans formülü genellikle şu şekildedir:

$$\omega_n = \alpha_n^2 \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.18)$$

ω_n n' inci modun doğal frekansı,
 k Elastik rijitlik (yay sabiti),
 m Birim uzunluktaki kütlesi.

Bu formül, sistemdeki elastik ve kütsel özelliklerin, belirli bir modun doğal frekansını nasıl etkilediğini ifade eder. Sistemin doğal frekansları genellikle birinci moddan başlayarak sıralanır, yani $n = 1, 2, 3 \dots$

Bu formül, eğilme modları için genel bir formülasyondur ve spesifik bir yapısal elemanın doğal frekanslarını hesaplamak için kullanılmadan önce, yapısal özellikler ve sınırlayıcı koşullar gibi özel bilgilerle daha spesifik hale getirilmesi gerekebilir.

$$\omega_n = \alpha_n^2 \sqrt{\frac{EI}{ml^3}} \quad (2.19)$$

Burada E Elastisite, bir malzemenin deformasyon (şekil değiştirme) uygulandığında orijinal şekline geri dönebilme kapasitesini ifade eden bir özelliktir. Elastisite modeli, malzemenin elastik davranışını matematiksel olarak ifade eden bir modeldir. Elastik malzemeler, uygulanan kuvvet veya gerilme kaldırıldığında orijinal boyutlarına geri dönmektedir.[46]

Elastisite modeli genellikle Hooke'un Yasası ile ifade edilir. Hooke'un Yasası, bir malzemenin elastik davranışını tanımlayan basit bir lineer modeldir ve genellikle düşük gerilme aralığında geçerlidir. Hooke'un Yasası matematiksel olarak şu şekildedir:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.20)$$

Burada:

σ , Gerilme

E , Young Modülü

ϵ , Birim Şekil Değişirme

Bu formül, genellikle basit gerilme durumları için kullanılır ve malzemenin elastik sınırları içinde geçerlidir. Hooke'un Yasası, lineer elastisite teorisinin temelini oluşturur.

Elastisite modelleri genellikle malzemenin davranışını daha karmaşık koşullarda tanımlamak için genişletilebilir. Bununla birlikte, malzemenin elastik sınırları dışına çıkıldığında (yani plastik deformasyon başladığında), elastik olmayan davranışı tanımlayan başka modeller ve yasalar kullanılabilir. Bu durumda, malzeme plastik deformasyona uğradığında kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir. Elastisite modelleri genellikle mühendislik uygulamalarında malzeme tasarımı ve analizi için önemlidir.

Denklem 2.18 de kullanılan “ I ” Kütle momenti ataleti, bir cismin belirli bir eksen etrafındaki dönme direncini ölçen bir özelliktir. Kütle momenti ataleti (veya sadece moment ataleti), bir cismin kütle elemanlarının, bir eksen etrafında nasıl dağıldığına bağlı olarak hesaplanır. Kütle momenti ataleti birimi metrekare cinsindendir. Kütle momenti ataleti, bir cismi döndürmek için uygulanan dönme momenti ile cismin dönme hızı arasındaki ilişkiyi açıklar. Moment ataleti, bir cismin kütle merkezi etrafındaki dönüş hareketini ölçer ve bu, cismin şekli ve kütle dağılımı ile yakından ilişkilidir. Kütle momenti ataleti, farklı geometrik şekillere ve eksenlere göre hesaplanabilir. Örneğin, bir çubuğun kütle momenti ataleti, çubuğun uzunluğu ve dönme eksenine olan uzaklığı ile belirlenir. Bir cismin kütle momenti ataleti genellikle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I = \int r^2 dm \quad (2.20)$$

Burada:

I , Kütle atalet momenti

r , Kütle elemanının dönme eksenine olan uzaklığı

dm , Kütle diferansiyel elemanını ifade eder

Bu integral, cismin tüm kütle elemanları üzerinde entegre edilir. Farklı geometrik şekillere sahip cisimler için kütle momenti ataleti hesaplamak için spesifik formüller kullanılır. Örneğin, bir silindirin veya düz bir disk veya halkanın kütle momenti ataleti için özel formüller mevcuttur.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.21)$$

Bu durumda yüksüz bir konsol kiriş için Euler-Lagrange denkleminin normal mod çözümleri şöyledir:

$$\omega_n = \alpha_n^2 \sqrt{\frac{EI}{ml^3}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.22)$$

Buna karşılık gelen doğal frekans formülü şu şekilde elde edilmiştir:

$$y_i(x) = \cosh\left(\frac{\alpha_i x}{L}\right) - \cos\left(\frac{\alpha_i x}{L}\right) - \sigma_i \left(\sinh\left(\frac{\alpha_i x}{L}\right) - \sin\left(\frac{\alpha_i x}{L}\right) \right) \quad (2.23)$$

$$\sigma_i = 0,73409, 1,018647, 0,9992245, \dots \quad (2.24)$$

$$\alpha_n = 1,875, 4,694, 7,855 \quad (2.25)$$

İlk olarak kirişimizin dinamik davranışını gösteren modelde doğal frekans ve mod frekanslarımızı elde edilmiştir. Yapılan matematiksel çözüm ile burada elde ettiğimiz sonuçlarda paralellik yakalanmıştır.

$$m = \rho V = \rho . l . h . b \quad (2.26)$$

2.3 Gerçek Zamanlı Donanım Kurulumu

Bu tür bir deney seti, yapıların titreşim kontrolü yöntemlerinin gerçek zamanlı olarak test edilmesi ve analiz edilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Gerçek zamanlı aktif titreşim kontrolü, bir yapı üzerindeki titreşimi azaltmak veya kontrol etmek için sensörler, kontrol cihazları ve aktüatörler gibi bileşenlerin kullanıldığı bir tekniktir. Bu kontrol sistemi, yapı üzerindeki dinamik yükleri ölçer, analiz eder ve anında tepki göstererek yapıdaki titreşimleri sınırlar.

Bir gerçek zamanlı aktif titreşim kontrolü deney seti genellikle aşağıdaki öğeleri içerir:

Sensörler: Yapı üzerindeki titreşimleri ölçmek için kullanılır.

Kontrol Cihazları: Sensörlerden gelen verileri analiz eder ve yapıya uygulanacak kontrol sinyallerini belirler.

Aktüatörler: Yapı üzerine kontrol sinyallerini uygular ve bu sayede titreşim kontrolü sağlar.

Veri Toplama Sistemleri: Deney sırasında elde edilen verileri kaydedip analiz etmek için kullanılır.

Bu tür bir deney seti, çeşitli kontrol algoritmalarını test etmek, yapıların dinamik özelliklerini anlamak ve gerçek zamanlı titreşim kontrol sistemlerini geliştirmek için kullanılır.

2.3.1 Sensör (Strain gauge)

"Strain gauge" Türkçe 'de "gerilme ölçer" veya "gerilim ölçer" olarak adlandırılır. Gerilme ölçer, bir malzemenin üzerine uygulanan gerilmenin (deformasyonun) ölçülmesi için kullanılan bir sensördür. Bu sensör, malzeme üzerine yerleştirilir ve malzeme gerildikçe veya deforme olduğunda, gerilme ölçer deforme olur ve elektrik direncinde bir değişiklik meydana gelir[56].

Temel çalışma prensibi, bir malzemenin üzerine gerilme ölçer yerleştirildiğinde, malzeme gerildiğinde gerilme ölçer deforme olur ve bu deformasyon, elektrik direncinde bir değişikliğe neden olur. Bu elektrik direncindeki değişiklik ölçülerek, malzemenin üzerine uygulanan gerilme veya kuvvet hesaplanabilir. Gerilim ölçerler genellikle ince bir metal tel veya film şeklinde olup, bir malzemenin üzerine yapıştırılır. Bu malzeme genellikle gerilmeye maruz kalacak bir bölgeye yerleştirilir. Gerilme veya deformasyon, bir malzemenin boyutlarında meydana gelen bir değişikliği ifade eder. Gerilim ölçeri uygulandığı malzemenin üzerindeki bu deformasyonu ölçer.



Şekil 22 Strain gauge

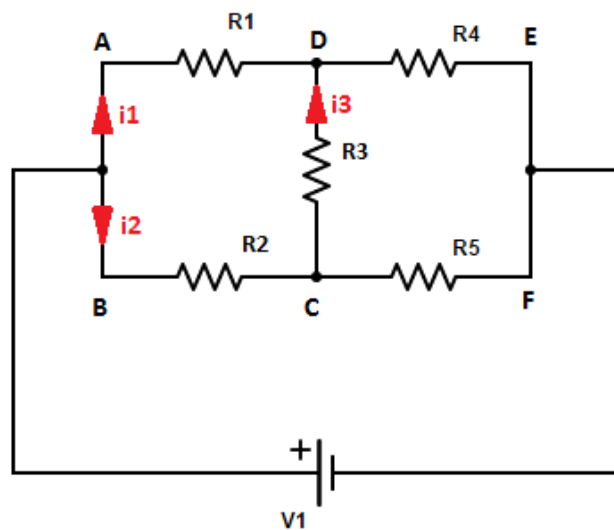
Gerilim ölçeri üzerindeki malzeme, gerilme veya deformasyona maruz kaldığında, içindeki metal tel veya film deforme olur. Bu deformasyon, telin veya filmin elektriksel direncinde bir değişikliğe neden olur. Değişen elektriksel direnç, gerilim ölçeri üzerinden geçen elektrik akımını etkiler. Bu değişiklik ölçülerek, gerilme veya deformasyon miktarı belirlenir. Gerilim ölçerden gelen veri genellikle bir veri toplama sistemine bağlıdır. Bu sistemdeki elektronik ekipmanlar, ölçülen direnç değişimini okur ve gerilme/deformasyon miktarını belirler.[45]

Bu temel prensiplere dayanarak, gerilim ölçerler bir malzemenin gerilme veya deformasyonu ile ilgili çok hassas ölçümler yapabilirler. Bu özellikleri nedeniyle, mühendislik, malzeme bilimi ve yapısal analiz gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılırlar.

"Gerilme ölçer" terimi genellikle malzeme testi, yapının gerilme analizi, dayanıklılık testi ve diğer mühendislik uygulamalarında kullanılır. Bu ölçerler, gerilme, kuvvet, ağırlık ve benzeri büyüklükleri ölçmek amacıyla geniş bir yelpazede uygulamada kullanılır.

2.3.2 Wheatstone köprüsü

Wheatstone köprüsü, bir elektrik devresinin dengede olduğu durumu belirlemek için kullanılan bir ölçüm aracıdır. Bu köprü, 1843 yılında Samuel Hunter Christie tarafından tanıtılmış ve daha sonra Samuel Hunter Christie'nin öğrencisi Sir Charles Wheatstone'un adını taşımıştır. Wheatstone köprüsü, direnç ölçümlerinde kullanılır ve dengede olduğunda köprünün iki kolu arasındaki potansiyel fark sıfırdır. Wheatstone köprüsü genellikle dört dirençten oluşur ve bu dirençler, bir döngü üzerinde köprünün iki kolunu oluşturur. Bu dört direnç, birbirlerine oranlandıklarında, köprünün dengede olduğu durumu ifade eden bir denge durumu oluşturur. Köprünün dengede olduğu durumda, potansiyel fark sıfırdır ve köprüden geçen akımın oranları dengededir.[51]

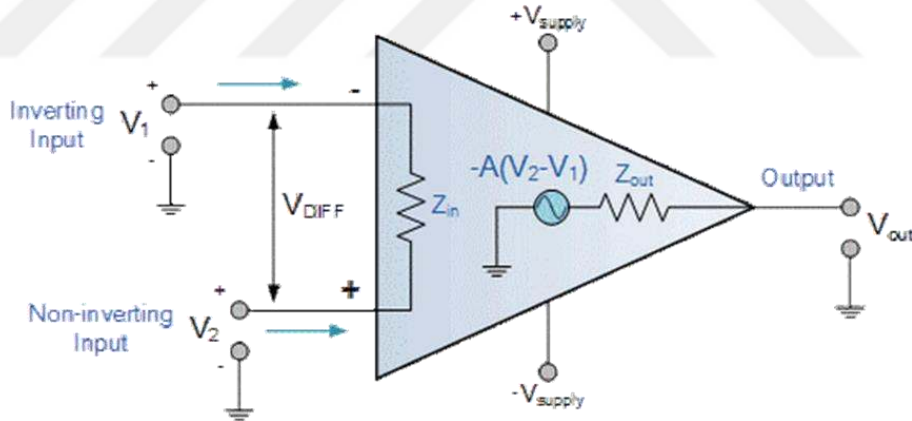


Şekil 23 Wheatstone Bridge

Wheatstone köprüsü, özellikle laboratuvar ortamlarında direnç ölçümleri yapmak, hassas direnç değerlerini belirlemek veya termometre gibi diğer ölçüm cihazlarında kullanılan dirençlerin değerlerini ayarlamak için yaygın olarak kullanılır. Wheatstone köprüsü, dört direncin konfigürasyonunu içerdiği için bir köprü devresidir ve elektriksel dengede olduğu durumda kullanıldığında hassas ölçümler sağlar.

2.3.3 Op-Amp(işlevsel Yükselteç)

İşlevsel yükselteç, bir sinyali güçlendiren ve belirli bir işlevi gerçekleştiren bir elektronik devredir. Yükselteçler, genellikle giriş sinyalinin genliğini artırmak, frekans tepkisini düzeltmek, sinyaldeki gürültüyü azaltmak veya belirli bir frekansta bir filtreleme işlevi gerçekleştirmek gibi işlevleri yerine getirebilir. Operasyonel Yükselteç (Op-Amp), elektronik devre tasarımında yaygın olarak kullanılan bir entegre devredir. İdeal bir op-amp, yüksek giriş empedansına, yüksek açık döngü kazancına, düşük çıkış empedansına ve diferansiyel girişlere sahip olmalıdır. Pratik op-amp'ler, bu ideale yakın özelliklere sahip olabilir.[52]



Şekil 24 Genel Op-Amp

Girişler:İnvertör (-) Girişi: İnvertör girişi olarak da bilinir. Bu giriş, negatif geribeslemeli devrelerdeki sinyali alır.

Non-invertör (+) Girişi: Non-invertör girişi olarak da bilinir. Bu giriş, pozitif geribeslemeli devrelerdeki sinyali alır.

Besleme Gücü: Tipik op-amp'ler çift besleme voltajlarına ihtiyaç duyar (+Vcc ve -Vcc).

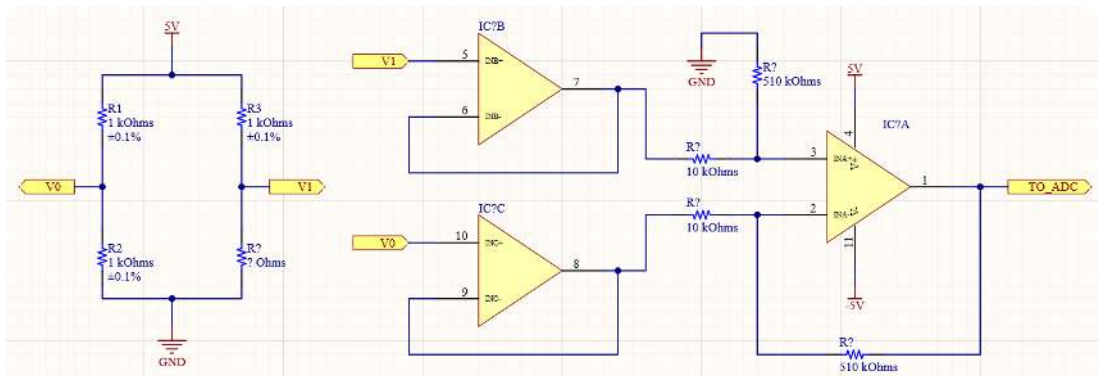
Çıkış: Op-amp çıkışı, diferansiyel girişlere uygulanan gerilim farkını amplifiye eder.

Kazanç (Açık Döngü ve Kapalı Döngü): İdeal bir op-amp'nin açık döngü kazancı sonsuzdur. Pratik op-amp'ler genellikle çok yüksek açık döngü kazançlarına sahiptir.

Kapalı döngü kazancı, geri besleme elemanları tarafından belirlenen bir değerdir ve genellikle yüksek ve istikrarlıdır.

Giriş Empedansı ve Çıkış Empedansı: İdeal bir op-amp'nin giriş empedansı sonsuzdur, çıkış empedansı ise sıfırdır. Pratik op-amp'ler genellikle yüksek giriş empedansına ve düşük çıkış empedansına sahiptir.

Ortak Modda Redd (CMRR): Ortak modda redd, bir op-amp'ın diferansiyel girişlerine uygulanan bir ortak mod sinyali ile nasıl başa çıkabildiğini ölçer. İdeal bir op-amp'da CMRR sonsuzdur, ancak pratik op-amp'lerde yüksek bir değer beklenir.



Şekil 25 Op-Amp Devresi

Op-amp'ler, osilatörlerden filtre devrelerine, matematiksel işlemcilerden enstrümantasyon amplifikatörlerine kadar birçok uygulamada kullanılır. İdeal bir op-amp modeli sıkça kullanılan bir başlangıç noktası olsa da, pratik tasarımlarda dikkate

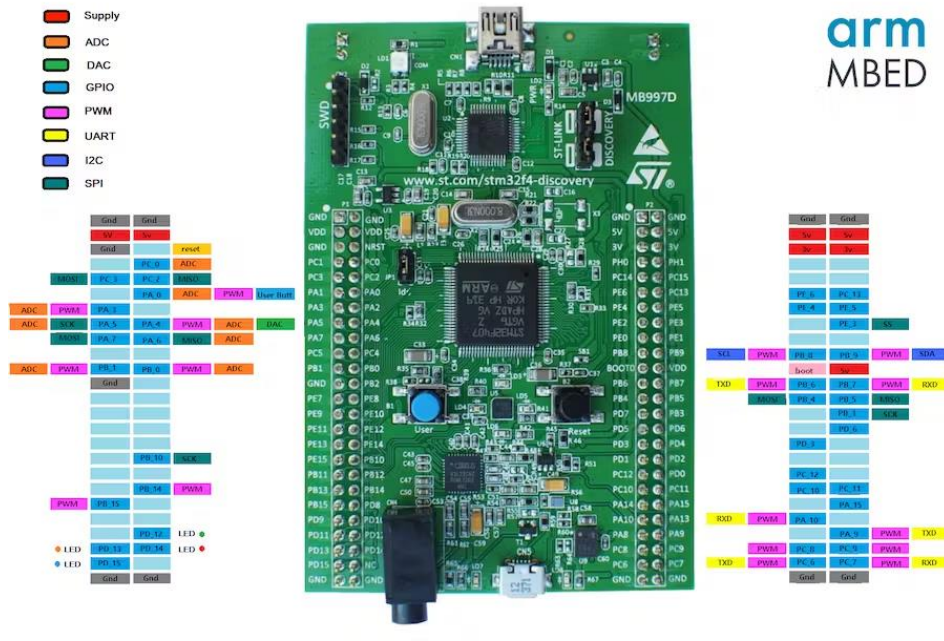
alınması gereken bazı özellikler vardır. Op-amp'ler, birçok elektronik devrenin temel yapı taşlarından biridir.

2.3.4 Stm32f407 Mikroişlemci

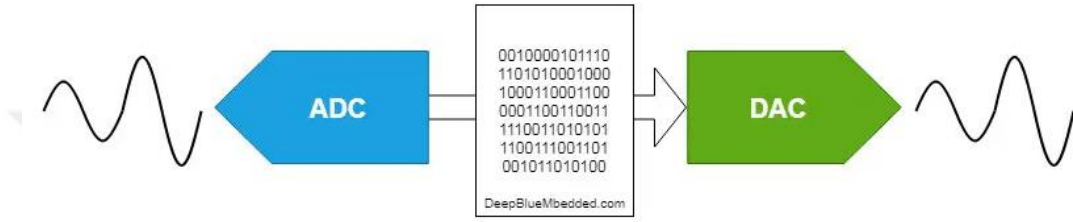
STM32 mikrodnetleyicileri, özellikle akademik ve endüstriyel alanda geniş bir kullanım bulan bir dizi mikrodnetleyici serisidir. Bu mikrodnetleyiciler, öğrencilerin ve mühendislerin geniş bir yelpazede projeler geliştirmeleri için güçlü ve esnek bir platform sağlar. Deney setinde stranguage üzerinden veri okumak ve kontrol için PİD algoritmasını uygulamak için kullanılmıştır.[53]

ARM Cortex-M Çekirdekleri: STM32 mikrodnetleyicileri, ARM Cortex-M çekirdeklerini temel alır. Bu çekirdekler, gömülü sistem uygulamaları için optimize edilmiş, enerji verimli ve performanslı bir mimari sunar.

Entegre Geliştirme Ortamları (IDE): STM32 mikrodnetleyicileri için geniş bir destek sunan bütünleşmiş geliştirme ortamları vardır. STM32CubeIDE,



Geniş Dokümantasyon ve Eğitim Materyalleri: STM32 mikrodnetleyicilerle ilgili geniş bir belgelendirme ve eğitim materyalleri bulunmaktadır. Bu materyaller, temel kavramlardan başlayarak, ileri düzey uygulamalara kadar geniş bir konu yelpazesini kapsar. STM32 mikrodnetleyicileri, geniş bir kullanıcı tabanına ve güçlü bir ekosistem sahiptir, bu da onları akademik ve endüstriyel uygulamalarda popüler bir tercih haline getirir. Bu platform, öğrencilere ve mühendislere mikrodnetleyici tabanlı sistemlerin geliştirilmesi konusunda pratik deneyim kazanma imkânı sunar.



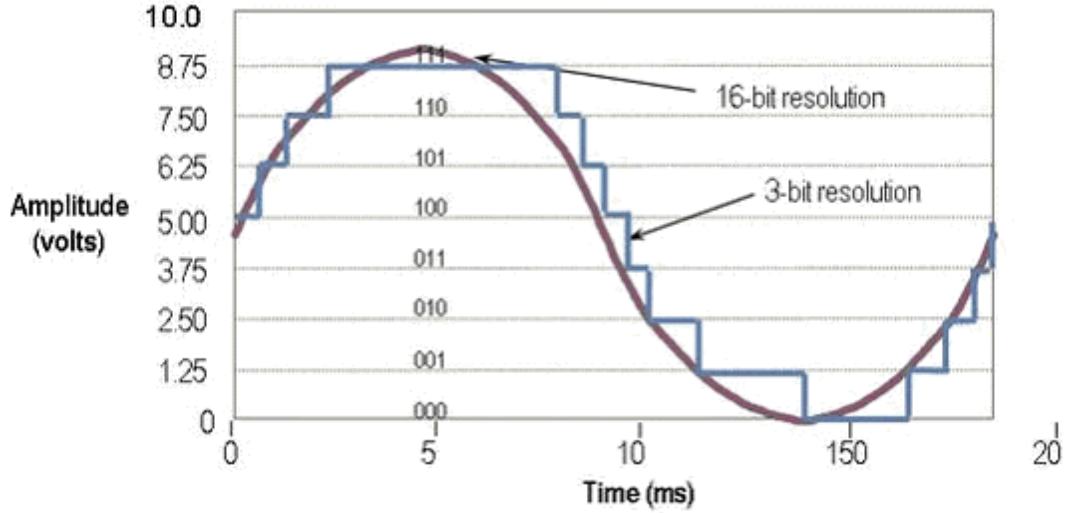
Şekil 27 ADC DAC

STM32 mikrodnetleyicileri, bir dizi analog-periferik özellik sunar ve Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) bu özelliklerden biridir.

Çok Kanallı ADC: STM32 ADC, genellikle birden fazla analog giriş kanalını destekler. Bu, mikrodnetleyicinin çeşitli sensörleri veya diğer analog sinyalleri aynı anda ölçebilmesini sağlar. ADC'nin çözünürlüğü, analog sinyali dijitale çevirme yeteneğini belirler. STM32 mikrodnetleyicileri genellikle 8, 10, 12 veya 16 bit çözünürlük sunar. Örnekleme hızı, ADC'nin bir analog sinyali kaç kez ölçtüğünü ifade eder. STM32 mikrodnetleyicileri genellikle farklı örnekleme hızları sunar. Bazı STM32 mikrodnetleyicileri, ADC ölçümlerini doğrudan belleğe kopyalama yeteneği olan DMA özelliğini destekler. ADC, tek veya çift modda çalışabilir. Tek mod, sadece bir kanalın ölçümünü içerirken, çift mod birden fazla kanalın ölçümünü içerebilir. ADC, tek taraflı (single-ended) veya diferansiyel modda çalışabilir, bu da kullanıcıya çeşitli ölçüm seçenekleri sunar.

STM32 ADC, genellikle geniş bir kullanım yelpazesi için uygundur ve sensörlerden alınan analog verilerin dijitale çevrilmesi gibi birçok uygulamada kullanılır. ADC' nin doğru konfigürasyonu ve kullanımı, mikrodnetleyici tabanlı sistemlerin çeşitli uygulamalarında önemli bir rol oynar. Bu nedenle, kullanılan

STM32 mikrodeneleyici modeline özgü referans manuellere ve belgelerden yararlanmak önemlidir. ADC, bir DAC' nin karşı işlemini gerçekleştirirken, ADC (A/D) analog voltajı dijital verilere dönüştürürken, DAC (D/A) dijital sayıları çıkış pinindeki analog voltaja dönüştürür.



Şekil 28 ADC Çözünürlük

Şekil 23 te ADC için 3 ve 16 bit çözünürlük arasında ki fark sinüs sinyali üzerinde gösterilmiştir. 3 bitlik çözünürlüğün alabildiği değerler 0-7 arasında sınırlı iken 16 bit çözünürlükte bu 2^{16} olmaktadır. Stm32 discovery kartı stranguage den gelen analog sinyali okumak ve gerekli algoritmalarından sonra pwm çıkışı ile elektromıknatısı kontrol etmek için kullanılacaktır. Stm32F4 serisi için STM32F407 birbirinden bağımsız çalışabilen 3 adet ADC mevcuttur. Her ADC'nin 18 kanalı vardır. Bunların 16 kanal haricidir ve GPIO pinine bağlıdır. STM32F4 Dahili sıcaklık sensörüne ve ADC voltaj referansına bağlı 2 kanal mevcuttur.

Tablo 3 STM32F4 ADC Pinleri

ADC Kanal	ADC1	ADC2	ADC3
ADC Kanal 0	PA0	PA0	PA0
ADC Kanal 1	PA1	PA1	PA1
ADC Kanal 2	PA2	PA2	PA2
ADC Kanal 3	PA3	PA3	PA3
ADC Kanal 4	PA4	PA4	
ADC Kanal 5	PA5	PA5	
ADC Kanal 6	PA6	PA6	
ADC Kanal 7	PA7	PA7	
ADC Kanal 8	PB0	PB0	
ADC Kanal 9	PB1	PB1	
ADC Kanal 10	PC0	PC0	PC0
ADC Kanal 11	PC1	PC1	PC1
ADC Kanal 12	PC2	PC2	PC2
ADC Kanal 13	PC3	PC3	PC3
ADC Kanal 14	PC4	PC4	
ADC Kanal 15	PC5	PC5	

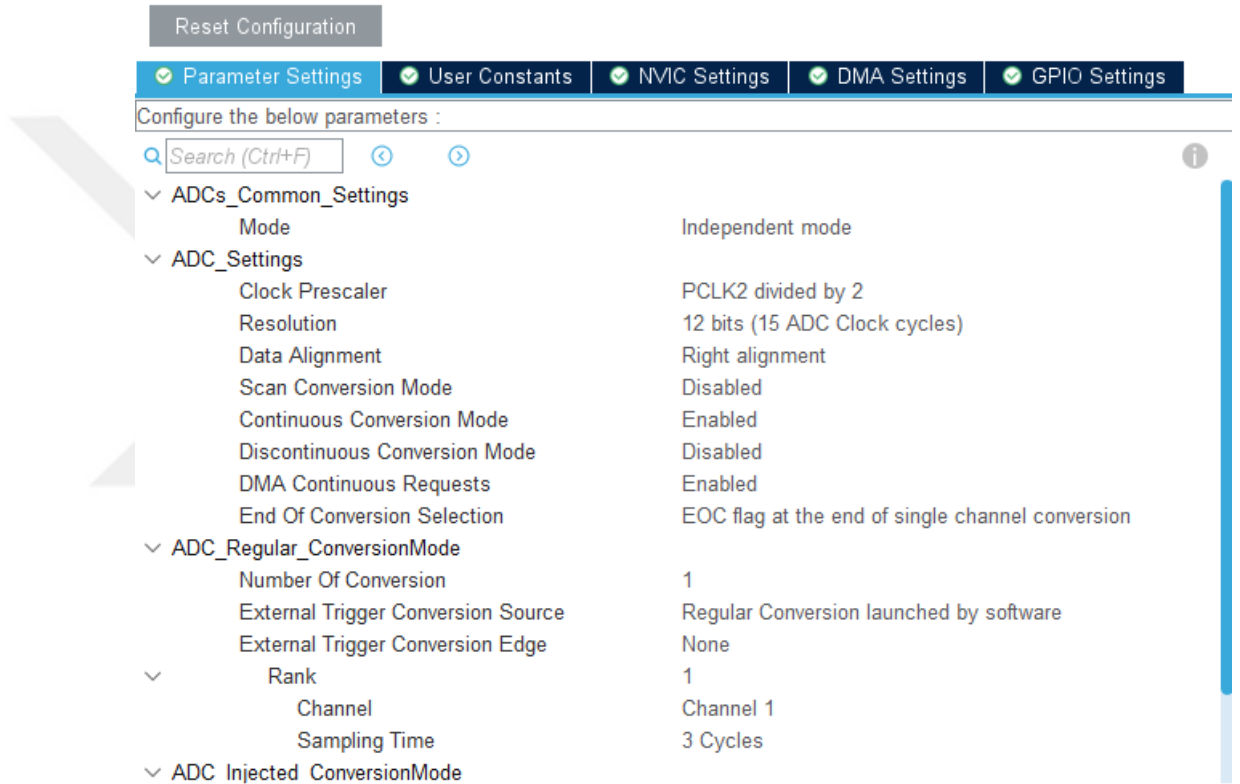
Genelde ADC en düşük değer “0” olarak kabul edilir. Bu değer ADC için referans noktası aldığımız değere göre belirlenir. 3 bitlik bir ADC için 0-7 arasında değer alır, 5v gerilim ölçmek istediğimiz de 5/7 yaklaşık olarak 0.7 v her bir adım için değer olacaktır. 0-0,7v arasında ADC olarak binary “000” çıkışı alırken 4.9v ile ölçüm yapıldığında “111” değeri elde edilecektir. STM32 de ADC yi 3 modu vardır.

Polling Kullanımı: ADC, çevrim tamamlanana kadar mikrodnetleyiciyi bloke eder. Uygulama, çevrim tamamlandığında elde edilen değeri işleyerek devam eder. Bu yöntem, ölçümlerin hızlı olmasının gerekmediği durumlarda kullanılır.

Interrupt Kullanımı: Mikrodnetleyici, ADC' ye çevrim başlatma komutu verir ve diğer işlemlere devam eder. Çevrim tamamlandığında, bir interrupt meydana gelir ve bu durumda belirli bir işlev çağrılır. Bu, uzun süren ölçümlerde mikrodnetleyicinin bloke olmasını önler.

DMA Kullanımı: DMA, mikrodenetleyicinin ADC çevriminden sonra elde edilen veriyi belleğe taşımasını sağlar. Bu, mikrodenetleyicinin ADC işlemleriyle meşgul olmadan diğer görevlere odaklanabilmesini sağlar. Özellikle hızlı ve ardışık ölçümler için uygundur.

Bu yöntemler arasındaki seçim, uygulama gereksinimlerine ve ölçüm hızına bağlıdır, hassas uygulamalarda DMA kullanımı uygundur. Bu çalışmada DMA mod seçilmiştir.



Şekil 29 CubeMX Configirasyon

Burada bahsi geçen ayarlamaları için:

Clock Prescaler: PCLK2 hattında ADC ölçümü için kullanılacak saat darbesi ayarı seçilir.

Resolution: ADC ölçümü için çözünürlük ayarı. Düşük çözünürlük daha az enerji gerektirir, daha hızlı sonuçlar elde edilir.

Data Alignment: ADC ölçümünden sonra en değerli bit için sağ veya sol tarafta olması seçilir.

Scan Conversion: Genellikle, mikrodnetleyici projelerinde bir ADC' nin tek bir kanalı ölçmesi yeterli olmayabilir. Birden fazla sensör veya girişin takip edilmesi gerek durumlarda kullanılır. Scan Conversion modunda, mikrodnetleyici, belirtilen bir liste veya kanal kümesi üzerinde dönüşümleri sırayla gerçekleştirilir. Belirli bir zaman aralığında birden fazla kanalı tarayarak ölçüm yapabilir. Bu, bir dizi sensörü veya analog girişi izlemek ve değerlerini elde etmek için kullanılır.

Continuous Conversion: ADC için dönüşümü her defasında başlatmak yerine yazılım ile kontrolü sağlayarak sürekli çevirim yapmasına imkân sağlar.

DMA Continuous Request: ADC' nin DMA ile kullanımı için yapılması gerekenlidir. Böylelikle DMA modu aktif olur.

Number of Conversion: ADC işle birlikte yapılacak çevirim sayısı. Aktif edilen kanal kadar seçilmelidir. Channel: Aktif edilmek istenen ADC kanalı.

Sampling Time: Örnekleme zaman ADC çevirimi için örnekleme zamanı ne kadar uzarsa ölçüm doğruluğu artar, işlem süresi uzar.

Reset Configuration

✔ Parameter Settings

✔ User Constants

✔ NVIC Settings

✔ DMA Settings

✔ GPIO Settings

NVIC Interrupt Table	Enabled	Preemption Priority	Sub Priority
ADC1, ADC2 and ADC3 global interrupts	☐	0	0
DMA2 stream0 global interrupt	☒	0	0

Şekil 30 ADC NVIC Yapısı

Şekil 30 ile DMA ayarları verilmiştir.

DMA Request	Stream	Direction	Priority
ADC1	DMA2 Stream 0	Peripheral To Memory	Low

Add Delete

DMA Request Settings

Mode	Circular	Increment Address	☐	Peripheral	☐	Memory	☒
Use Fifo	☐	Threshold		Data Width	Word	Word	
Burst Size							

Şekil 31 ADC DMA Ayarları

STM32 de DMA kullanımında mikroişlemciler ADC işlemleri ile meşgul olmaz. Bu hız ve kullanım açısından kolaylık sağlamaktadır. ADC çevirim süresi hesabı ölçümden önce yapılması gerekmektedir. Sistem saat frekansı ADC ölçüm hızı ile doğrudan bağlantılıdır.



Şekil 32 ADC Çevirim Süresi Hesaplama

PCLK2, STM32 mikrodnetleyicilerinde kullanılan bir saat sinyalidir ve bu sinyal mikrodnetleyici içindeki çeşitli periferik birimlere (timers, UART, SPI, I2C vb.) bir referans sağlar. "PCLK2" terimi, "Peripheral Clock 2" anlamına gelir ve genellikle mikrodnetleyici hızını belirleyen ana sistem saatine (HCLK) dayalıdır.

HCLK (AHB Clock): Ana sistem saatidir ve mikrodnetleyicinin genel işleyişini kontrol eder.

PCLK1 (APB1 Clock): AHB Clock'tan türetilmiş bir saat sinyalidir ve çeşitli periferik birimlere (örneğin, timers, UART, SPI) hizmet eder.

PCLK2 (APB2 Clock): AHB Clock'tan türetilmiş bir başka saat sinyalıdır ve PCLK1 gibi çeşitli periferik birimlere hizmet eder.

Bu saat sinyalleri, mikrodnetleyicinin genel performansını ve periferik birimlere olan erişimi etkiler. PCLK1 ve PCLK2, bu periferik birimlere hizmet eden saat sinyalleridir ve periferik birimlerin çalışma hızlarını belirler.

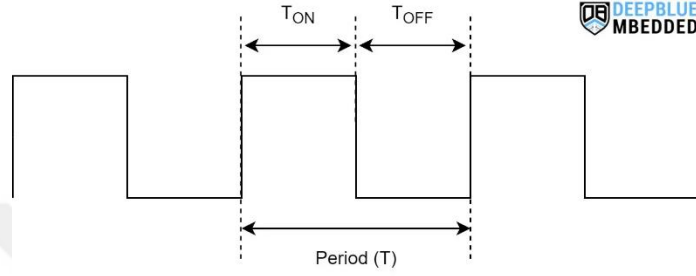
PCLK2, özellikle APB2 (Advanced Peripheral Bus 2) adlı veri yolu üzerindeki periferik birimlere sağlanan bir saat sinyalıdır. Bu birimlere SPI, I2C, USART, ADC gibi periferikler dahildir. PCLK2'nin hızı, mikrodnetleyicinin hızına (genellikle HCLK'ye) bağlıdır ve bu hız, mikrodnetleyici konfigürasyonunda belirlenir. Bu değer, mikrodnetleyicinin referans manuelinden veya CubeMX gibi konfigürasyon araçlarından elde edilir. STM32 mikrodnetleyicilerinde Analog-Dijital Dönüştürücüsü (ADC) çevrim süresi, örnekleme süresi (sampling time) ve dönüşüm süresi (conversion time) ile ilgilidir. Çevrim süresi, bir ADC'nin bir örneği almak ve dijital bir değere dönüştürmek için ne kadar süre gerektiğini belirtir.

Çevrim süresi genellikle örnekleme süresi (sampling time) ve dönüşüm süresi (conversion time) toplamıdır:

$$\text{Çevrim Süresi} = \text{Örnekleme süresi} + \text{Dönüşüm süresi} \quad (2.27)$$

Bu iki süre genellikle nanosaniye (*ns*) cinsinden ölçülür. Örnekleme süresi, ADC' nin analog sinyali örnekleme için harcadığı süreyi ifade eder. Dönüşüm süresi ise örnekleme işlemi tamamlandıktan sonra dijital bir değere dönüştürme süresini ifade eder. Bu süreler, kullanılan ADC' nin çözünürlüğüne, örnekleme moduna ve mikrodnetleyici hızına bağlı olarak değişebilir. STM32 mikrodnetleyicilerinde örnekleme süresi ve dönüşüm süresi, ADC yapılandırması sırasında belirlenebilir. Bu değerler, özellikle hızlı değişen analog sinyalleri doğru bir şekilde ölçmek için önemlidir. Ancak, daha uzun çevrim süreleri genellikle daha yüksek çözünürlüklü ölçümlerle sonuçlanabilir. PWM, bir yüke uygulanan ortalama gücü kontrol etmek için kullanılan bir dijital tekniktir. Bunu, gücü sabit bir frekansta açıp kapatarak yapar. Görev döngüsü, gücün açık olduğu süreyi ayarlayarak, ortalama güç teslimatı değiştirilebilir.

Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM), sürekli YÜKSEK/DÜŞÜK alternatif dijital sinyal üretmek ve darbe genişliğini ve frekansını programlı olarak kontrol etmek için kullanılan bir tekniktir. (LED'ler, Motorlar vb.) gibi bazı yükler, PWM sinyalinin darbe genişliği arttıka yükselen sinyalin ortalama voltajına yanıt verecektir. Bu teknik, gömülü sistemlerde LED'lerin parlaklığını, motor hızını ve diğer uygulamaları kontrol etmek için yaygın olarak kullanılır.



Şekil 33 PWM

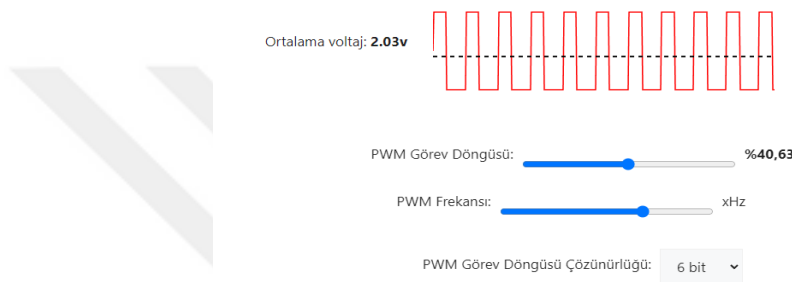
PWM' nin görev döngüsü, her zaman ilgilendiğimiz en önemli özelliktir. Bu, PWM sinyalinin, PWM' nin tam döngü periyoduna göre ne kadar süreyle AÇIK kalacağının bir  l s d r. PWM' nin görev döngüsü denklemi aşağıdaki gibidir:

$$PWM = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \times 100 \quad \frac{T_{on}}{Period(T)} \times 100(\%) \quad (2.28)$$

Görev döngüsü genellikle yüzde (%) değeri olarak ifade edilir çünkü bu, iki zamanlı miktarlar arasındaki bir orandır. Ve çoğu cihazın yanıt verdiği PWM'nin toplam (ortalama) voltajını doğrudan etkiler. Bu nedenle LED parlaklığı, DC motor hızı vb. gibi őeyleri kontrol etmek için genellikle görev döngüsünü değiştiririz.

PWM   z n rl ğ  (bit) cinsinden ifade edilir. Görev döngüsü değerini temsil etmek için kullanılan bit sayısıdır. 8 bit, 10, 12 ve hatta 16 bit olabilir. PWM   z n rl ğ  %0 ila %100 arasındaki ayırık görev döngüsü seviyelerinin sayısı olabilir. PWM   z n rl ğ  ne kadar yüksek olursa, PWM' nin görev döngüsünün tüm aralığı boyunca ayrı seviyelerin sayısı da o kadar yüksek olur.

Yalnızca 3 bitlik bir PWM çözünürlüğü, tüm aralıkta (%0'dan %100'e kadar) görev döngüsü için yalnızca 8 ayrı seviyenin olduğu anlamına gelir. Öte yandan, 8 bit çözünürlüğe sahip bir PWM, tüm aralıkta (%0'dan %100'e kadar) görev döngüsü için 256 ayrı seviyeye sahip olacaktır. Bunu kendiniz test etmek için aşağıdaki etkileşimli aracı kullanabilirsiniz. PWM, bir dizi uygulamada kullanılır: Motor kontrolü: PWM, motorların hızını ve yönünü kontrol etmek için kullanılır. Görev döngüsü ne kadar yüksek olursa, motor o kadar hızlı döner. LED dimming: PWM, LED'lerin parlaklığını kontrol etmek için kullanılır. Görev döngüsü ne kadar yüksek olursa, LED o kadar parlak olur. Audio sentezi: PWM, çeşitli ses dalgalarını oluşturmak için kullanılabilir.



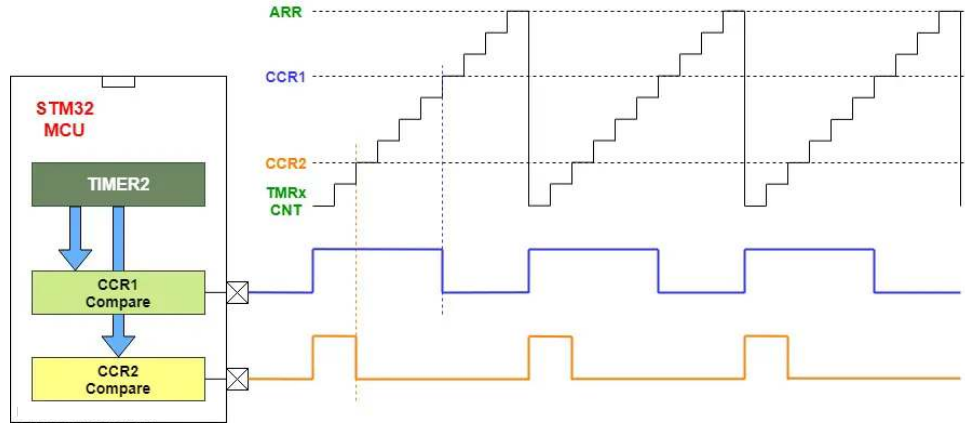
Şekil 34 PWM % 40 Doluluk

STM32 zamanlayıcı modülleri, biri PWM modu olan çeşitli modları çalıştırabilir. Zamanlayıcının dahili bir kaynaktan saat hızına tabi tutulduğu ve otomatik yeniden yükleme kayıt değerine kadar saydığı durumlarda, çıkış kanalı pimi YÜKSEK olarak sürülür. Ve zamanlayıcı sayıları CCRx kayıt değerine ulaşana kadar kalır, eşleşme olayı çıkış kanalı pininin DÜŞÜK olarak sürülmesine neden olmaktadır. Ve zamanlayıcı otomatik yeniden yükleme kayıt değerine kadar sayana kadar bu böyle devam etmektedir.

Ortaya çıkan dalga formuna PWM (darbe genişliği modülasyonlu) sinyal adı verilir. Frekansı dahili saat, Prescaler ve ARRx kaydı tarafından belirlenir. Ve görev döngüsü, kanal CCRx kayıt değeri tarafından tanımlanır. PWM'nin, PWM üretimi için her zaman aynı prosedürü takip etmesi gerekmez, ancak bu en temel olanıdır ve kavramın anlaşılması daha kolaydır. Buna yukarı sayma PWM modu denir.

Aşağıdaki şema ARR değerinin PWM sinyalinin periyodunu (frekansını) nasıl etkilediğini gösterir. Ve CCRx değerinin karşılık gelen PWM sinyalinin görev

döngüsünü nasıl etkilediği. Ve yukarı sayma normal modunda PWM sinyal üretiminin tüm sürecini gösterir.



Şekil 35 PWM üretim süreci

2.3.5 Stm32 ile PİD

. Servo motor kontrolünde, LED sürücülerinde, motor sürücülerinde ve daha birçok durumda, çıkış PWM sinyali için istediğiniz frekansı ayarlamanız gerekmektedir.

PWM periyodu aşağıdaki parametrelerle tanımlanır: ARR değeri, Prescaler değeri ve zamanlayıcı modülünü F_{CLK} çalıştıran dahili saati ifade eder. Aşağıdaki formül, çıkış için F_{PWM} 'yi hesaplamada kullanılacaktır. F_{PWM} 'yi kontrol etmek ve elde etmek için kullandığımız saati, Prescaler'ı ayarlayabilir ve ARR değerini hesaplanabiliriz.

$$F_{PWM} = \frac{F_{CLK}}{(ARR+1) \times (PSC+1)} \quad (2.29)$$

STM32 mikrodnetleyicileri üzerinde PİD (Oransal-Integral-Türev) kontrolörü uygulamak için C dilinde STM32 HAL (Hardware Abstraction Layer) kullanılmıştır. Bu uygulama STM32CubeMx üzerinde hazırlanmıştır.



Şekil 36 CubeMX

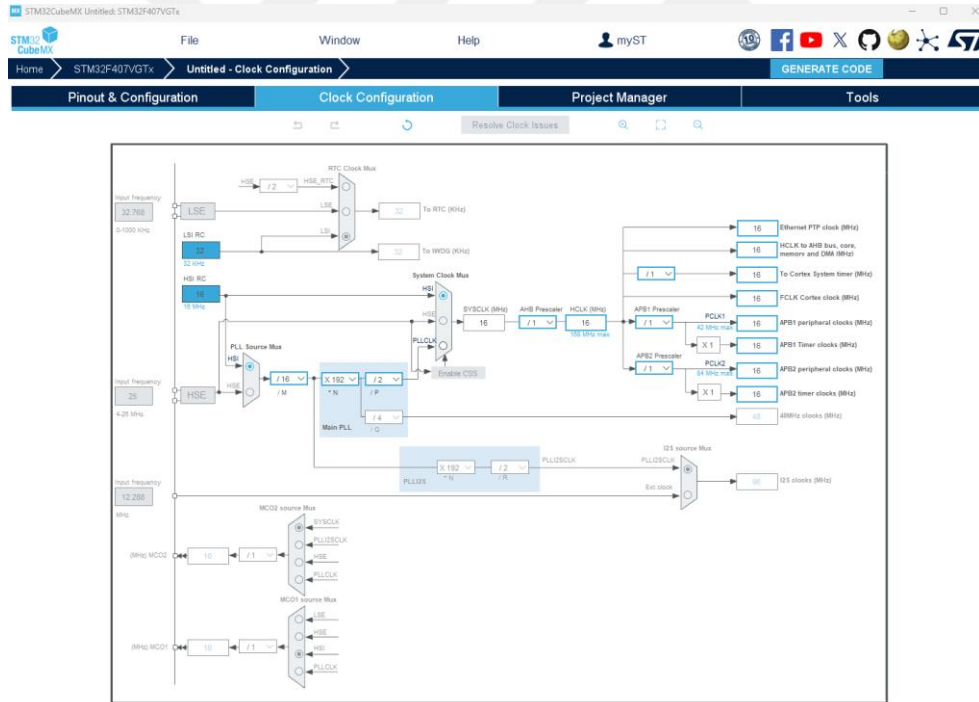
Bu çalışmada aktif titreşim kontrolü için kontrolcü olarak Elektromıknatıs kullanılmıştır. Aktüatör olarak elektromıknatıs üzerinden kuvvet uygulayarak giriş dengelenmesi yapılabilmesi için elektromıknatıs istediğimiz hızda sürebilmek için bir TIMER ile PWM kontrol sinyali üretilmesi gerekmektedir. Elektromıknatıs istediğimiz gerilim ile çalıştırılması için L298 sürüyü kullanılmıştır. Elektromıknatıs devir hızını bir straining sensör ile algılayıp ayarlamak üzere bir ADC kullanılmıştır. Geliştirdiğimiz kodun kontrolü ve hata ayıklaması için ARM Cortex M çekirdeğinin SWV/ITM araçlarını tercih edilmiştir.

Stm32 için bağlantılar:

Tablo 4 Stm32 Bağlantı İsimleri

PA0	(PWM çıkışı)	L298Enable_Aklemensine
PA1	(ADC girişi)	Strain-guage
PA2	(GPIO Output)	L298 kontrol girişi 1
PA3	(GPIO Output)	L298 kontrol girişi 2
PA13	SWDIO	ST_link
PA14	SWCLK	ST_Link
PB3	SWO	STLink(SWV Debug çıktıları için)

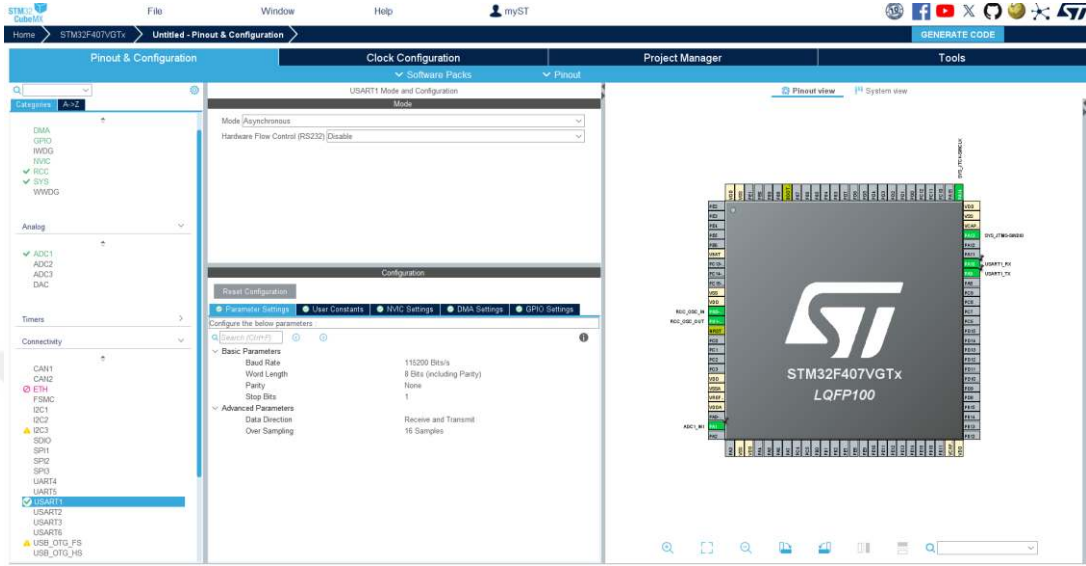
CubeMx ile Stm32 nin sistem saat ayarları yapılandırmak için “Clock Configuration” sekmesi kullanılmıştır.



Şekil 37 Stm32 Clock Configuration

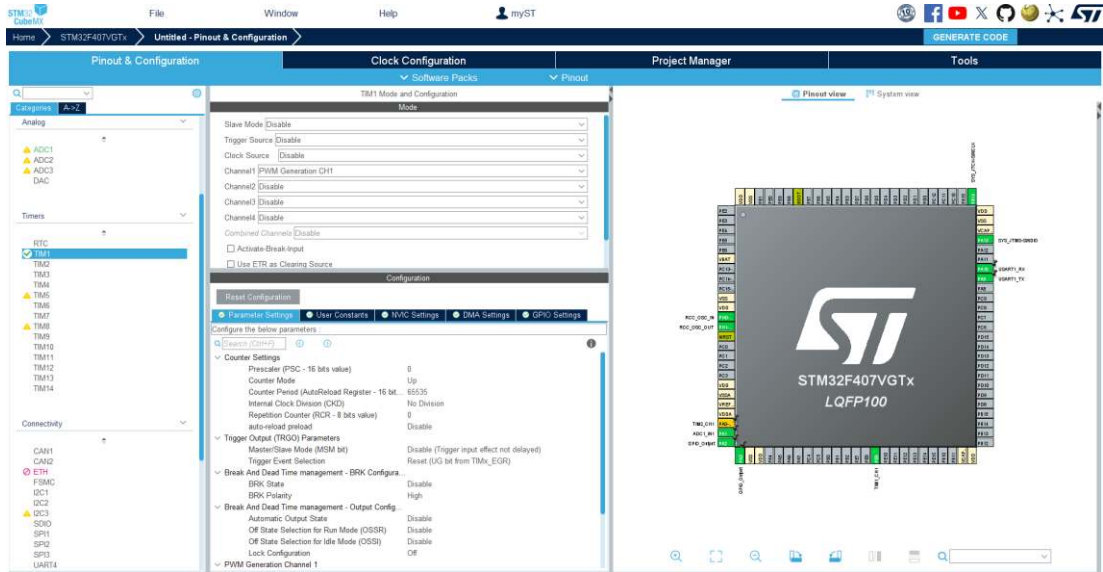
Strainguage ile gelen verileri ADC ile PA1 girişin okunması için gerekli ayarlamalar şekil 35 gibi yapılmıştır.

Bu uygulamada RAM’da bekleyen verileri DMA aracılığıyla USART1 modülüne taşıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 31 de bu yapılandırma verilmektedir. Yazılım veri geldikçe interrupt rutinine girmesi beklenir ve gelen veriyi RAM’da depolama yapacaktır.



Şekil 40 STM32 UART Bağlantı Yapılandırma

Elektromıknatis süreceğimiz PWM sinyalini üretmek için TIM2 zamanlayıcısını kullanılacaktır. PWM i Channel 1 de üreterek bu kanalın bağlı olduğu PA0 portuna yönlendirilmiştir. Sistem saatini 36 MHz e ayarlanmıştır. PWM periyodunun 1 milisaniye olarak ayarlanmıştır. TIM2 nin sayıcı frekansını 1µs olarak tercih edilmiştir. Prescaler ayarını sistem saatini 36 ya bölecek şekilde “35” olarak yapılandırılmıştır. Bu ayarı, istenilen bölme faktörünün 1 eksiği olarak yapılmalıdır, cubeMX yapılandırıcısı buna 1 ekleyerek değerlendiriyor.



Şekil 41 STM32 PWM

PWM darbe genişliğini yapılandırılması olan parametre yukarıdaki ekran görüntüsünde “Pulse” olarak seçilmiştir. Burada herhangi bir değer ayarlamasına gerek yoktur, program içerisinde ayarlanacaktır.

__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_1, pwm); komutu ile ayarlanabilmektedir

Programımız içinde Timer komut ile başlatılması gerekmektedir:

HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);

2.4 Otomatik Kontrol Yöntemi

Mühendislik, insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla doğanın kuvvetlerini ve materyallerini anlama ve kontrol etmedir. Kontrol sistem mühendisleri de toplum için faydalı ürünleri sağlamak amacıyla sistemlerin anlaşılması ve kontrol edilmesi ile ilgilenirler. [41]

Günümüzde, teknolojinin gelişmesiyle kontrol sistemlerine olan ilgi artmaya başlamıştır. Kontrol sistemleri, ürünlerin kalite kontrolünde, kimyasal işlemlerde, taşıma sistemlerinde, güç sistemlerinde, takım tezgâhı kontrolünde, robotik sistemlerde, uzay teknolojisinde, silah sistemlerinde, nanoteknolojide, trafik kontrol sistemlerinde ve diğer endüstriyel alanlarda çokça kullanılır.

Sistemlerin verimli olarak çalışması için öncelikle iyi analiz edilmesi, modellenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir; bu nedenledir ki günümüz mühendislerinin yaşadığı sorunlardan biri de kimyasal işlem sistemleri gibi yeterince anlaşılamamış, robotik sistemler gibi modern, karmaşık ve birbirleriyle ilişkili sistemlerin modellenmesi ve kontrolüdür.

Kontrol sistemleri alanındaki akademik araştırmalar, sistemlerin performansını iyileştirmek, dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmak ve değişen koşullara göre kendini uyarlamak için yeni kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır.[42]

Kontrol sistemleri, günümüzde ve gelecekte de birçok alanda önemli bir rol oynamaya devam edecek. Kontrol sistemleri sayesinde, daha güvenli, verimli ve akıllı sistemler geliştirilebilecektir.

Kontrol sistemleri, bir sistemin davranışını doğrudan veya dolaylı olarak yöneten, kontrol eden bir cihaz veya cihaz grubudur. Kontrol sistemleri, endüstriyel üretim, ulaşım, sağlık, enerji, savunma ve eğlence gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kontrol sistemleri, kontrol edilecek sistemin doğasına göre sınıflandırılabilir. Otomatik kontrol sistemleri: Bu sistemler, giriş sinyallerine göre çıkış sinyallerini otomatik olarak üretir. Manuel kontrol sistemleri: Bu sistemler, kullanıcı tarafından manuel olarak kontrol edilir. Karma kontrol sistemleri: Bu sistemler hem otomatik hem de manuel kontrol özelliklerine sahiptir. Kontrol sistemleri, kontrol edilecek sistemin davranışına göre de sınıflandırılabilir. Bazı yaygın kontrol sistemleri şunlardır:

Açık döngü kontrol sistemleri: Bu sistemlerde, çıkış sinyalleri geri besleme olarak giriş sinyallerine uygulanmaz. Kapalı döngü kontrol sistemleri: Bu sistemlerde, çıkış sinyalleri geri besleme olarak giriş sinyallerine uygulanır.

Kontrol sistemlerinin tasarımı, kontrol edilecek sistemin özelliklerine ve istenen performansa göre yapılır. Kontrol sistemlerinin tasarımında kullanılan bazı yaygın yöntemler şunlardır: Kontrol teorisi: Kontrol sistemlerinin davranışını

inceleyen bir bilim dalıdır. Simülasyon: Kontrol sistemlerinin davranışını bilgisayar ortamında simüle etme yöntemidir. Deneysel yöntemler: Kontrol sistemlerinin davranışını gerçek sistemlerde test etme yöntemidir.

Kontrol sistemleri, günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, endüstriyel üretimde, üretim süreçlerini kontrol etmek için kontrol sistemleri kullanılır. Ulaşım, araçları ve uçakları kontrol etmek için kontrol sistemleri kullanılır. Sağlıkta, hastalıkların teşhis ve tedavisinde, Enerjide, enerji üretimi ve dağıtımını kontrol sistemleri kullanılır. Savunmada, silah sistemlerini kontrol etmek için kontrol sistemleri kullanılır. Eğlence, oyunları ve eğlence sistemlerini kontrol etmek için kontrol sistemleri kullanılır. Kontrol sistemleri, günümüzün en önemli mühendislik alanlarından biridir. Kontrol sistemleri sayesinde, birçok sistemin performansı iyileştirildi ve insan hayatının birçok alanında daha güvenli ve verimli bir yaşam sağlanmıştır. Kontrol sistemleri ile ilgili bazı önemli kavramlar mevcuttur. Kontrolör, kontrol sisteminin çıkış sinyallerini üreten birimdir. Gözlemci, kontrol sisteminin durumunu tahmin eden birimdir. Robust kontrol ise Kontrol sisteminin dış etkenlere karşı dayanıklı olmasını sağlayan kontrol yöntemidir. Adaptif kontrol, Kontrol sisteminin değişen koşullara göre kendini uyarlamasını sağlayan kontrol yöntemidir. Kontrol sistemleri ile ilgili bazı yaygın uygulamalar mevcuttur.

Kontrol sistemleri, kontrol edilecek sistemin doğasına göre sınıflandırılabilir. Otomatik kontrol sistemleri, bu sistemler, giriş sinyallerine göre çıkış sinyallerini otomatik olarak üretmektedirler. Manuel kontrol sistemleri ise, kullanıcı tarafından manuel olarak kontrol edilir. Karma kontrol sistemleri, sistemler hem otomatik hem de manuel kontrol özelliklerine sahiptir. Kontrol sistemleri, kontrol edilecek sistemin davranışına göre de sınıflandırılabilir. Açık döngü kontrol sistemleri, bu sistemlerde, çıkış sinyalleri geri besleme olarak giriş sinyallerine uygulanmaz. Kapalı döngü kontrol sistemlerinde ise istemlerde, çıkış sinyalleri geri besleme olarak giriş sinyallerine uygulanır. Kontrol sistemlerinin tasarımı, kontrol edilecek sistemin özelliklerine ve istenen performansa göre yapılır. Kontrol sistemleri, günümüzde ve gelecekte de birçok alanda önemli bir rol oynamaya devam edecek.

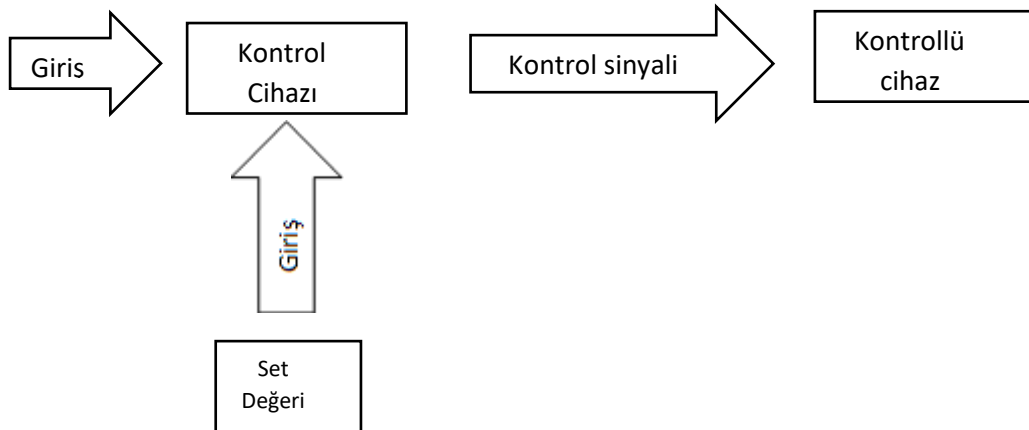
Kontrol sistemleri sayesinde, daha güvenli, verimli ve akıllı sistemler geliştirilebilecektir. Örneğin, kontrol sistemleri, araçları daha güvenli hale getirmek

için kullanılarak kazaları azaltabilir. Kontrol sistemleri, enerji üretimi ve dağıtımını daha verimli hale getirmek için kullanılarak enerji maliyetlerini düşürebilir. Kontrol sistemleri, hastalıkları daha erken teşhis etmek ve tedavi etmek için kullanılarak insan sağlığını iyileştirebilir.

2.4.1 Açık Çevirim Kontrol

Açık döngü kontrol, çıkış sinyallerinin geri besleme olarak giriş sinyallerine uygulanmadığı bir kontrol sistemi türüdür. Açık çevrim sistemi, geri besleme olmadığı için çıkış sinyalinin durumunu izlemez ve ölçmez. Herhangi bir elektronik sistemin işlevi, çıkışı otomatik olarak düzenlemek ve sistemin istenen giriş değeri veya “Set noktası” içinde tutmaktır. Sistem girişi herhangi bir nedenle değişirse, sistemin çıkışı buna göre cevap vermeli ve yeni set değerini yansıtacak şekilde kendini değiştirmelidir. Benzer şekilde, giriş değerinde herhangi bir değişiklik olmaksızın sistem çıkışını bozucu etki varsa, çıkış önceki set değerine geri dönerek cevap vermelidir.

Açık döngü kontrol sistemleri, genellikle kontrol edilecek sistemin davranışının iyi anlaşıldığı ve çıkış sinyalinin ayar noktasından sapmasının küçük olduğu uygulamalarda kullanılır. Örneğin, bir termostatin sıcaklığı kontrol etmek için kullanılması açık döngü kontrolünün bir örneğidir. Termostat, oda sıcaklığını ayar noktasından saptığında, ısıtıcıyı veya soğutucuyu açar veya kapatır. Ancak, oda sıcaklığındaki değişikliklerin nedenini bilmez ve yalnızca ısıtıcıyı veya soğutucuyu açarak veya kapatarak değişiklikleri düzeltmeye çalışır.



Şekil 42 Açık Kontrol

Geri beslemesiz sistem olarak da isimlendirilen bir Açık döngü sistemi, çıktının giriş sinyalinin kontrolcü üzerinde hiçbir etkisi olmadığı bir tür sürekli kontrol sistemidir. Başka bir ifadeyle, bir açık çevrim kontrol sisteminde çıktı ne ölçülür ne de girdi ile karşılaştırma için “geri beslenir”. Bu sebeple, bir açık döngü sisteminin nihai sonuçtan bağımsız olarak giriş komutunu veya set noktasını sadık bir şekilde izlemesi beklenir.

Ayrıca, bir açık döngü sisteminin çıkış durumu hakkında bilgisi yoktur, bu nedenle önceden ayarlanmış değerden büyük sapmalarla sonuçlansa bile, önceden ayarlanmış değer kaydığında yapabileceği herhangi bir hatayı kendi kendine düzeltemez.

Açık döngü sistemlerinin bir başka dezavantajı, istenen görevi tamamlama kabiliyetini azaltabilecek koşullardaki bozulmalar veya değişikliklerle başa çıkmak için yetersiz donanıma sahip olmalarıdır.

Açık döngü kontrol sistemlerinin bazı avantajları şunlardır:

- Basittir ve nispeten ucuzdur.
- Kolayca kurulabilir ve bakımı yapılabilir.

Açık döngü kontrol sistemlerinin bazı dezavantajları şunlardır:

- Performansı genellikle kapalı döngü kontrol sistemlerinden daha düşüktür.
- Çıkış sinyali ayar noktasından önemli ölçüde saparsa, kontrol sistemi durumu düzeltmekte başarısız olabilir.

2.4.2 Kapalı Çevrim Kontrol

Bir geri besleme sisteminin, bir sistemin doğal dinamiklerini değiştirme ve özellikle onu stabilize etme yeteneği, herhangi bir kapalı döngü sisteminin temel mimarisidir. Çıkış miktarının kontrol sürecine girdi üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı sistemlere açık döngü kontrol sistemleri denir ve açık döngü sistemleri de açık uçlu geri beslemesiz sistemlerdir. Ancak herhangi bir elektrikli veya elektronik kontrol

sisteminin amacı, bir süreci ölçmek, izlemek ve kontrol etmektir ve süreci doğru bir şekilde kontrol edebilmemizin bir yolu, çıktısını izlemek ve gerçek çıktıyı karşılaştırmak için bir kısmını geri beslemektir. Hatayı azaltacak şekilde istenen çıktıyı verir ve bozulursa sistemin çıktısını orijinal veya istenen cevaba geri getirir.

Ölçülen çıktının miktarına "geri besleme sinyali" denir ve kendini hem kontrol etmek hem de ayarlamak için geri besleme sinyallerini kullanan kontrol sistemi tipine Kapalı Döngü Sistemi denir. Kapalı döngü kontrol, çıkış sinyallerinin geri besleme olarak giriş sinyallerine uygulandığı bir kontrol sistemi türüdür. Bu, kontrol sisteminin, çıkış sinyalinin set noktasından ne kadar saptığını bilmesini sağlar. Kapalı döngü kontrol sistemleri, genellikle kontrol edilecek sistemin davranışının iyi anlaşılmadığı veya çıkış sinyalinin set noktasından sapmasının önemli olabileceği uygulamalarda kullanılır. Örneğin, bir otomobilin hızını kontrol etmek için kullanılan bir hız kontrol sistemi kapalı döngü kontrolünün bir örneğidir. Hız kontrol sistemi, aracın hızını ayar noktasından saptığında, motorun gücünü artırarak veya azaltarak hızı düzeltmeye çalışır.[47]

Kapalı döngü kontrol sistemlerinin bazı avantajları şunlardır:

- Performansı genellikle açık döngü kontrol sistemlerinden daha iyidir.
- Çıkış sinyali ayar noktasından önemli ölçüde saparsa, kontrol sistemi durumu düzeltebilir.

Kapalı döngü kontrol sistemlerinin bazı dezavantajları şunlardır:

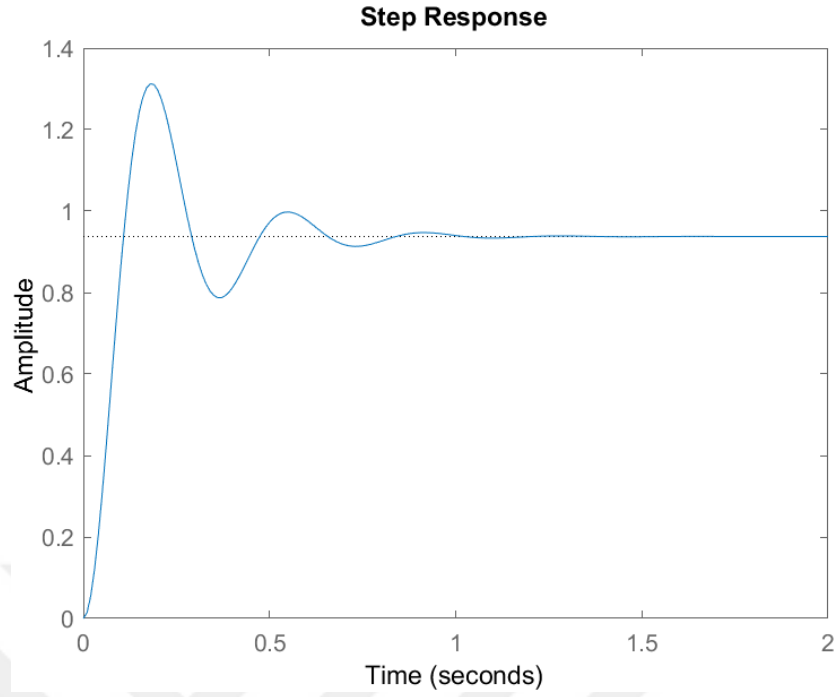
- Daha karmaşıktır ve daha pahalıdır.
- Kurulumu ve bakımı daha zordur.

Kapalı döngü kontrol sistemleri, kontrol teorisi alanındaki en önemli kavramlardan biridir. Kontrol teorisi, kontrol sistemlerinin davranışını inceleyen bir bilim dalıdır.[60] Kapalı döngü kontrol sistemlerinin tasarımı, kontrol edilecek sistemin özelliklerine ve istenen performansa göre yapılır. Kontrol teorisi, kapalı

döngü kontrol sistemlerinin tasarımında kullanılan matematiksel ve analitik yöntemleri sağlar. Kapalı döngü kontrol sistemleri, günümüzün birçok alanında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, endüstriyel üretimde, üretim proseslerini kontrol etmek için kapalı döngü kontrol sistemleri kullanılır. Ulaşımında, araçları ve uçakları kontrol etmek için kapalı döngü kontrol sistemleri kullanılır. Sağlıkta, hastalıkların teşhis ve tedavisinde kapalı döngü kontrol sistemleri kullanılır. Enerjide, enerji üretimi ve dağıtımını kontrol etmek için kapalı döngü kontrol sistemleri kullanılır. Savunmada, silah sistemlerini kontrol etmek için kapalı döngü kontrol sistemleri kullanılır. Eğlencede, oyunları ve eğlence sistemlerini kontrol etmek için kapalı döngü kontrol sistemleri kullanılır. Kapalı döngü kontrol sistemleri, sayesinde daha güvenli, verimli ve akıllı sistemler geliştirilebilecektir. [70]

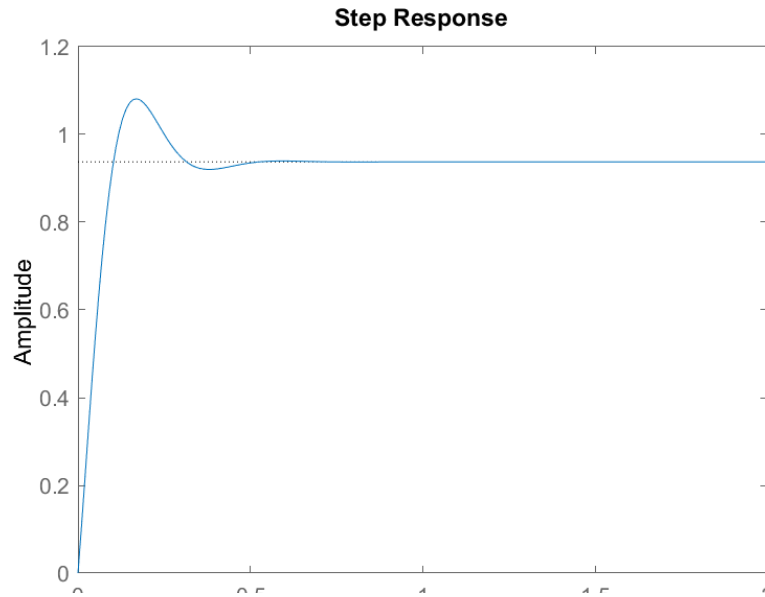
2.4.3 PİD Kontrol

Oransal kazancın (KP) arttırılması, aynı hata seviyesi için kontrol sinyalini orantılı olarak arttırma etkisine sahiptir. Kontrolörün belirli bir hata seviyesi için daha fazla "itmesi", kapalı döngü sisteminin daha hızlı tepki vermesine ve aynı zamanda daha fazla aşmasına neden olma eğilimindedir. Arttırmanın bir başka etkisi de kararlı durum hatasını azaltma eğiliminde olması, ancak ortadan kaldırmamasıdır.[48]



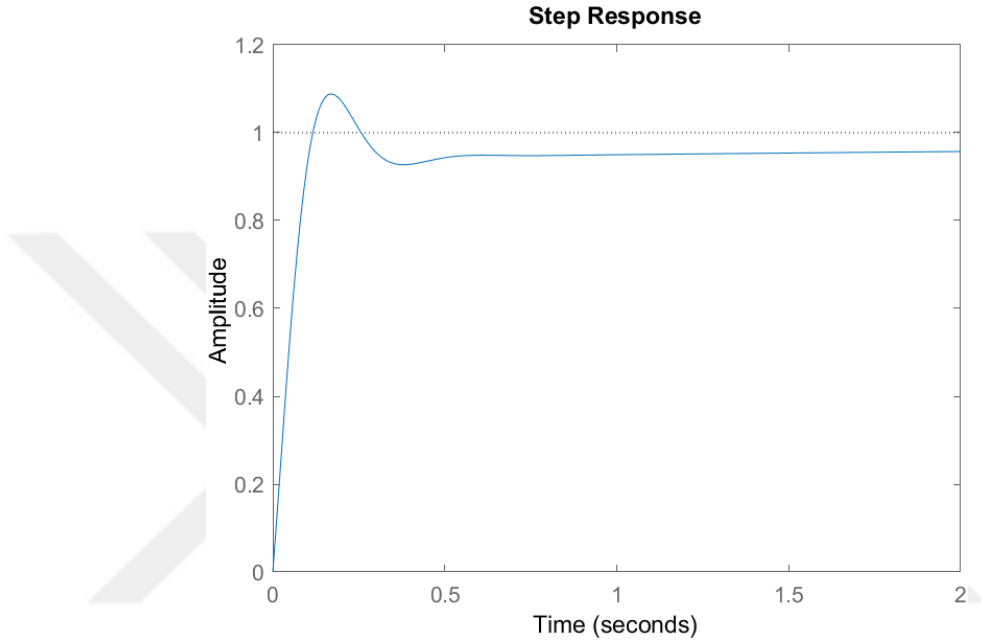
Şekil 43 K_p Katsayısı Birim Basamak Cevabı

Denetleyiciye (KD) bir türev teriminin eklenmesi, denetleyicinin hatayı "öngörme" yeteneğini ekler. Basit oransal kontrol ile, KD sabit ise, kontrolün artmasının tek yolu hatanın artmasıdır. Türev kontrolü ile, hatanın büyüklüğü hala nispeten küçük olsa bile, hata yukarı doğru eğim yapmaya başlarsa kontrol sinyali büyüyebilir. Bu beklenti, sisteme sönümleme ekleme ve dolayısıyla aşımı azaltma eğilimindedir. Bununla birlikte, bir türev teriminin eklenmesinin kararlı durum hatası üzerinde hiçbir etkisi yoktur.[56]



Şekil 44 K_d Katsayısı Birim Basamak Cevabı

Denetleyiciye (Kİ) bir integral terimin eklenmesi, sabit durum hatasını azaltmaya yardımcı olma eğilimindedir. Kalıcı, sabit bir hata varsa, entegratör oluşturur ve oluşturur, böylece kontrol sinyalini artırır ve hatayı azaltır. Bununla birlikte, integral teriminin bir dezavantajı, sistemi daha yavaş (ve salınımlı) hale getirebilmesidir, çünkü hata sinyali işaret değiştirdiğinde, entegratörün "gevşemesi" biraz zaman alabilir [59].



Şekil 45 K_i Katsayısı Birim Basamak Cevabı

Her denetleyici parametresinin (K_p , K_i , K_d) bir kapalı çevrim sistem üzerindeki genel etkileri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Bu yönergeler çoğu durumda geçerlidir, ancak hepsinde geçerli değildir. Bu kazançları tam olarak öğrenmek için gerçek sistem üzerinde test etmek gerekir.[49]

Tablo 5 Katsayıların Etkisi

	YÜKSELME ZAMANI	AŞMA	OTURMA ZAMANI	KALICI HATA
KP	Azaltır	Artırır	Küçük değişim	Azaltır
Kİ	Azaltır	Artırır	Artırır	Azaltır
KD	Küçük değişim	Azaltır	Azaltır	Değişiklik yok

2.4.4 Parçacık Sürü Optimizasyon

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), doğal sürülerin davranışından ilham alarak geliştirilen bir optimizasyon algoritmasıdır. PSO 'nun amacı, belirli bir problemde en iyi çözümü bulmaktır. Algoritma, parçacıklar adı verilen bireylerden oluşan bir popülasyon üzerinde çalışır. İşte PSO 'nun temel kavramları ve amacı:

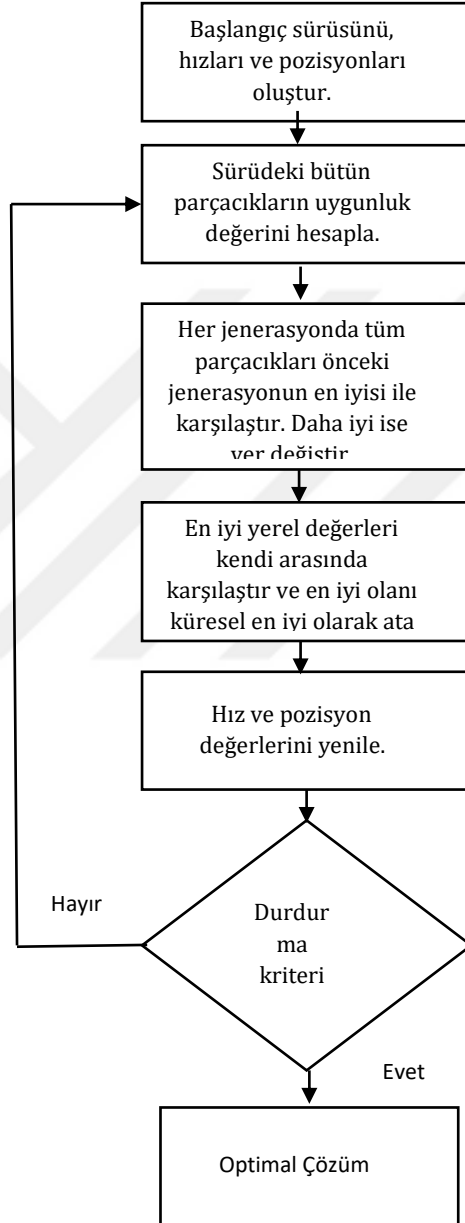
Parçacıklar: PSO 'da her parçacık, potansiyel bir çözümü temsil eder. Her parçacık, bir konum ve bir hız vektörüne sahiptir. Konum, parçacığın bulunduğu noktayı temsil ederken, hız, parçacığın hareket hızını ve yönlendirme bilgisini taşır.[68]

Uygunluk Fonksiyonu: Her parçacığın uygunluğunu ölçen bir fitness fonksiyonu tanımlanır. Fitness fonksiyonu, problem özelinde belirlenen bir hedefi veya kısıtlamaları değerlendirir. Parçacıkların uygunluk değerleri, çözümün kalitesini belirler.

En İyi Konumlar: Her parçacık, kendi geçmişindeki en iyi konumunu ve uygunluk değerini kaydeder. Bu en iyi konumlar, parçacıkların kişisel en iyi konumları olarak adlandırılır. Parçacıklar, kendi kişisel en iyi konumlarına ulaşmak için geçmiş deneyimlerinden faydalanır.

Sürü Lideri: PSO' da bir sürü lideri veya global en iyi konum bulunur. Sürü lideri, tüm parçacıklar arasında en iyi uygunluğa sahip olan konumu temsil eder. Parçacıklar, sürü liderine doğru yönlendirilerek daha iyi çözümleri keşfetmeye çalışır [70].

Güncelleme: Her parçacık, hız ve konumunu güncellemek için matematiksel denklemleri kullanır. Hız güncellemesi, parçacığın kendi en iyi konumu ve sürü liderinin etkisiyle belirlenir. Konum güncellemesi, parçacığın yeni konumunu hesaplar ve uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirir.



Şekil 46 Parçacık Sürü Optimizasyonu

PSO, parçacıkların birbirleriyle etkileşim içinde olduğu ve en iyi çözümü bulmak için bilgi ve deneyimlerini paylaştığı bir optimizasyon süreci sunar. Her bir parçacık, sürü lideri tarafından rehberlik edilerek daha iyi çözümleri keşfetmeye

çalışır. PSO, özellikle karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerinde etkili olabilir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir.

2.4.5 Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), biyolojik evrimin temel prensiplerini taklit ederek optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir algoritma türüdür. Doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi evrimsel süreçleri kullanarak popülasyon içindeki potansiyel çözümleri keşfeder ve geliştirir [50]. İşte Genetik Algoritmanın kavramı ve çalışma prensipleri:

Kromozom ve Genetik Kodlama: Genetik Algoritma, bir optimizasyon problemini çözmek için bir popülasyonu temsil eden kromozomlar kullanır. Kromozomlar, potansiyel çözümleri taşıyan genetik kodlamaları içerir. Genetik kodlamalar, probleme özgü olabilir ve değişkenlerin değerlerini veya parametrelerini temsil edebilir [66].

Başlangıç Popülasyonu: İlk adımda, rastgele veya belirlenmiş bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her kromozom, genetik kodlamayı kullanarak bir potansiyel çözümü temsil eder [67].

Uygunluk Fonksiyonu: Her kromozomun ne kadar iyi bir çözüm olduğunu ölçen bir uygunluk fonksiyonu tanımlanır. Uygunluk fonksiyonu, probleme özgü hedeflere veya kısıtlamalara göre tanımlanır. Uygunluk fonksiyonu, kromozomların performansını değerlendirir ve bu değerlere dayanarak seçim yapılır.

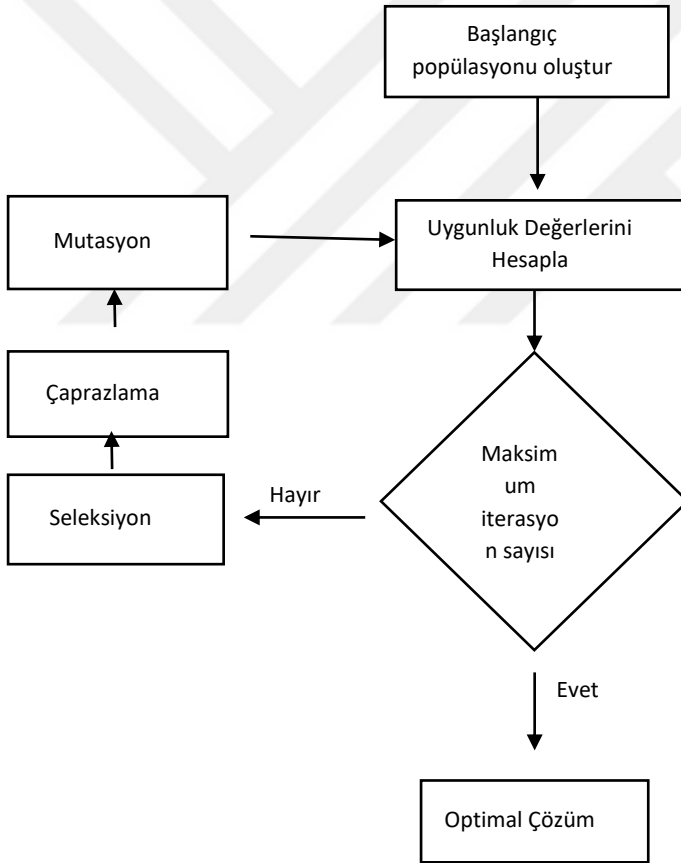
Seçim: Daha uygun kromozomların seçilerek bir sonraki nesille aktarılması işlemidir. Uygunluk değerleri, seçim olasılıklarını belirlemek için kullanılır. Yüksek uygunluk değerine sahip kromozomlar, daha yüksek seçim olasılığına sahip olur ve daha fazla çocuk üretme şansına sahip olurlar.

Çaprazlama: Seçilen kromozomlar arasında çaprazlama işlemi gerçekleştirilir. Çaprazlama, genetik materyalin karşılıklı olarak değiştirilmesiyle yeni çocuk

kromozomlarının oluşturulmasını sağlar. Bu işlem, yeni genetik kombinasyonların ortaya çıkmasını ve çözüm alanında keşfin artmasını sağlar.

Mutasyon: Yeni oluşturulan kromozomlara, düşük bir olasılıkla mutasyon uygulanır. Mutasyon, rastgele genetik değişiklikleri temsil eder ve yeni çeşitliliklerin ortaya çıkmasını sağlar. Mutasyon, çözüm alanında sıkışma veya yakınsama durumunu engeller ve daha iyi çözümlerin keşfedilmesini sağlar.

Sonlandırma Kriteri: Belirli bir durum veya süre kriterine göre algoritma sonlandırılır. Örneğin, belirli bir iterasyon sayısına veya en iyi uygunluk değerinin belirli bir eşiğe ulaşmasına dayalı olarak sonlandırılabilir.



Şekil 47 Genetik Algoritma

Genetik Algoritma, bu adımları iteratif olarak tekrarlayarak popülasyonu evrimleştirir ve daha iyi çözümleri keşfetmeye çalışır. İyi uyumlu kromozomlar daha fazla çocuk üretirken, mutasyon ve çaprazlama sayesinde yeni genetik kombinasyonlar oluşur ve çözüm alanı taranır. Bu süreç, optimizasyon problemlerinde global veya yakınsak çözümleri bulmada etkili olabilmektedir.

Genetik Algoritma, optimizasyon problemlerinin yanı sıra makine öğrenmesi, veri analitiği ve yapay zekâ gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.6 Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon

Rüzgarla Çalışan Optimizasyon (WDO), bir optimizasyon problemini çözmek için rüzgârın davranışını taklit eden bir algoritmadır. WDO, bir kümeleme algoritması olarak da bilinir.

WDO, bir problemi çözmek için aşağıdaki adımları kullanır:

Başlangıçta, bir kümeleme oluşturulur. Bu küme, problemin çözüm alanının bir temsilidir [80].

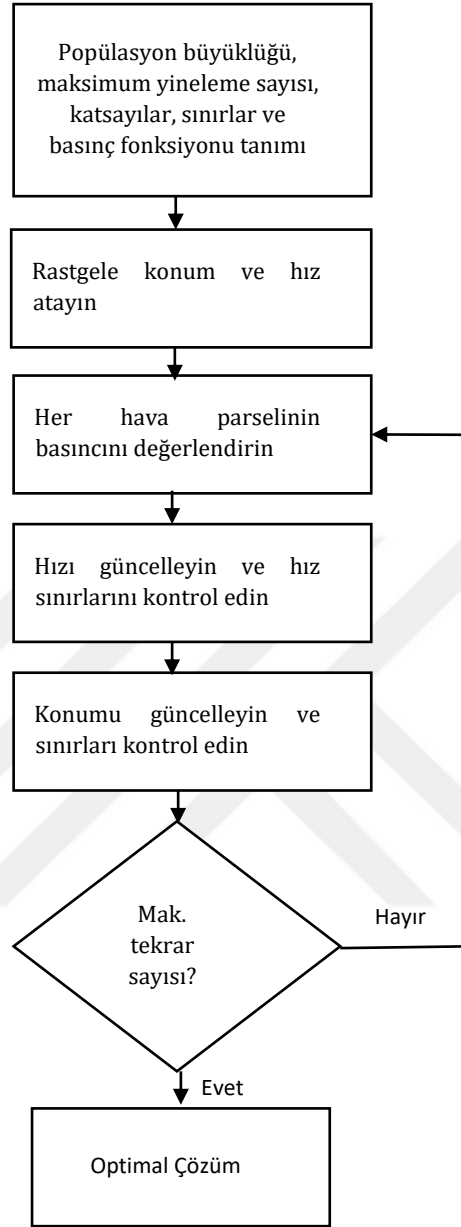
- Her küme, rüzgârın bir temsilidir.
- Her rüzgâr, bir çözümdür.
- Rüzgarlar, problemin hedef fonksiyonunu optimize etmek için hareket eder.
- En iyi çözüm, hedef fonksiyonunu en iyi şekilde optimize eden rüzgardır.

WDO, birçok farklı optimizasyon probleminde kullanılabilir. Bazı yaygın WDO uygulamaları şunlardır: Tasarım optimizasyonu, İşçi planlama, Üretim optimizasyonu, Finansal optimizasyon, Lojistik optimizasyonu, WDO, kontrol sistemleri alanında da kullanılmaktadır. Örneğin, WDO, rüzgâr türbinlerinin performansını iyileştirmek için kullanılabilir.

WDO' nun avantajları Basit ve etkilidir. Birçok farklı uygulamada kullanılabilir. Paralel olarak çalışabilir. WDO' nun dezavantajları şunlardır: Performansları, problemin özelliklerine bağlıdır. İyi bir performans elde etmek için doğru şekilde ayarlanmaları gerekir. WDO, kontrol sistemleri alanında hızla popülerlik kazanan bir algoritmadır. WDO, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için etkili bir yol sunmaktadır [82].

WDO' nun çalışma prensibi WDO, bir kümeleme algoritması olarak çalışır. Bir küme, bir grup nesnedir. WDO, bir problemi çözmek için bir kümeleme oluşturur. Bu küme, problemin çözüm alanının bir temsilidir.

Her küme, bir rüzgârın temsilidir. Rüzgarlar, problemin çözümleridir. WDO, rüzgarları, problemin hedef fonksiyonunu optimize etmek için hareket ettirir. En iyi çözüm, hedef fonksiyonunu en iyi şekilde optimize eden rüzgardır.



Şekil 48 Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon

WDO, rüzgarları, fabrikanın üretim çıktısını en iyi şekilde optimize etmek için hareket ettirir. En iyi çözüm, fabrikanın üretim çıktısını en iyi şekilde optimize eden rüzgardır. WDO' nun geleceği WDO, kontrol sistemleri alanında hızla popülerlik kazanan bir algoritmadır. WDO, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için etkili bir yol sunmaktadır. WDO, gelecekte kontrol sistemleri alanında daha da yaygın olarak kullanılacaktır.

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Akıllı esnek kirişin optimal kontrol sistemi için matematiksel model çıkartılmıştır, bulunan sonuçlar Ansys analizi ile karşılaştırılıp değenlerin uygun olduğuna karar verilmiştir. Deney seti hazırlandıktan sonra strain-guage yardımı ile sitem frekansı ölçülmüş daha önce hesaplanan ve benzetim edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Ölçümünde bu değerler ile paralel olduğu görülmüştür. Matematiksel model ile sistem kontrol denklemi elde edilmiş ve uygun PİD katsayılarını hesaplamak için Genetik Algoritma, Parçacık sürü optimizasyonu ve Rüzgarla çalışan optimizasyon tekniklerinden katsayı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler ile deney seti üzerinde uygulanmış ve en uygun katsayılı değerler seçilmiş ve aktif titreşim kontrolü sağlanmıştır.[65]

Aktif titreşim kontrolü, bir sistemdeki istenmeyen titreşimleri azaltmak veya kontrol etmek için kullanılan bir tekniktir. PİD (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörü, bir sistemdeki hatayı ölçer, bu hatayı analiz eder ve bir çıkış sinyali üreterek hatayı düzeltmeye çalışır.

Aktif titreşim kontrolü PİD kullanılarak şu adımlarla gerçekleştirilebilir:

Sistem modellemesi: Titreşim kontrolü yapılacak sistem modeli belirlenmelidir. Bu, sistemin dinamikleri, özellikle titreşimleri ile ilgili bilgileri içerir.

PİD Kontrolör Tasarımı: PİD kontrolör, Proportional (P), Integral (I) ve Derivative (D) terimlerinden oluşur. Her bir terim, sistemin farklı yönlerdeki hatalarını düzeltmeye yöneliktir. Proportional (P) terimi, mevcut hatanın büyüklüğüne orantılı bir kontrol sinyali üretir. Integral (I) terimi, geçmişteki hataların birikimini düzeltir ve sürekli bir düzeltme sağlar. Derivative (D) terimi, hatanın değişim hızını dikkate alarak hızlı düzeltme sağlar.

PİD Parametre Ayarı: PİD kontrolörün parametreleri, sistemin özelliklerine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Bu, deneme-yanılma yöntemleriyle veya sistem tanıma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Gerçek Zamanlı Kontrol: PİD kontrolörü, sistemdeki gerçek zamanlı verileri kullanarak sürekli olarak hatayı düzeltmeye çalışır.

Titreşim Sensörleri: Aktif titreşim kontrolü için sistemdeki titreşimleri ölçmek için sensörler kullanılmalıdır. Bu sensörler, kontrol algoritmasına geri bildirim sağlar.

Titreşim Sönümleme: PİD kontrolörü, titreşim sensörlerinden gelen verilere dayanarak, sistemdeki istenmeyen titreşimleri azaltmak için uygun kontrol sinyallerini üretir.

Her sistem farklı olduğundan, PİD kontrol parametreleri ve sistem modellemesi, spesifik bir uygulamaya bağlı olarak özelleştirilmelidir. Bu nedenle, uygulama spesifik gereksinimlere uygun bir kontrol stratejisi geliştirmek önemlidir. Bu çalışmada bu kontrol strateji olarak PİD parametreleri öneminden bahsedilmiştir.

Denklem 2.22 kullanılarak sistemin doğal frekansları elde edilmiştir.

$$\omega_1 = 1,875^2 \sqrt{\frac{69.10^9 \cdot \frac{0,002.(0,03)^3}{12}}{27000.0,4.0,002.0,03(0,3)^3}} = 63,3150 \frac{rad}{s} = 10,07Hz \quad (3.1)$$

$$\omega_1 = 4,694^2 \sqrt{\frac{69.10^9 \cdot \frac{0,002.(0,03)^3}{12}}{27000.0,4.0,002.0,03(0,3)^3}} = 3,968 \frac{rad}{s} = 63,15Hz \quad (3.2)$$

$$\omega_1 = 7,855^2 \sqrt{\frac{69.10^9 \cdot \frac{0,002.(0,03)^3}{12}}{27000.0,4.0,002.0,03(0,3)^3}} = 1,111 \frac{rad}{s} = 176,85Hz \quad (3.3)$$

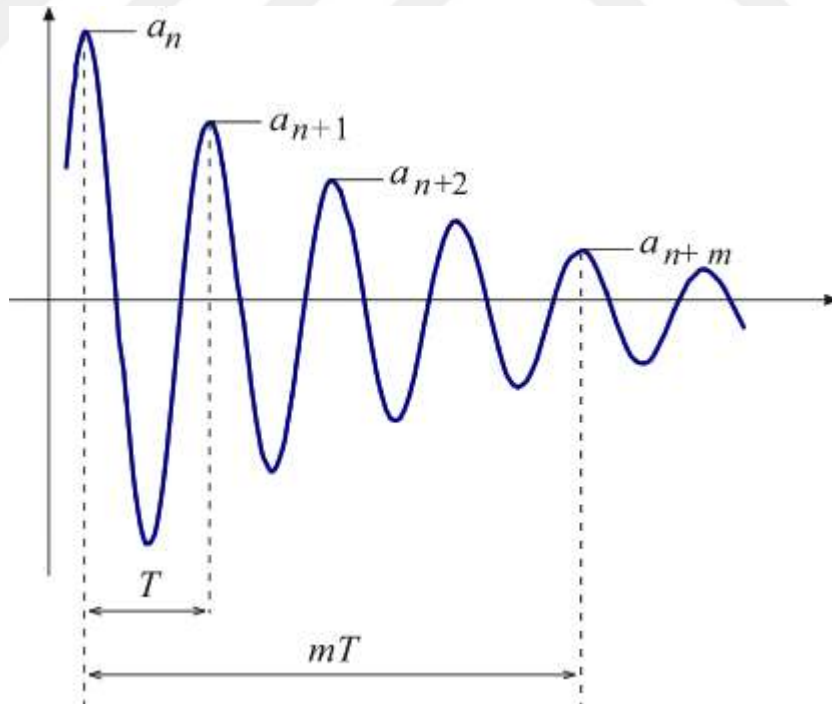
Burada bulunan sonuçlar ile Ansys modal analiz ile bulduğumuz sonuçları tablo 6'da karşılaştırılmıştır. Sonuçların çok yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 6 Mod Frekansları

	Ansys çözüm	Analitik çözüm
1. Mod	10,201Hz	10,0769Hz
2. Mod	63,918Hz	63,1554Hz
3. Mod	179,04Hz	176,8547Hz

3.1. Logaritmik azalım ile Sönüm katsayısı

Genel olarak sönümlü serbest titreşim dalga formunun genliği, Şekil 1'de gösterildiği gibi üstel olarak zayıflar. Bitişik genlik oranının logaritması alındığında, bu her zaman sabit bir değerdir. Bu bitişik genlik oranının doğal logaritmasına logaritmik azalma adı verilir ve bu, sönümleme özelliklerini temsil eden basit bir katsayı olarak yaygın şekilde kullanılır. Fizik açısından karakteristik bir değer olan sönüm oranı, kayıp faktörü logaritmik azalma ile hesaplanır.[54]



Şekil 49 Logaritmik Azalım

t_n Zamanındaki n'inci genliğin an olduğunu ve $n + 1, \dots, n + m$ 'inci genliğin $a_{n+1}, \dots, a_{n+m}$ olduğunu varsayarsak, logaritmik azalma δ aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} = \ln \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} \dots \dots = \ln \frac{a_{n+m-1}}{a_{n+m}} \quad (3.4)$$

Eğer doğruluk bir çevrimde yeterli değilse m çevrim ile hesaplayınız.

$$\ln \frac{a_n}{a_{n+1}} x \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} x \dots \dots x \frac{a_{n+m-1}}{a_{n+m}} = \ln \frac{a_n}{a_{n+m}} = m\delta \quad (3.5)$$

Denklem 3.5 sadeleştirilişe:

$$\delta = \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{a_n}{a_{n+m}} \quad (3.6)$$

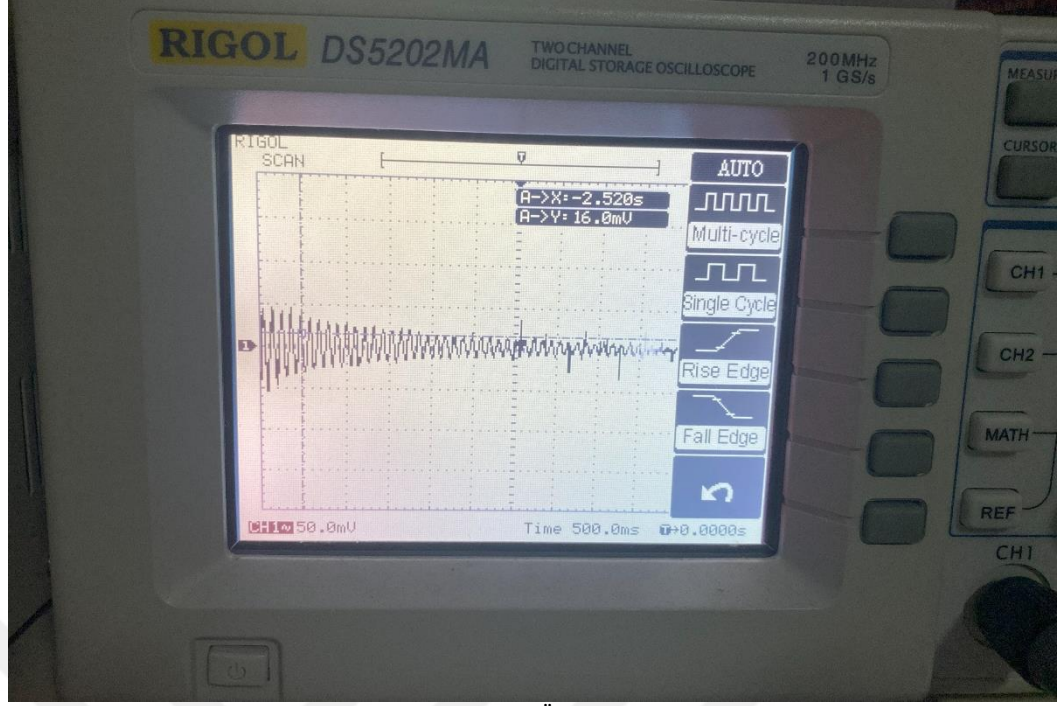
Buradan sönüm katsayısını elde etmek için

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.7)$$

Burada δ logaritmik azalma olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda sönümleme şu şekilde ifade edilebilir:

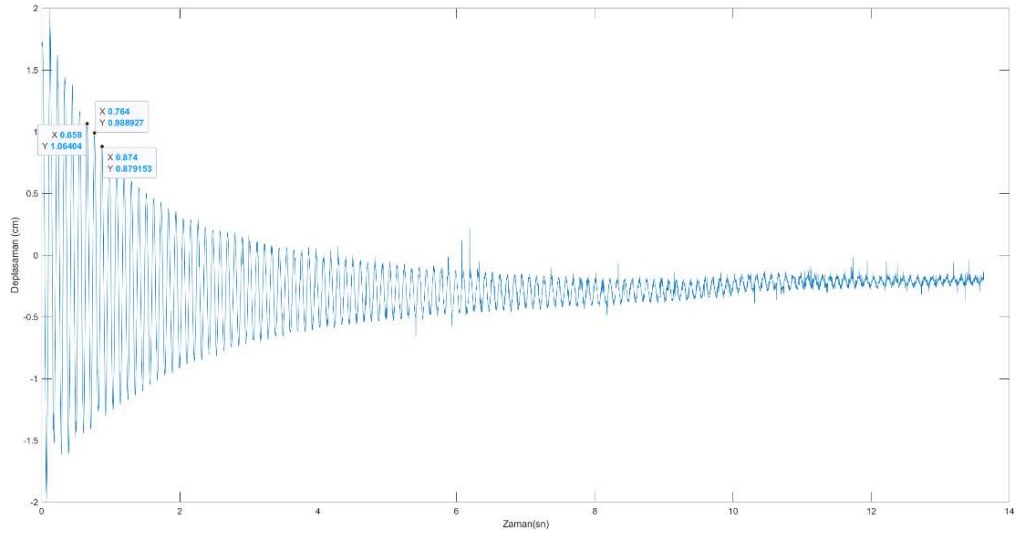
$$\zeta = \sqrt{\frac{\delta^2}{\delta^2 + (2\pi)^2}} \quad (3.8)$$

Bundan farklı olarak ardışık iki pik nokta yerine ilk noktadan sonraki n: pik nokta ikinci nokta olarak seçilirse ve yeni bir logaritmik azalma tanımlanabilir.



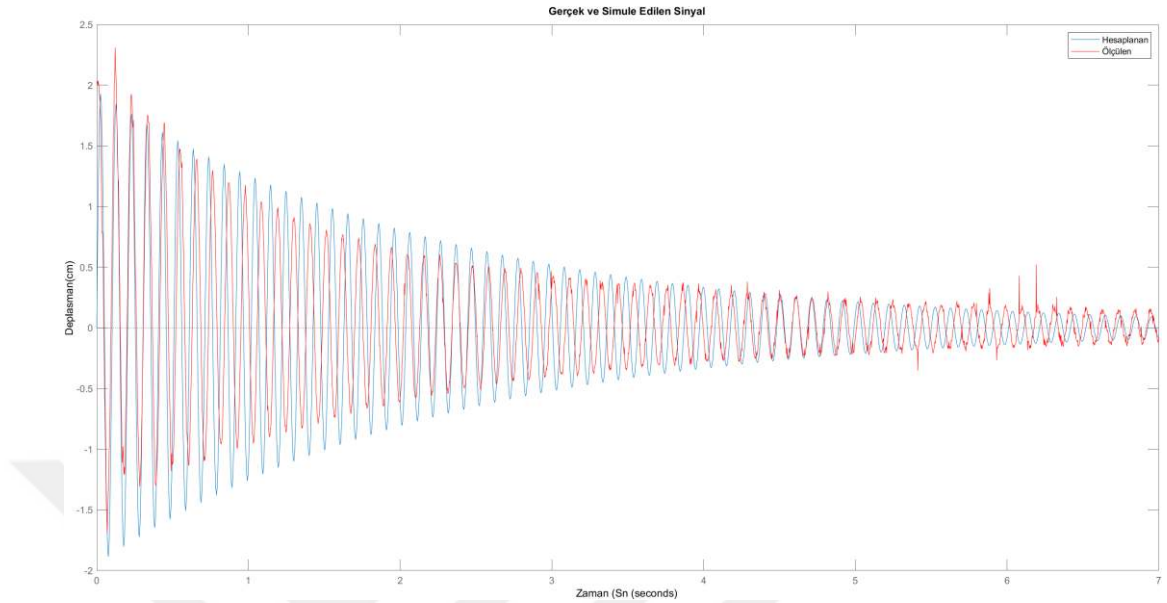
Şekil 50 Serbest Titreşim Ölçümü Osiloskop

Şekil 50 de Ankastre kirişe uygulanan kuvvet sonucu serbest titreşim grafiği verilmiştir.



Şekil 51 Serbest Titreşim Ölçümü

Bu grafikten logaritmik azalış ile elde edilen veriler ile sönümlü serbest titreşim denkleminde veriler yerleştirilince deneysel çalışmadan ölçülen verilerin doğruluğunu ispatlanmıştır.



Şekil 52 Ankastre Kirişin Serbest Titreşim Ölçülmüş Grafiği

3.2 PİD Parametreleri

Kiriş aktif titreşimi için PİD kontrol tercih edilmiş olup LQR veya LQC ile kontrol de yapılabilir. PİD tercih edilmesi deney setinde kullanılan algoritmalar ve uygulanma konusunda PİD iyi sonuçlar vermiştir.

Kapalı çevirim transfer fonksiyonu ($T(s)$), genellikle açık çeviri transfer fonksiyonu ($G(s)$) ve geri besleme elemanları içeren bir denklemle ifade edilir. İşte genel formül 3.9 da verilmiştir.

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (3.9)$$

Şekil 53 Gerçek ve Simüle Edilen Sinyal

Burada ($H(s)$) geri besleme elemanın transfer fonksiyonu olarak kullanılır. Bu denklem, bir kontrol sisteminin kapalı çevrim davranışını matematiksel olarak açıklar. Bu denklem, kontrol sistemlerinde tasarım ve analiz süreçlerinde önemli bir araç olarak kullanılır. PİD katsayıları kullanılarak kapalı çevrim transfer fonksiyonu şu şekilde ifade edilir.

$$T(s) = \frac{G(s)K_d s^2 + G(s)K_p s + G(s)K_i}{1 + G(s)H(s) + G(s)K_d s^2 + G(s)K_p s + G(s)K_i} \quad (3.10)$$

Bu denklem bir PİD kontrolcüsünü kontrol sistemine ekleyerek kapalı çevrim transfer fonksiyonunu ifade eder. PİD kontrolcüsü, sistem hatasının şu üç bileşeni üzerinden kontrol etmeye çalışır: oransal, integral ve türev. Bu gene denklem, PİD kontrolcüsünün birleşik etkisini ifade eder ve kontrol sistemlerinin çeşitli uygulamalarında kullanılır.

Maaliyet Fonksiyonu, genellikle bir performans kistası olarak kullanılır ve bu fonksiyonu en düşük değerde olması istenir. Kontrol sistemleri için yaygın maaliyet fonksiyonu, oluşan hatanın karesi olarak ifade edilir.

$$J = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (3.11)$$

Burada:

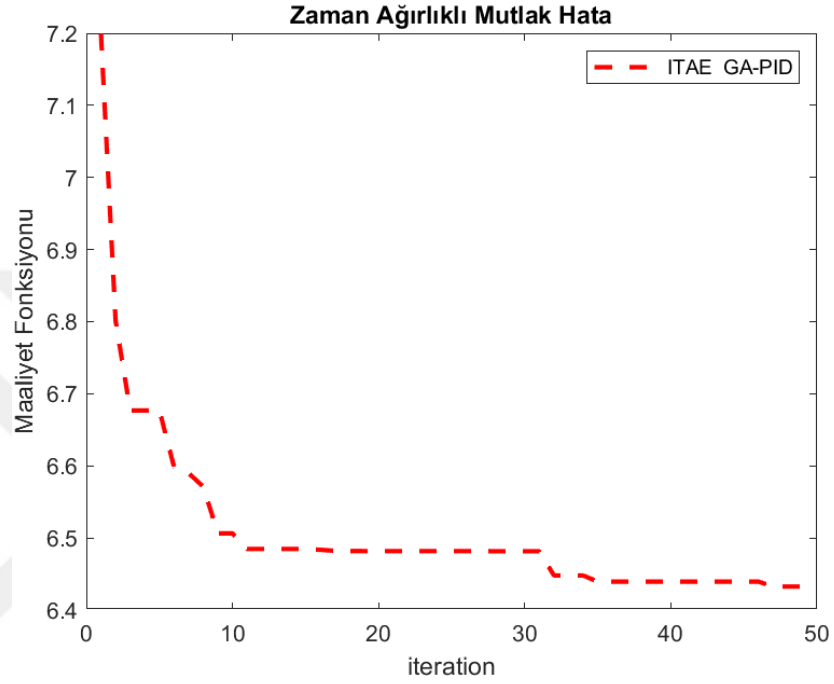
- J : Maliyet fonksiyonu
- $e(t)$: Hata $e(t) = r(t) - y(t)$
- $r(t)$: Referans sinyal (set değeri)
- $y(t)$: Sistem çıkışı

PİD kontrolcüde bu maaliyet fonksiyonu şu şekilde tanımlanır.

$$J = \int_0^{\infty} e(t)^2 + K_p^2 \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2 + K_i^2 \left(\int e(t) dt \right)^2 dt \quad (3.12)$$

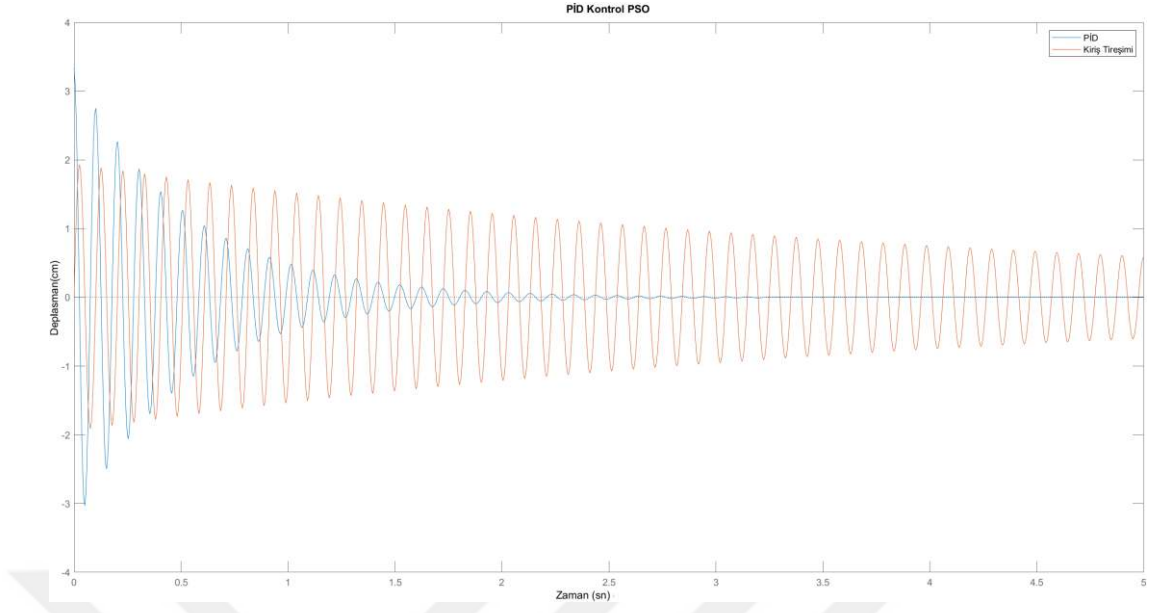
Denklem 3.12 maaliyet fonksiyonunu ifade eder. Kontrol stratejisinin performansını değerlendirmek için kullanılır. PİD kontrolcüsü parametrelerini optimize etmek için bu denklem kullanılmıştır.

Transfer fonksiyonunu elde ettiğimiz esnek giriş için maaliyet fonksiyonu tanımlanmış olup bunun sonucu elde edilen veriler sonucunda K_p K_i ve K_d katsayıları hesaplanmıştır.



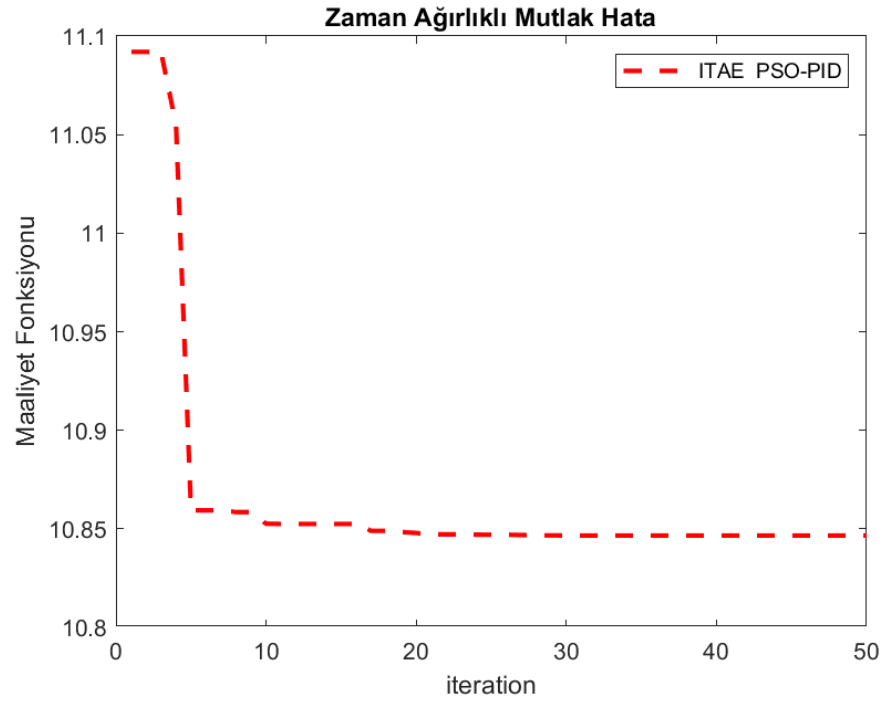
Şekil 54 Genetik Algoritma Mutlak Hata

Şekil 54 da Genetik algoritma sonucu elde edilen PİD katsayıları ve bu katsayılar ile kontrol sonucu elde edilen grafik verilmiştir. Kırmızı sistem serbest titreşimini ifade derken mavi ise Genetik Algoritma sonucu elde edilen PİD katsayıları ile kontrollü serbest titreşimi ifade etmektedir.



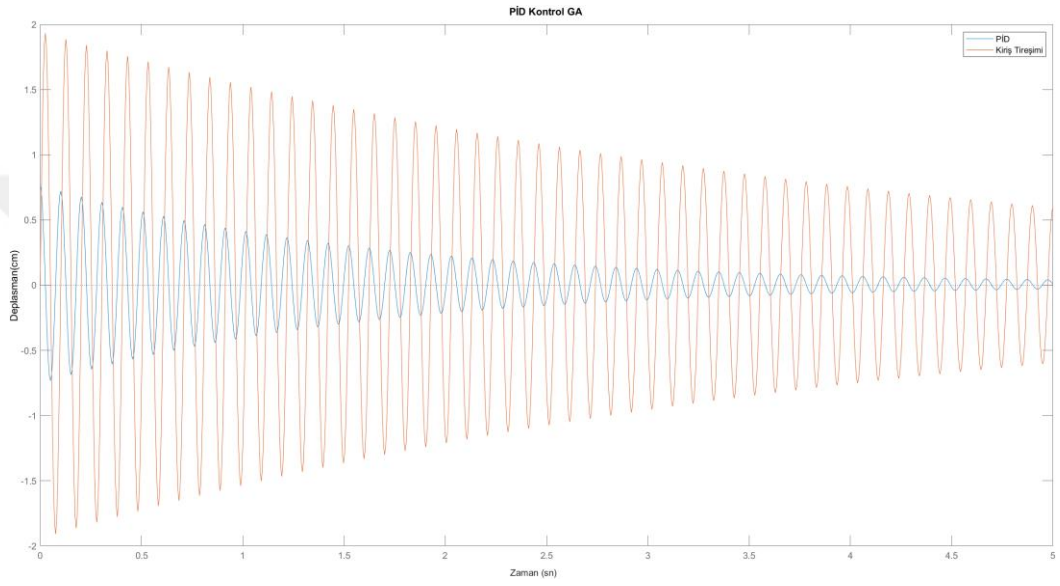
Şekil 55 Genetik Algoritma Katsayıları PİD Sonucu

Parçacık sürü optimizasyonu ile PİD katsayıları hesaplandığında aynı şekilde 50 iterasyon ile çalışılmıştır. Şekil 56’te maaliyet fonksiyonu için yapılan çalışma verilmiştir.



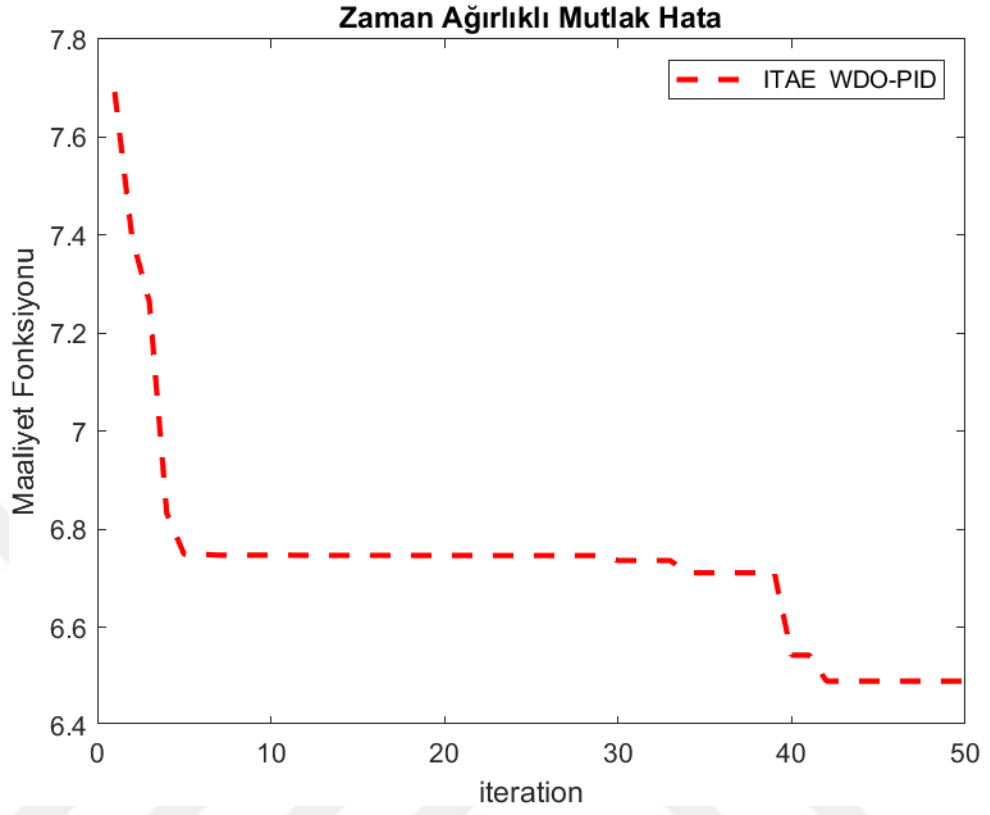
Şekil 56 Parçacık Sürü Optimizasyonu Mutlak Hata

Şekil 57’de Parçacık Sürü Optimizasyonu sonucu elde edilen PİD katsayılarının uygulanması ile elde edilen grafiktir. Kırmızı serbest titreşim sonucu olan grafiği ifade ederken mavi ise Parçacık Sürü Optimizasyonu ile elde edilen katsayılarla sistem kontrolünü göstermektedir.

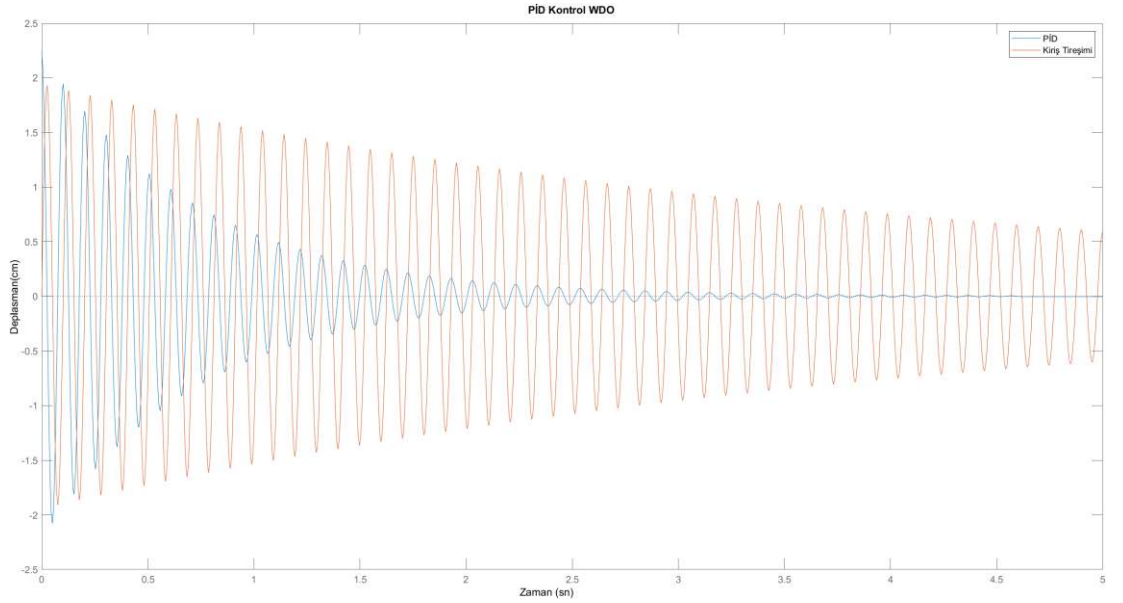


Şekil 57 Parçacık Sürü Optimizasyonu Katsayıları PİD Sonucu

Rüzgâr Güdümlü Optimizasyonda PİD için katsayılar hesaplanmış bununla ilgili maaliyet fonksiyonu grafiği şekil 58’te verilmiştir.

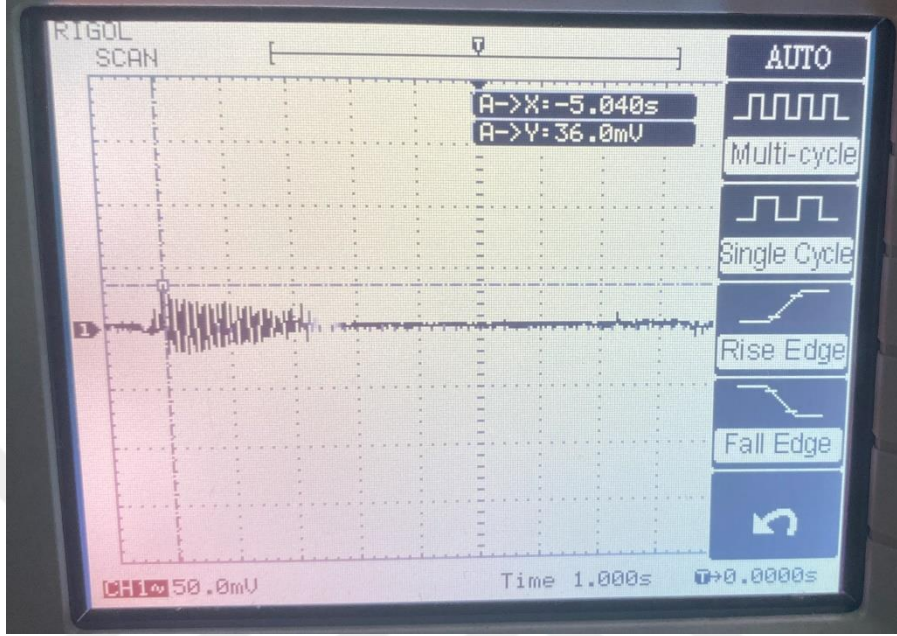


Şekil 58 WDO Mutlak Hata



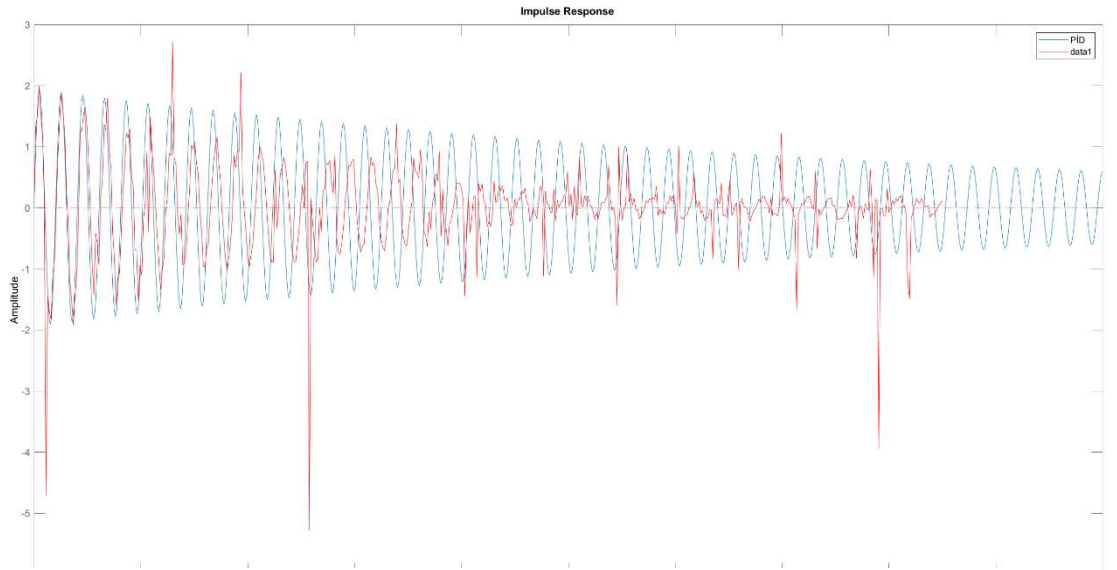
Şekil 59 Rüzgâr Güdümlü Optimizasyonu Katsayıları PİD Sonucu

Şekil 59’de Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon ile elde edilen PİD katsayılarıyla sistem kontroll verilmiştir. Kırmızı serbest titreşim sonucu olan grafiği ifade ederken mavi ise Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon ile elde edilen katsayılarla sistem kontrolünü göstermektedir.



Şekil 60 WDO Katsayıları PİD Sonucu

WDO ile elde edilen parametreler gerçek zamanlı deney setinde uygulandığında Şekil 60 elde edilmiştir.



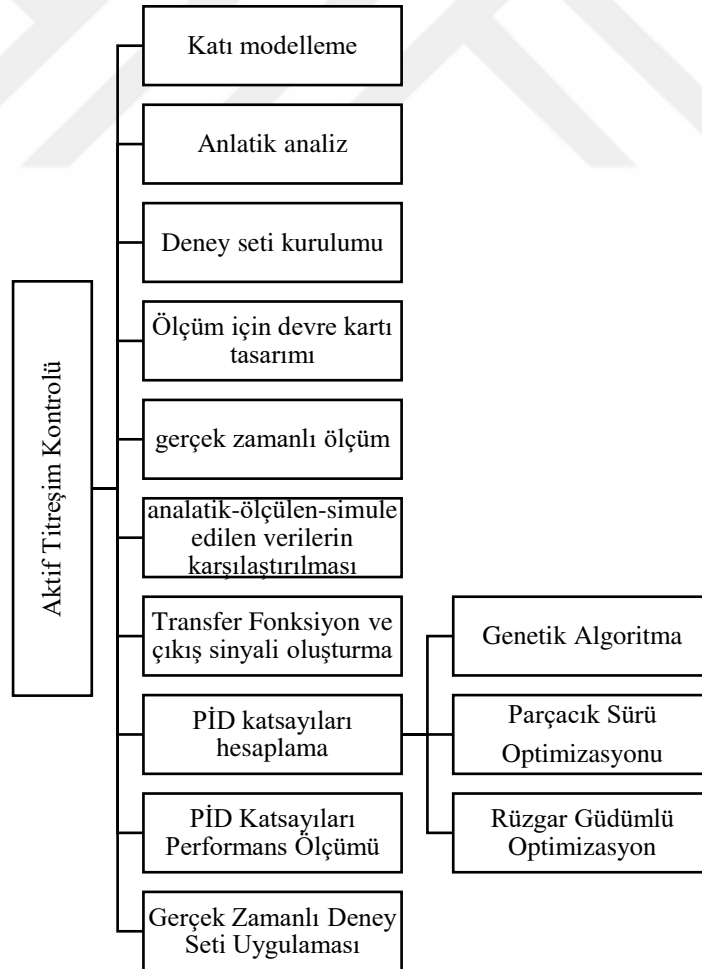
Şekil 61 WDO PİD Kontrol ve Kontrolsüz Serbest Titreşim

WDO ile elde edilen parametreler gerçek zamanlı deney setinde uygulandığında Şekil 61 elde edilmiştir. Osiloskop ıktısı Matlab ile tekrar modellenmiş ve serbest titreşim ile karşılaştırılmıştır.



4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ankastre giriş deney seti hazırlanmış. Ölçüleri ve kullanılan malzemeleri tespit için Thermo Scientific Niton XL5, el tipi bir XRF (X-ışını floresans spektrometresi) cihazı kullanılmıştır. hızlı, hassas ve taşınabilir bir şekilde malzeme analizi yapabilme özelliğine sahiptir. Bu cihaz, madencilik, metalurji, inşaat, endüstriyel atık yönetimi, petrokimya ve diğer endüstriyel uygulamalar için kullanılabilir. Malzeme tanıma olarak kullandığımız bu cihazda giriş için 6061 alüminyum tespit etmiştir. Daha sonra sertleştirme işlemine tabii tutulmuş bu malzeme için sertlik derecesi ölçümü için Durajet g5 model cihaz kullanılmıştır. Bu test ölçümü sonucunda malzeme için 6061 T5 olduğu tespit edilmiştir. 6061 T5, alüminyum alaşımının bir türüdür. Bu alaşım, yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. T5 ise alaşımın ısıtılma işlem durumunu belirtir. Bu durumda alaşım, çözeltiye sokulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmıştır.



Şekil 62 Araştırma Süreci

Malzeme tanımlama işleminden sonra malzeme için gerekli bilgiler belirlenmiştir. Elastisite modülü $69GPa$ yoğunluğu ise $2770 kg/m^3$ olarak belirlenmiştir. Uzunluk olarak $0,4m$ eni $0,3m$ ve kalınlık olarak $0,02m$ tercih edilmiştir. Bunun sonucu olarak atalet momenti $2 \times 10^{-11} m^4$ olarak bulunmuştur.

Bu bilgiler doğrultusunda $\omega_n = \sqrt{EI/ml^4}$ ile sistemin 1. Mod için doğal frekansı $63,31 rad/sn$ olarak bulunmuştur. Hertz ile belirlemek için $2/\pi$ çarpılınca $10,076 Hertz$ bulunmuştur. Aynı şekilde 2. Mod ve 3. Mod için sırasıyla $4,694$ ve 7.855 kullanarak 2. mod $63.1553 Hz$ ve 3. mod $176,8546 Hz$ olarak hesaplanmıştır. Bu deney seti için 1. Mod esas alınmış olup kontrol çalışmaları ve sistem dinamiği 1. mod üzerinden çalışılmıştır.

Deney seti Solidworks modelleme aracılığı ile modellenmiş olup, daha sonra Ansys analitik programı aracılığı ile incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda 1.mod $10,201 Hz$, 2. Mod $63,918 Hz$ ve 3. Mod $179,04 Hz$ bulunmuştur. Böylelikle analitik çözüm ile Ansys modal analiz sonuçlarının paralel olduğunu %98,7 doğruluk oranı olduğu anlaşılmıştır.

Deney seti üzerinde bulunan ankastre kiriş için ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Bunun için strain-guage kullanılmıştır. 1. Mod modal analizi incelenmiş olup kiriş en çok sehim açısı oluşturduğu $0 - 10mm$ arasında yapıştırılmıştır. Boyuna titreşimler ile ilgilendiğimiz için gerinim ölçeri kirişin boylamasına yapıştırılmıştır. Gerinim ölçeri ölçmek için tam wheatsone köprüsü kullanılmıştır. Bu sayede ölçüm hassasiyeti için en iyi başlangıç yapılmıştır. Gerinim ölçer $100ohm$ değerinde olup köprüde buna göre tasarlanmıştır. Köprü çıkışı olarak gerinim ölçerin durumuna göre $-0.004v$ ila $0.004v$ çıkış vermektedir. Bu kadar düşük gerilimleri ölçmek için opamp devresi hazırlanmıştır. LM741, genel amaçlı bir operasyonel yükselteç entegresidir. Bu entegre, geniş bir uygulama yelpazesi için kullanılabilir ve yaygın olarak elektronik devrelerde kullanılır. LM741'ün yüksek kazanç, geniş bant genişliği ve düşük giriş akımı gibi özellikleri bulunmaktadır. Bu sistem için 2 adet ön yükselteç seçilmiş olup bu sayede ölçüm aralığı $2v$ civarına çıkmıştır. Osiloskop ile ölçülen sinyal için stm32 mikro işlemci aile yapısından stm32f407 entegresi kullanılmıştır.

Stm32407 ile analog değer okumak için GPIO, DMA, UART ve ADC tanımlamaları yapılması gerekmektedir. GPIO yapılandırılmasında pinlerin okuma için input olacağı ve ADC için kullanılacağı hazırlanmıştır. DMA aktif hale getirilmiş ve bunu için uygun frekanslar seçilmiştir. Wheatstone köprüsünden gelen değerler için adc kanalı kullanılmış ve DMA ile UART üzerinden seri haberleşme aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Zaman domain olarak gelen veriler kaydedilmiş ve FFT uygulanarak harmonikleri incelenmiştir. Bunun sonucu olarak 9,998Hz olarak bulunmuştur. Böylelikle analitik hesap, Ansys ve deneysel sonuçların çok yakın değerler olduğu görülmüş ve deney setinin ölçüm sonuçlarının doğruluğu ispatlanmıştır.

Sistem transfer fonksiyonu hesaplanmış olup bu transfer fonksiyonu ile kontrol amaçlanmıştır. Logaritmik azalıştan elde edilen sönüm oranı ile dirençlik katsayıları hesaplanmış sistem transfer fonksiyonu simülante modellenmiştir. Modellenen bu sistem için FFT uygulandığında 1. Mod için doğal frekans 10,010Hz olduğu görülmüştür. Sistemin transfer fonksiyonu analitik ve simülasyon üzerinde hesaplanan ile gerçek deney sonuçlarının benzer olması ile sistemin kontrolü için PID katsayıları hesaplanmıştır.

Deney setinin kontrolü için piezo sensörler kullanılmış olup yüksek frekanslı olmalarından dolayı sistem ile uyumsuz olmuştur. Bunun yerine giriş Elektro mıknatıs tercih edilmiştir. Giriş üzerine mıknatıs yapııştırılmış ağırlığı önemsiz olarak kabul edilmiştir. Elektromıknatıs motor sürücü ile sürülmüştür 24v ile çalışabilmektedir. Hem çekme hem de itme kuvvetinden faydalanmak için PID katsayıları elde edildikten sonra sıfırın altında bir değer geldiğinde çekme, sıfırın üstünde bir değer geldiğinde itme kuvveti uygulamaktadır.

PID katsayılarını elde etmek için 3 adet meta sezgisel yöntem kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Rüzgâr Güdümlü Optimizasyon. Algoritmalarda amaç en iyi katsayıları bulmak. 3 algorithmada iterasyon olarak 100 iterasyonda çalıştırılmıştır. Popülasyon/parçacık olarak 20 tercih edilmiştir. Bu başlangıç koşullarında PID için katsayılar elde edilmiştir. Bunun

sonucu olarak transfer fonksiyona bu katsayılar ile uygulandığında elde edilen grafiklerden

Tablo 7 Performans Kriterleri

	YÜKSELME ZAMANI	AŞMA	OTURMA ZAMANI	KALICI HATA
GA	0,04	2,06	3,05	0,17
PSO	0,04	3,03	2,12	0,13
WDO	0,04	0,678	3,42	0,15

Simülasyon PSO oturma zamanı en başarılı olmasına rağmen aşma değeri kırışte deformasyona sebep olacağından tercih edilmemiştir. GA ile WDO ile kıyaslandığında WDO nun oturma zamanının daha düşük olması sebebi ile tercih edilmiştir. Bu parametreler simulink üzerinde denenmiş ve uygun olduğu karar verilmiştir.

Sistem kontrolü için STM32 mikroişlemcili denet kartından elektromıknatısı sürmek için PWM, PİD algoritmasını kullanmak için Timer kullanılmıştır. PİD için oransal katsayı olan K_p hata ile doğrudan çarpılırken, integral için geçmiş zaman ile şimdiki zaman hata toplamaları alınıp integral katsayısı olan K_i ile çarpılarak elde edilmiştir. Türev katsayısı ise hata ile sonraki hata arasındaki fark K_d katsayısı ile çarpılarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada Aktitreşim kontrolü için ankastre kırış üzerine çalışmış, sönüm kontrolü için PİD tercih edilmiş, sonuçları başarılı olduğu görülmüştür. LQR veya LQG gibi kontroller üzerine denemeler yapılabilir. PİD ve WDO bu çalışmada uygun değerler vermiş olup yaklaşık 17 sn de sönümlenen serbest titreşimli kırışın 4.5 gibi bir değerde sönümleyebildiği görülmüştür. Bu çalışma ile aktif titreşim kontrolü, bir sistemdeki istenmeyen titreşimleri azaltabilir veya ortadan kaldırabilir. Örneğin, bir araçta aktif titreşim kontrolü, sürücü ve yolcu konforunu artırabilir. Uzun süreli titreşim maruziyeti, insanları yorabilir ve hatta rahatsız edebilir. Aktif titreşim kontrolü, bu tür etkileri azaltabilir ve kullanıcıların daha uzun süre rahat bir şekilde sistemle etkileşimde bulunmalarına olanak tanımaktadır. Aktif titreşim kontrolü,

sistemdeki titreşimleri minimize ederek malzeme yorgunluğunu azaltabilir. Bu durum, sistem bileşenlerinin daha uzun ömürlü olmasına ve güvenlik açısından daha sağlam olmasına katkıda bulunabilir. Aktif titreşim kontrolü, hassas sistemlerde istenmeyen titreşimleri önleyerek daha iyi kontrol sağlamaktadır. Örneğin, laboratuvar ekipmanları veya üretim hatları gibi hassas sistemlerde aktif titreşim kontrolü, doğru sonuçlar elde etmeye yardımcı olabilir. Otomotiv endüstrisinde veya diğer makinelerde aktif titreşim kontrolü, yakıt verimliliğini artırabilir ve sistem performansını optimize edebilir. Aktif titreşim kontrolü, bir sistemi çeşitli çevresel koşullara daha uyumlu hale getirebilir. Örneğin, bir uçakta kullanıldığında, farklı hava koşullarına uyum sağlamak için titreşim kontrolü önemlidir.



5. KAYNAKÇA

[1] E. F. Crawley, J. Louis. Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures , AIAA Journal, October 1989.

[2] HIZARCI. B , KIRAL Z. Hava Jet İtkileri Kullanarak Mühendislik Yapılarının Aktif Titreşim Kontrolü. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi Yıl 2019, Cilt 7 , Sayı , Sayfalar 933 – 947

[3] V. Nalbantoğlu, G. Balas, P. Thompson, The role of performance criteria selection in the control of flexible structures', AIAA Guidance and Navigation and Control Conference, 1996, San Diego, CA, pages 1-9.

[4] Briscoe, J. , Dunn, S. Piezoelectric nanogenerators–a review of nanostructured piezoelectric energy harvesters. Nano Energy. 2015, 14 , 15–29 .

[5] Suleman, A.P.Costa, C Crawford, R. Sedaghati 'Wind tunnel aeroelastic response of piezoelectric and aileron controlled 3-D wing', CanSmart Workshop Smart Materials and Structures proceedings, Sep.1998

[6] Z. Mohamed, J.M. Martinsb, M.O. Tokhic, J. Sa da Costa , M.A. Bottob, Vibration control of a very flexible manipulator system Science direct 2005, 13, 267–277

[7] Shao M. , Huang Y. ve Silberschmidt V, Intelligent Manipulator with Flexible Link and Joint: Modeling and Vibration Control. Shock and Vibration. Volume 2020, Article ID 4671358, 15 pages

[8] Wang B. , Lou J. , Coupling dynamic modelling and parameter identification of a flexible manipulator system with harmonic drive. Measurement and Control 2019, Vol. 52(1-2) 122–130

[9] Abdullahi A. M., Mohamed Z., Muhammad M. Pd-Type Fuzzy Logic Control Approach For Vibration Control Of A Single-Link Flexible Manipulator.

International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES), 2013, Volume 1, Issue 4, PP.37-47.

[10] Hou R., Hu D., Gao Q., Lv M. Hybrid Control Method for a Flexible Manipulator. 2018, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 392.

[11] Tahir N.M., Bature A. A., Sambo A. U., Adamu Y., Vibration and Tracking Control of A Single Link Flexible Manipulator Using LQR and Command Shaping Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), 2016, Vol. 3 Issue 3.

[12] Tahir N. M., Hassan M. S., Mohamed Z., Ibrahim A. G., Output Based Input Shaping For Optimal Control Of Single Link Flexible Manipulator International Journal On Smart Sensing And Intelligent Systems., 2017 Vol. 10, no. 2.

[13] Ali A. A., Lateef R. A. R. , Saeed M. W. A Intelligent Tuning Of Vibration Mitigation Process For Single Line Manipulator Using Fuzzy Logic. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20 1233–1241

[14] Abdullahi A. M., Mohamed Z., Muhammad M. and. Bature A. A., Vibration And Tip Deflection Control Of A Single-Link Flexible Manipulator. International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS), 2013, Vol.3, No.4.

[15] Mohammed F. Y., Mohammed Y. Y., Hussein H. A., System Identification of Non-Linear System Using Genetic Algorithm for Development of Active Vibration Control Algorithm. Al-Mansour Journal Issue, 2012, (18).

[16] GÜLBAHÇE E. ÇELİK M., TINKIR M., Theoretical Investigation of a Structure for Active Vibration Control with Fuzzy Logic Approach. Applied Mechanics and Materials Vol. 2014 598 pp 529-533.

[17] Ros N. F. M., Saad M. S., Zakaria M. Z., Darus I. Z. M., Modeling of Flexible Beam Using System Identification Approach, 2nd International Conference on Advances in Engineering and Technology, 2017, (RTET-).

- [18] Saad M. S., Jamaluddin H. and Daru I. Z. M., Active vibration control of a flexible beam using system identification and controller tuning by evolutionary algorithm. *Journal of Vibration and Control*, 2013, 0(0) 1–16.
- [19] Zardian M. S., Ayob A. Intelligent modelling and active vibration control of flexible manipulator system. Jve international ltd. *Journal of vibroengineering*. 2015, Volume 17, Issue 4. ISSN 1392-8716.
- [20] Koroishi E. H., Faria A. W., Lara-Molina F. A., Steffen V. Fuzzy Modal Control Applied to Smart Composite Structure *Journal of Physics, Conference Series*, 2015, 628 012090.
- [21] Vasques C.M.A., Rodrigues J. D., Active Vibration Control Of Smart Piezoelectric Beams: Comparison of Classical And Optimal Feedback Control Strategies , *Science Direct, Computers and Structures* 2006, 84 1402–1414.
- [22] Rimašauskienė R., Jūrėnasa V., Radzienskib M., Rimašauskasa M., Ostachowicz W., Experimental Analysis Of Active–Passive Vibration Control On Thin-Walled Composite Beam. *ScienceDirect, Composite Structures* 2019, 223 110975.
- [23] Parameswaran A.P., Pai A.B., Tripathi P.K., and Gangadharan K.V., Active Vibration Control of a Smart Cantilever Beam on General Purpose Operating System, *Defence Science Journal*, Vol. 2013 63, No. 4, pp. 413-417.
- [24] JIA M., ZHENG S., HE R., Multi-Mode Optimal Fuzzy Active Vibration Control Of Composite Beams Laminated With Photostrictive Actuators, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(6): 1442–1450.
- [25] Yildirim K., Kucuk I., Active Piezoelectric Vibration Control For A Timoshenko Beam, *Science Direct, Journal of the Franklin Institute* 2016, 353, 95–107.

[26] Qiu Z., Shi M., Wang B., Xie Z., Active Boundary Control Of An Euler–Bernoulli Beam For Generating Vibration-Free State, Science Direct, Journal of Sound and Vibration 2007, 304 570–586.

[27] Qiu Z., Shi M., Wang B., Xie Z., Genetic Algorithm Based Active Vibration Control For A Moving Flexible Smart Beam Driven By A Pneumatic Rod Cylinder, Science Direct, Journal of Sound and Vibration, 2012, 331 2233–2256.

[28] Rahman T. A. Z., As'arry A., ve Jalil N. N. A., Active Vibration Control of a Flexible Beam Structure using Chaotic Fractal Search Algorithm, Engineering, Science Direct, 2017, 170 299 – 306

[29] Ramaratna A., Jalili N., and Dawson D. M., Semi-Active Vibration Control Using Piezoelectric-Based Switched Stiffness Proceeding of the 2004 America Control Conference Boston, Massachusetts, 2004 , 3 0 . 2.

[30] Qiu Z., Zhanga X., Wub H., Zhang H., Optimal Placement And Active Vibration Control For Piezoelectric Smart Flexible Cantilever Plate, Journal of Sound and Vibration, 2007, 301 ,521–543.

[31] Sui L., Shi X. X. G., Piezoelectric Actuator Design and Application on Active Vibration Control, Physics Procedia, 2012, 25, 1388 – 1396.

[32] Shen X., Dai Y., Chen M., Zhang L., and Li Yu Active Vibration Control of the Sting Used in Wind Tunnel: Comparison of Three Control Algorithms, Hindawi, Shock and Vibration Volume 2018, Article ID 1905049, 10 pages.

[33] Kermani M. R., Moallem M., Patel R. V., Optimizing the Performance of Piezoelectric Actuators for Active Vibration Control, Conference Paper 2002.

[34] Stancioiu D., Ouyang H., Optimal Vibration Control Of Beams Subjected To A Mass Moving At Constant Speed, Journal of Vibration and Control 2016, Vol. 22(14) 3202–3217.

[35] Khot SM., Yelve N. P., Tomar R., Desai S. , Vittal S., Active Vibration Control Of Cantilever Beam By Using PID Based Output Feedback Controller, Journal

[36] Zhang X., James K., William L. M., Experimental Implementation on Vibration Mode Control of a Moving 3-PRR Flexible Parallel Manipulator with Multiple PZT Transducers, Department of Mechanical and Industrial Engineering, , University of Toronto.

[37] Sohn J. W., Han Y. M., Choi S. B., Lee Y. S., Han M. S, Vibration and Position Tracking Control of a Flexible Beam Using SMA Wire Actuators, Journal of Vibration and Control, 200915(2): 263–281.

[38] Parameswaran A. P., Gangadharan KV., Parametric Modeling And Fpga Based Real Time Active Vibration Control Of A Piezoelectric Laminate Cantilever Beam At Resonance, Journal of Vibration and Control, 2015, Vol. 21(14) 2881–2895

[39] Deif S., Tawfik M., Kamal H. A., Vibration and Position Control of a Flexible Manipulator using a PD- tuned Controller with Modified Genetic Algorithm, ICCTA 2011, Alexandria, Egypt.

[40] Togun, N., Bağdatlı, S.M. The Vibration of Nanobeam Resting on Elastic Foundation Using Modified Couple Stress Theory. Technical Journal. 2018, 12, 4, 221-225.

[41] Mahmoodi, S. N., Craft, M. J., Southward, S. C., & Ahmadian, M. Active vibration control using optimized modified acceleration feedback with adaptive line enhancer for frequency tracking. Journal of Sound and Vibration, 2011. 330(7), 1300– 1311.

[42] Mani, Y., & Senthilkumar, M. Shape memory alloy-based adaptive-passive dynamic vibration absorber for vibration control in piping applications. Journal of Vibration and Control, 2015 21(9), 1838–1847.

- [43] Miller, R. K., Masri, S. F., Dehghanyar, T. J., & Caughey, T. K.. Active vibration control of large civil structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1988 114(9), 1542–1570.
- [44] Nakshatharan, S. S., Ruth, D. J. S., & Dhanalakshmi, K. (2015). Dynamic stabilization 180 and raPID motion control system driven by antagonistic shape memory alloy actuators. *Journal of Vibration and Control*, 21(16), 3189–3204.
- [45] Qiu, Z., Wang, X., Zhang, X.-M., & Liu, J. A novel vibration measurement and active control method for a hinged flexible two-connected piezoelectric plate. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018. 107, 357–395.
- [46] Soleymani, M., Abolmasoumi, A. H., Bahrami, H., Khalatbari-S, A., Khoshbin, E., & Sayahi, S. (2018). Modified sliding mode control of a seismic active mass damper system considering model uncertainties and input time delay. *Journal of Vibration and Control*, 24(6), 1051–1064.
- [47] Syed, H. H. Comparative study between positive position feedback and negative derivative feedback for vibration control of a flexible arm featuring piezoelectric actuator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017. 14(4), 172988141771880.
- [48] Yan, X., Xu, Z. D., & Shi, Q.-X. Fuzzy neural network control algorithm for asymmetric building structure with active tuned mass damper. *Journal of Vibration and Control*, 2020. 26(21–22), 2037–2049.
- [49] Zhao, G., Paknejad, A., Raze, G., Deraemaeker, A., Kerschen, G., & Collette, C. Nonlinear positive position feedback control for mitigation of nonlinear 184 vibrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019. 132, 457–470.
- [50] Kramer, O. Genetic algorithm essentials, volume 679, Springer 2018.
- [51] Daniel W Hart, P. Power Electronics, McGraw-Hill Education, 2010. <https://books.google.com.hk/books?id=mX6NxAEACAAJ>.

[52] Dusan Graovac, Marco Pürschel, A.K. MOSFET Power Losses Calculation Using the Datasheet Parameters, Technical Report, Infineon Technologies. 2006

[53] Calculation of conduction losses in a power rectifier, Technical Report, ST Microelectronics. 2011.

[54] Sarvi, M. and Salimian, M.R. Optimization of specific harmonics in multilevel converters by GA and PSO, 45th International Universities Power Engineering Conference 2010 UPEC2010, pp.1–4.

[55] Gerhold, C. H. and Rocha, R., "Active control of flexural vibrations in beams", Journal of Aerospace Engineering, 2 (3): 141–154 (1989).

[56] Dimitriadis, E. K., Fuller, C. R. and Rogers, C. A., "Piezoelectric actuators for distributed vibration excitation of thin plates", Journal of Vibration and Acoustics, 1991 113 (1): 100–107.

[57] Manning, W. J., Plummer, A. R. and Levesley, M. C., "Vibration control of a flexible beam with integrated actuators and sensors", Smart Materials and Structures, 2000 9 (6): 932–939.

[58] Omid, E. and Mahmoodi, S. N., "Vibration control of collocated smart structures using H_∞ modified positive position and velocity feedback", Journal of Vibration and Control, 2014 .22 (10): 2434–2442

[59] Zhang, S., Schmidt, R. and Qin, X., "Active vibration control of piezoelectric bonded smart structures using PID algorithm", Chinese Journal of Aeronautics, 2015. 28 (1): 305–313

[60] Yassin, B., Lahcen, A. and Zeriab, E. S. M., "Hybrid optimization procedure applied to optimal location finding for piezoelectric actuators and sensors for active vibration control", Applied Mathematical Modelling, 2018. 62: 701–716

[61] Bottega, W. J., "Engineering Vibrations 2 nd ed.", CRC Press, Boca Raton, FL, (2006).

[62] Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T. and Mazurek, D. F., "Mechanics of Materials 6 th ed.", McGraw-Hill, New York, (2012).

[63] Inman , D. J., "Vibration with Control 2 nd ed.", John Wiley & Sons Inc., Chichester, West Sussex, UK, (2017).

[64] Agarwal, J., Parmar, G., Gupta, R. ve Sikander, A. Analysis of Grey Wolf Optimizer Based Fractional Order PID Controller in Speed Control of DC Motor. Microsystem Technologies, 2018. 24(12), 4997-5006.

[65] Ahmmed, T., Akhter, I., Rezaul Karim, S. M. ve Sabbir Ahamed, F. A. Genetic Algorithm Based PID Parameter Optimization. American Journal of Intelligent Systems, 2020. 10(1), 8-13.

[66] Ali, R. S., Aldair, A. A. ve Almousawi, A. K. Design an Optimal PID Controller Using Artificial Bee Colony and Genetic Algorithm for Autonomous Mobile Robot. International Journal of Computer Applications, 2014. 100(16), 8-16.

[67] Altintas, G. ve Aydin, Y. Optimization of Fractional and Integer Order PID Parameters Using Big Bang Big Crunch and Genetic Algorithms for a MAGLEV System. IFAC-PapersOnLine, 2017. 50(1), 4881-4886.

[68] Baruah, S. ve Dewan, LA Comparative Study of PID Based Temperature Control of CSTR Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization [Conference presentation abstract]. International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies, Dehradun, India. 2017

[69] Chen, Y., Ma, Y. ve Yun, W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization. Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013. 11(3), 1524-1530.

[70] Deniz, F. N., Alagoz, B. B., Tan, N. ve Koseoglu, M Revisiting Four Approximation Methods for Fractional Order Transfer Function Implementations:

Stability Preservation, Time and Frequency Response Matching Analyses. Annual Reviews in Control, 2020 49, 239-257.

[71] Faris, T. A., Yusoff, K., Farid Atan, M., Rahman, N. A., Salleh, S. F. ve Wahab, N. A. Optimization of PID Tuning Using Genetic Algorithm. Journal of Applied Science & Process Engineering, 2015 2(2), 97-106.

[72] Gani, M.M., Islam, M. S. ve Ullah, M. A. Optimal PID Tuning for Controlling The Temperature of Electric Furnace by Genetic Algorithm. SN Applied Sciences, 2019 1(8). 1- 8.

[73] Nekoui, M. A., Pakzad, M. ve Pakzad, S.. Optimal Fractional Order PID Controllers Design Based on Genetic Algorithm for Time Delay Systems. International Symposium on Power Electronics, Novi Sad, Sırbistan 2017.

[74] Pillai, R. P., Jadhav, S. P. ve Patil, M. D. . Tuning of PID Controllers Using Advanced Genetic Algorithm. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2013 3(1), 1-6.

[75] Vatansever, F. ve Şen, D. Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simülatörü Tasarımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013. 7-18.

[76] Yüce, A.. Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinde Zaman Cevaplarının Hesaplanması ve Kontrol Uygulamaları. Doktora Tezi. Malatya: İnönü Üniversitesi 2018.

[77] Hasanzadeh, A., Zolghadri, M.R., Kaboli, S.H. and Homaifar, A. A genetic algorithm based programmed PWM optimum switching pattern calculation, The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003., volume 2, pp.2003. 1081–1085 Vol.2.

[78] Diaz-Gomez, P.A. and Hougen, D.F. Initial Population for Genetic Algorithms: A Metric Approach., GEM, 2007. syf.43–49.

[79] Kramer, O.). Genetic algorithm essentials, volume679, Springer. 2017

[80] Bayraktar Z. Komurcu M. Werner HD. Wind Driven Optimization (WDO): A Novel Nature-Inspired Optimization Algorithm and its Application to Electromagnetics Wind Driven Optimization (WDO): A Novel Nature-Inspired Optimization Algorithm and its Application to Electromagnetics 2010

[81] BSA/WDO based optimization of two-area multisources automatic generation control Dwivedi S. Rout S. Bhattacharya A Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Agartala, India 2017

[82] Rabindra kumar sahu et.al, A novel hybris PSO-PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power systems, Elect Power Energy system; pp. 880-893;vol. 64; 2015.

[83] Rao, Singiresu, Mechanical Vibrations, Addison Wesley, 1990, ISBN 0-201-50156-2

[84] Rao, Singiresu, Mechanical Vibrations, Addison Wesley, 1990, ISBN 0-201-50156-2

[85] Hartog, Den, Mechanical Vibrations, Dover Publications, 1985, ISBN 0-486-64785-4

[86] "Feedback and control systems" - JJ Di Steffano, AR Stubberud, IJ Williams. Schaums outline series, McGraw-Hill 1967