

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**ANKASTRE BİR KİRİŞİN PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİ
KULLANARAK AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ**

Ahmet Görkem ÇOLAK

2021014842

Danışman:

Prof. Dr. Mustafa Reşit USAL

**BİTİRME ÖDEVİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
ISPARTA – 2019**

İçindekiler

ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
TEŞEKKÜR.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yapısal Titreşimlerin Mühendislikteki Önemi	1
1.2. Titreşim Kontrol Yöntemleri	1
1.3. Projenin Amacı ve Kapsamı.....	2
2. TEORİ ALTYAPI.....	3
2.1 Kirişlerin Titreşim Mekaniği	3
2.2 Piezoelektrik Malzeme Teorisi	3
2.3 Aktif Titreşim Kontrolü (AVC) Prensipleri	4
3. DENEYSEL SİSTEM TASARIMI VE UYGULAMASI	5
3.1.Sistemin Genel Mimarisi ve Bileşenleri.....	5
3.1.1. Arduino: Kontrolcü ve Veri Toplama Platformu	7
3.2.Uyartım, Algılama ve Veri Toplama.....	7
3.3.Kontrol ve Sönümlleme Sistemi	7
3.4.Kontrolcü Yazılımı ve Uygulama Mantığı	8
3.4.1. Arduino Pin Konfigürasyonu ve Devre Bağlantıları.....	8
3.4.2. Arduino Kontrolcü Kodu	10
3.4.3. MATLAB Veri Analizi ve Kontrol Arayüzü Kodu	13
4.DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ	18
4.1.Sistemin Serbest Titreşim Analizi (Doğal Frekansların Belirlenmesi)	18
4.2. 6V Deney Sonuçları	20
4.2.1 6V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (KontROLSÜZ Durum)	20
4.2.2. 6V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)	22
4.3 7.5V Deney Sonuçları	24
4.3.1. 7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (KontROLSÜZ Durum)	24
4.3.2 7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)	26
4.4 9V Deney Sonuçları	28
4.4.1 9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (KontROLSÜZ Durum)	28
4.4.2 9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)	30
4.5 12V Deney Sonuçları	32

4.5.1 12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (Kontrolsüz Durum)	32
4.5.2 12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)	34
5.TARTIŞMA.....	36
5.1 Sonuçların Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması	36
5.1.1 6V Karşılaştırma.....	36
5.1.2 7.5V Karşılaştırma	39
5.1.3 9V Karşılaştırma.....	41
5.1.4 12V Karşılaştırma.....	44
5.2 Hata Kaynakları ve Belirsizlikler.....	46
6.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	48
6.1. Sonuç	48
6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler.....	49
7.KAYNAKÇA.....	50

ÖZET

BİTİRME ÖDEVİ

ANKASTRE BİR KİRİŞİN PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİ KULLANARAK AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Ahmet Görkem ÇOLAK

Süleyman Demirel Üniversitesi

Makine Mühendisliği Bölümü

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Reşit USAL

Bu çalışma, ankastre bir kirişin titreşimlerini aktif olarak sönümlemek amacıyla piezoelektrik sensörler kullanan bir geri beslemeli kontrol sisteminin tasarımını, geliştirilmesini ve deneysel olarak doğrulanmasını kapsamaktadır. Mekanik sistemlerde istenmeyen titreşimler, yapısal yorulma, gürültü ve performans düşüşü gibi ciddi sorunlara yol açabilmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için geliştirilen Aktif Titreşim Kontrolü (ATK) sistemleri, modern mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu proje kapsamında, alüminyum bir ankastre kirişin serbest ucuna monte edilen ayarlanabilir voltajlı bir DC motor ile sürekli bir uyarım sağlanmıştır. Kirişin titreşimleri, mesnet noktasına yakın bir bölgeye yerleştirilen bir piezoelektrik (PZT) sensör tarafından algılanmıştır. Algılanan bu titreşim verileri, bir Arduino Uno kartı üzerinden MATLAB ortamına aktarılarak gerçek zamanlı olarak işlenmiştir. Geliştirilen kontrol algoritması, titreşim genliği önceden belirlenmiş bir eşik değerini aştığında, yine kiriş üzerine yerleştirilmiş ikinci bir PZT eyleyiciyi (aktüatör) devreye sokmaktadır. Eyleyici, kirişin hareketine zıt yönde bir mekanik deformasyon yaratarak yıkıcı girişim prensibiyle titreşimi aktif olarak sönümlemeyi amaçlamaktadır. Sistemin açık ve kapalı çevrim performansını değerlendirmek için deneysel testler yapılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen AVC sisteminin özellikle kirişin birinci doğal frekansında meydana gelen rezonans durumunda titreşim genliğini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu çalışma, piezoelektrik malzemeler ve temel kontrol stratejileri kullanılarak düşük maliyetli ve etkili bir aktif titreşim sönümleme sisteminin uygulanabilirliğini başarılı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aktif Titreşim Kontrolü, Piezoelektrik, Rezonans Sönümleme, Geri Beslemeli Kontrol, Deneysel Titreşim Analizi, Akıllı Malzemeler, Arduino, MATLAB.

2025,

ABSTRACT

THESIS

VIBRATION MITIGATION IN A CANTILEVER BEAM VIA PIEZOELECTRIC-BASED ACTIVE CONTROL

Ahmet Görkem  OLAK

**Süleyman Demirel University
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Re it USAL

This study covers the design, development, and experimental validation of a feedback control system that uses piezoelectric sensor to actively damp the vibrations of a cantilever beam. Unwanted vibrations in mechanical systems can lead to serious problems such as structural fatigue, noise, and performance degradation. Active Vibration Control (AVC) systems, developed to overcome these issues, hold a significant place in modern engineering applications. Within the scope of this project, continuous excitation was provided by a variable voltage DC motor mounted on the free end of an aluminum cantilever beam. The vibrations of the beam were detected by a piezoelectric (PZT) sensor placed near the clamped end. This detected vibration data was transferred to the MATLAB environment via an Arduino Uno board and processed in real-time. The developed control algorithm activates a second PZT actuator, also placed on the beam, when the vibration amplitude exceeds a predefined threshold. The actuator aims to actively damp the vibration through the principle of destructive interference by creating a mechanical deformation in the opposite direction of the beam's motion. Experimental tests were conducted to evaluate the open-loop and closed-loop performance of the system. The results show that the developed AVC system significantly reduces the vibration amplitude, especially during resonance at the beam's first natural frequency. This study successfully demonstrates the feasibility of a low-cost and effective active vibration damping system using piezoelectric materials and basic control strategies.

Keywords: Active Vibration Control, Piezoelectric, Resonance Damping, Feedback Control, Experimental Vibration Analysis, Smart Materials, Arduino, MATLAB.

2025,

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, heyecanıma ortak olan, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan, literatür araştırmalarımda ve araştırmalarımın yürütülmesinde katkı sağlayan, bilimsel çalışma disiplini öğrenmem konusunda çok büyük emeği olan akademisyenliğinde mühendislikten gelen ufuk açıcı ve mühendislikte çözüm odaklı yaklaşımlarıyla bana rol model olan değerli Danışman hocamız Prof. Dr. Mustafa Reşit USAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Görkem ÇOLAK

ISPARTA ,2025

Şekil 3.1 Blok Diyagramı	5
Şekil 3.2: Kurulan Aktif Titreşim Kontrol Sistemi Deney Düzeneginin Genel Görünümü.....	6
Şekil 3.3 Arduino Üzerinde Yapılanlar (Adım 1).....	12
Şekil 3.3 Arduino Üzerinde Yapılanlar (Adım 2).....	12
Şekil 3.5 Matlab Üzerinde Yapılanlar.....	17
Şekil 4.1: Darbe Testi Sonucu Kirişin Serbest Sönümlü Titreşim Tepkisi.....	18
Şekil 4.2: Şekil 4.1'deki Sinyalin FFT Analizi Sonucu (Frekans-Genlik Grafiği).....	19
Şekil 4.3: 6V Tahrik Altında Sistemin Titreşim Tepkisi (Zaman-Genlik Grafiği).....	20
Şekil 4.4: 6V Gerilim Altında Sistemin Frekans Tepkisi (FFT)	21
Şekil 4.5: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (6V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)	22
Şekil 4.6: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (6V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	23
Şekil 4.7: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken).....	24
Şekil 4.8: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken).....	25
Şekil 4.9: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	26
Şekil 4.10: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	27
Şekil 4.11: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken).....	28
Şekil 4.12: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken).....	29
Şekil 4.13: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	30
Şekil 4.14: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	31
Şekil 4.15: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken).....	32

Şekil 4.16: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken).....	33
Şekil 4.17: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	34
Şekil 4.18: Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken).....	35
Şekil 5.1 Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (6V Tahrik Altında).....	36
Şekil 5.2. Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (12V Tahrik Altında).....	37
Şekil 5.3. Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (7.5V Tahrik Altında).....	38
Şekil 5.4: Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (7.5V Tahrik Altında).....	39
Şekil 5.5: Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (9V Tahrik Altında).....	40
Şekil 5.6: Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (9V Tahrik Altında).....	41
Şekil 5.7: Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (12V Tahrik Altında)	42
Şekil 5.8: Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (12V Tahrik Altında)	43

Tablo 3.1: Sistem Bileşenlerinin Teknik Özellikleri	5
Tablo 3.2 Arduino Bağlantı Şeması	8
Tablo 5.1 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (6V Tahrik Altında)	31
Tablo 5.2 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (7.5V Tahrik Altında)	33
Tablo 5.3 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (9V Tahrik Altında)	35
Tablo 5.4 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (12V Tahrik Altında)	37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Semboller

- E : Elastisite Modülü (Young's Modulus)
- I : Alan Atalet Momenti (Area Moment of Inertia)
- ρ : Yoğunluk (Density)
- A : Kesit Alanı (Cross-sectional Area)
- L : Kiriş Uzunluğu (Beam Length)
- $w(x,t)$: Kirişin Enine Yer Değiştirmesi (Transverse Displacement)
- ω_n : n 'inci Doğal Frekans (nth Natural Frequency)
- k_n : n 'inci Mod Sabiti (nth Mode Constant)
- σ : Mekanik Gerilme (Stress)
- ϵ : Mekanik Gerinim (Strain)
- D : Elektriksel Yer Değiştirme (Electric Displacement)
- E_{field} : Elektrik Alan (Electric Field)
- d : Piezoelektrik Yük Katsayısı (Piezoelectric Charge Coefficient)

Kısaltmalar

- ATK: Aktif Titreşim Kontrolü (Active Vibration Control)
- PZT: Kurşun Zirkonat Titanat (Lead Zirconate Titanate)
- DC: Doğru Akım (Direct Current)
- FFT: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
- FEA: Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)
- PID: Oransal-İntegral-Türevsel (Proportional-Integral-Derivative)

1. GİRİŞ

1.1 Yapısal Titreşimlerin Mühendislikteki Önemi

Titreşim, mekanik sistemlerin ve yapıların dinamiğinde temel bir olgudur. Mühendislik yapılarının neredeyse tamamı, çalışma koşulları veya çevresel etkenler nedeniyle bir tür titreşim hareketine maruz kalır.[4] Bu titreşimler, bazı durumlarda (örneğin, elekler veya vibrasyonlu konveyörler) sistemin işlevinin bir parçası olsa da çoğu zaman istenmeyen ve zararlı etkilere sahiptir. Kontrolsüz titreşimler, yapısal bileşenlerde yüksek çevrimli yorulmaya neden olarak malzemenin beklenenden çok daha erken hasar görmesine ve hatta arızalara yol açabilir. [5, 6]

Bu olgunun kritik örnekleri, havacılık ve uzay mühendisliğinde sıkça görülür. Uçak kanatları ve gövde panelleri gibi esnek yapılar, aerodinamik kuvvetler ve motorların çalışması nedeniyle sürekli titreşime maruz kalır.[7, 8] Benzer şekilde, yüksek hızlı makineler, otomotiv süspansiyon sistemleri ve köprüler gibi sivil yapılar da operasyonel ve çevresel yükler altında titreşirler.[4, 9, 10] Bu titreşimler sadece yapısal bütünlüğü tehdit etmekle kalmaz, aynı zamanda rahatsız edici gürültüye, hassas ekipmanların performansının düşmesine ve insan konforunun azalmasına neden olur. Bu nedenle, titreşimlerin analizi ve kontrolü, modern makine mühendisliğinin en temel ve önemli çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır.

1.2. Titreşim Kontrol Yöntemleri

Mühendislik yapılarındaki istenmeyen titreşimleri azaltmak veya ortadan kaldırmak için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler temel olarak pasif ve aktif kontrol yöntemleri olarak iki ana kategoriye ayrılır.

- **Pasif Titreşim Kontrolü:** Bu yöntemler, sisteme harici bir enerji girişi gerektirmeyen ve yapının kendi fiziksel özelliklerini değiştirerek titreşimi sönümleyen tekniklerdir. En yaygın pasif yöntemler arasında malzeme sönümlemesi (yapıya viskoelastik malzemeler eklemek), titreşim izolasyonu (yay ve sönümleyici elemanlar kullanarak yapıyı titreşim kaynağından ayırmak) ve ayarlı kütle sönümleyiciler (TMD) bulunur.[11] Pasif sistemler, özellikle yüksek frekans aralıklarında etkili, güvenilir ve düşük maliyetli çözümler sunar. Ancak en büyük kısıtlılıkları, genellikle belirli bir rezonans frekansını hedef alacak şekilde tasarlanmaları ve değişen çalışma koşullarına veya uyartım frekanslarına uyum sağlayamamalarıdır. [5, 6]
- **Aktif Titreşim Kontrolü (ATK):** Pasif yöntemlerin bu adaptasyon eksikliğini gidermek için Aktif Titreşim Kontrolü (ATK) sistemleri geliştirilmiştir. ATK, bir yapının titreşimlerini sensörler aracılığıyla sürekli olarak ölçen, bu verileri bir kontrolcüde işleyen ve eyleyiciler (aktüatörler) vasıtasıyla yapıya sönümleyici kuvvetler uygulayan bir sistemdir. [6, 12] Bu sistemler, harici bir güç kaynağı gerektirir ve gerçek zamanlı olarak çalışarak değişen koşullara uyum sağlayabilir. Özellikle pasif yöntemlerin yetersiz kaldığı düşük frekanslı titreşimlerin kontrolünde oldukça etkilidirler.[6] Bu proje, piezoelektrik malzemelerin akıllı özelliklerinden faydalanan bir ATK sisteminin pratik bir uygulamasını sunmaktadır. [5, 13, 14]

1.3. Projenin Amacı ve Kapsamı

- **Amaç:** Bu projenin temel amacı, piezoelektrik sensör ve eyleyici kullanarak bir ankastre kirişin titreşimlerini aktif olarak sönümleyen bir geri beslemeli kontrol sistemini tasarlamak, kurmak ve deneysel olarak doğrulamaktır. Proje, mekanik titreşimler, akıllı malzemeler ve kontrol teorisi prensiplerini bir araya getirerek, temel bir ATK sisteminin çalışma prensibini ve etkinliğini göstermeyi hedeflemektedir.
- **Kapsam ve Sınırlamalar:** Bir bitirme projesinin başarısı, hedeflerinin net bir şekilde tanımlanması ve sınırlarının belirlenmesiyle yakından ilişkilidir. Bu çalışmanın kapsamı ve sınırlamaları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:
- **Yapı:** İncelenen sistem, tek bir mesnetten sabitlenmiş (ankastre) ve bilinen geometrik ve malzeme özelliklerine sahip bir alüminyum kiriştir.
- **Uyartım:** Titreşim kaynağı olarak, kirişin serbest ucuna monte edilmiş ve frekansı ayarlanabilir bir DC motor tarafından üretilen harmonik bir bozucu etki kullanılacaktır.
- **Algılama ve Eylem:** Sistemde algılama için bir adet piezoelektrik (PZT) sensör ve sönümleme için bir adet piezoelektrik (PZT) eyleyici kullanılacaktır.
- **Kontrol Algoritması:** Kontrol mantığı, MATLAB tarafından okunan sensör sinyalinin genliği belirli bir eşik değerini aştığında Arduino'nun eyleyiciyi tetiklediği temel bir "aç-kapa" geri beslemeli kontrol stratejisine dayanmaktadır.
- **Analiz:** Çalışma, kirişin özellikle birinci eğilme modundaki titreşimlerinin sönümlenmesine odaklanacaktır.

2. TEORİ ALTYAPI

Bu bölümde, projenin temelini oluşturan mekanik titreşimler, piezoelektrik malzemeler ve aktif titreşim kontrolü konularındaki teorik prensipler detaylı bir şekilde incelenmektedir.

2.1 Kirişlerin Titreşim Mekaniği

Kirişler, mühendislik yapılarında en sık karşılaşılan temel elemanlardan biridir. Bu elemanların dinamik davranışını anlamak, titreşim analizi ve kontrolü için kritik öneme sahiptir. Euler-Bernoulli teorisine göre, bir kirişin enine titreşimini tanımlayan hareket denklemi, $w(x,t)$ enine yer değiştirmeyi göstermek üzere, aşağıdaki dördüncü mertebeden kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilir [21, 23]:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = f(x,t)$$

Bu denklemde E malzemenin Elastisite Modülü'nü, I kesitin alan atalet momentini, ρ yoğunluğunu, A kesit alanını ve $f(x,t)$ kiriş boyunca dağılmış dış kuvveti temsil eder.

- **Doğal Frekanslar, Mod Şekilleri ve Rezonans:** Bir sistemin dış kuvvet olmaksızın yaptığı titreşimlere serbest titreşim denir ve bu titreşimlerin frekansları sistemin doğal frekansları olarak adlandırılır. Doğal frekanslar, sistemin kütle ve rijitlik özelliklerine bağlıdır ve sistemin özgün bir karakteristiğidir. [24, 25] Rezonans, bir yapıya etki eden periyodik bir dış kuvvetin frekansının, yapının doğal frekanslarından biriyle çakışması durumunda ortaya çıkan tehlikeli bir olgudur. Bu durumda, titreşim genliği teorik olarak sonsuza dek artma eğilimi gösterir ve pratikte sönümlenme tarafından sınırlandırılabilir. [24, 27] Bu projenin temel amacı, rezonans durumunda oluşan bu büyük genlikli titreşimleri aktif olarak kontrol altına almaktır.

2.2 Piezoelektrik Malzeme Teorisi

Piezoelektrik malzemeler, mekanik ve elektriksel alanlar arasında çift yönlü bir enerji dönüşümü sağlayan "akıllı malzemeler" sınıfına aittir. [14, 29] Bu özellikleri, onları hem sensör hem de eyleyici olarak kullanıma son derece uygun kılar.

- **Doğrudan ve Ters Piezoelektrik Etki:** Piezoelektrik bir malzemeye mekanik bir gerilme veya gerinim uygulandığında, malzemenin yüzeyleri arasında bir elektrik potansiyel farkı (voltaj) veya elektrik yükü oluşur (Doğrudan Etki). Tam tersi olarak, malzemeye harici bir elektrik alan veya voltaj uygulandığında, malzeme mekanik olarak deforme olur (Ters Etki). Projemizde PZT-1 sensörü doğrudan etkiyi, PZT-2 eyleyicisi ise ters etkiyi kullanmaktadır. [30, 31, 32, 33, 34]

2.3 Aktif Titreşim Kontrolü (AVC) Prensipleri

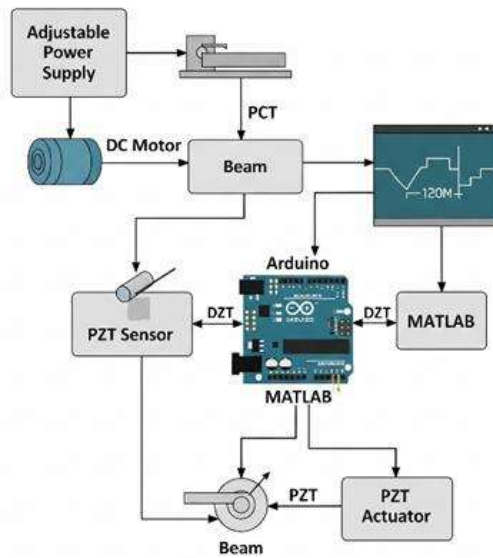
Bu proje, temel bir Aktif Titreşim Kontrolü (ATK) sisteminin uygulamasıdır. ATK sistemleri, istenmeyen titreşimleri ortadan kaldırmak için yapıya kontrollü bir şekilde enerji ekleyen sistemlerdir. [5, 6, 10, 11, 35] Genel bir ATK sistemi dört ana bileşenden oluşur: Tesis, Sensör, Kontrolcü ve Eyleyici. [5, 6] Bu projede kurulan sistem, bir geri beslemeli kontrol sistemidir. Bu tür sistemlerde, sistemin çıkışı (kirişin titreşimi) ölçölür ve bu ölçüm, sistemin girişini (eyleyiciye gönderilen sinyal) ayarlamak için kullanılır.[6] ATK'nın temel çalışma prensibi yıkıcı girişimdir. Kontrolcünün amacı, eyleyiciyi, mevcut istenmeyen titreşimle aynı genlikte ancak 180 derece faz farkına sahip bir karşı titreşim üretmesi için komut vermektir.[6]

3. DENEYSEL SİSTEM TASARIMI VE UYGULAMASI

Bu bölümde, projenin teorik altyapısını pratiğe dökmek için kurulan deney düzeneği, kullanılan donanım bileşenleri, sistemin mimarisi ve kontrol mantığının uygulanma şekli ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1.Sistemin Genel Mimarisi ve Bileşenleri

Kurulan deney düzeneğinin genel işleyişini özetleyen blok diyagramı Şekil 3.1’de sunulmuştur. Diyagram, voltaj kaynağından başlayarak DC motorun kirişi titretmesi, PZT sensörünün bu titreşimi algılaması, verilerin MATLAB/Arduino kontrolcüsü tarafından işlenmesi ve son olarak PZT eyleyicinin sönümlleme kuvveti uygulamasını içeren tüm süreci göstermektedir.

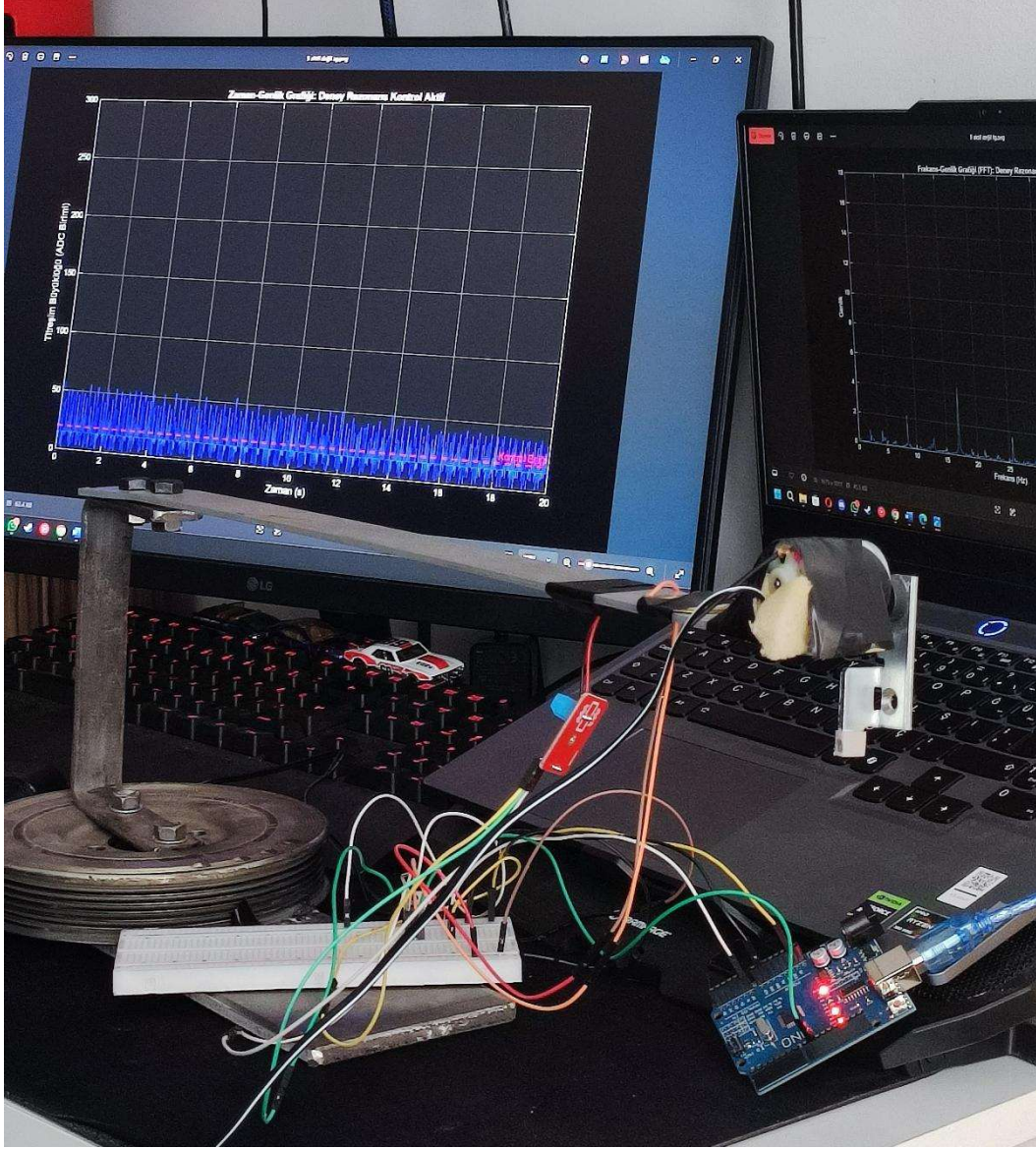


Şekil 3.1 Blok Diyagramı

Kontrol sisteminin genel mimarisi: Bozucu etki, ayarlanabilir güç kaynağına bağlı DC motor tarafından kirişe (tesis) uygulanır. Kirişin titreşimi PZT sensör tarafından algılanır, MATLAB/Arduino ikilisinden oluşan kontrolcü tarafından işlenir ve PZT eyleyici aracılığıyla sönümlleme kuvveti olarak kirişe geri beslenir.

Tablo 3.1: Sistem Bileşenlerinin Teknik Özellikleri

Bileşen	Model ve Detaylar	Temel Teknik Özellikler
Ankastre Kiriş	6063 Alüminyum Alaşım	500mm*30mm*3mm
Titreşim Motoru	12V DC Titreşim Motoru	Çalışma Gerilimi 12V DC
Piezo Sensör (PZT-1)	PZT Seramik Disk	Tip: PZT-5A
Piezo Eyleyici	PZT Seramik Disk	Tip: PZT-5A
Kontrol Kartı	Arduino Uno	Mikrodenetleyici: ATmega328P



Şekil 3.2 Kurulan Aktif Titreşim Kontrol Sistemi Deney Düzenekinin Genel Görünümü

Kirişin titreşim uyarımını sağlayan DC motor, PZT sensör ve eyleyici yerleşimleri ile Arduino ve breadboard bağlantıları kurulan deneysel düzeneğin genel görünümü içerisinde yer almaktadır. Şekil 3.2, bu sistemin masaüstü üzerindeki fiziksel kurulumunu net bir şekilde göstermektedir.

3.1.1. Arduino: Kontrolcü ve Veri Toplama Platformu

Arduino, elektronik projeler geliştirmek için kullanılan açık kaynaklı bir platformdur. Temel olarak iki ana kısımdan oluşur:

1. **Donanım (Arduino Kartı):** Üzerinde bir mikrodeneleyici (beyin) bulunan programlanabilir bir devre kartıdır. Bu kart, sensörlerden (örneğin PZT sensör) veri almak ve motor, ışık veya eyleyiciler (örneğin PZT eyleyici) gibi harici bileşenleri kontrol etmek için kullanılır.
2. **Yazılım (Arduino IDE):** Arduino kartını programlamak için kullanılan, kullanıcı dostu bir bilgisayar programıdır. Bu yazılım aracılığıyla karta, hangi durumda ne yapması gerektiğini söyleyen komutlar yüklenir.

Projedeki Rolü:

Bu çalışmada Arduino, sistemin beyni olarak görev yapmıştır. PZT sensöründen gelen titreşim verilerini sürekli olarak okumuş, bu verileri analiz için MATLAB'a göndermiş ve MATLAB'dan gelen "titreşimi söndür" komutuna göre PZT eyleyiciyi anında devreye sokmuştur. Kısacası, sensör verilerini toplayan ve kontrol komutlarını uygulayan bir arayüz görevi görmüştür. Kullanım kolaylığı, esnekliği ve düşük maliyeti nedeniyle bu proje için ideal bir kontrolcü olarak seçilmiştir.

3.2.Uyartım, Algılama ve Veri Toplama

Kiriş harici titreşim uygulamak için, 12V'luk bir DC motor girişin serbest ucuna sıkıca monte edilmiştir. Kirişin titreşimini ölçmek için PZT-1 sensörü, maksimum sinyal genliği elde etmek amacıyla girişin ankastre mesnede yakın bir noktasına yapıştırılmıştır. PZT-1 sensörünün ürettiği analog voltaj sinyali, Arduino Uno kartının A0 analog giriş pinine bağlanmıştır. Arduino, bu analog voltajı 10-bit çözünürlükle dijital bir değere çevirir. Bu dijital veri, USB kablosu üzerinden seri haberleşme yoluyla MATLAB ortamında çalışan bir betiğe gönderilir.

3.3.Kontrol ve Sönümlleme Sistemi

Sistemin aktif sönümlleme bileşeni, Arduino kontrolcüsü ve PZT-2 eyleyicisinden oluşur. Bu projede uygulanan kontrol stratejisi, basit ve etkili bir eşik tabanlı geri besleme mantığıdır. Algoritmanın işleyişi şu şekildedir:

1. MATLAB, PZT-1 sensöründen gelen titreşim verisini sürekli olarak okur ve genliğini hesaplar.
2. Eğer sensör sinyalinin mutlak değeri önceden belirlenmiş bir eşik değeri aşarsa, bu durum aşırı titreşim olarak kabul edilir.
3. MATLAB, seri port üzerinden Arduino'ya bir "tetikleme" komutu gönderir.

4. Arduino, bu komutu aldığıında, dijital çıkış pinlerinden birini kullanarak PZT-2 eyleyicisini süren devreye bir voltaj sinyali uygular. PZT-2 eyleyicisi, bu sinyali mekanik bir kuvvete dönüştürerek kirişin titreşimini sönümler.

3.4.Kontrolcü Yazılımı ve Uygulama Mantığı

Sistemin beyni, Arduino ve Matlab'ın birlikte çalıştığı bir yazılım mimarisidir. Her bir yazılımın görevi ve kodu aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1. Arduino Pin Konfigürasyonu ve Devre Bağlantıları

Deney düzeneğinin tekrarlanabilirliğini ve anlaşılabilirliğini sağlamak için, kullanılan elektronik bileşenlerin Arduino UNO kartı üzerindeki fiziksel bağlantıları Tablo 3.2'de açıkça belirtilmiştir. Bu bağlantılar, breadboard üzerinde jumper kablolar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.2 Arduino Bağlantı Şeması

Sıra	Bileşen	Pin / Uç	Bağlantı Noktası (Arduino/Breadboard)	Açıklama
1	Arduino Uno	5V	Breadboard Kırmızı (+) Güç Hattı	Tüm 5V güç gerektiren bileşenler (örn. PZT-1 VCC) için besleme hattı.
2	Arduino Uno	GND	Breadboard Mavi (-) Toprak Hattı	Tüm toprak (GND) bağlantılarının birleştiği ortak hat. 12V Adaptör GND'si de buraya bağlanır.
3	Arduino Uno	Analog Pin A0	PZT-1 (Sinyal Kablosu) ile aynı dikey hat	PZT-1 sensöründen gelen titreşim verisini okur.
4	Arduino Uno	Dijital Pin 9	MOSFET GATE (sol bacak) ile aynı dikey hat	MOSFET'i açıp kapatarak PZT-2 eyleyicisini kontrol eder.
5	12V Adaptör	Pozitif (+) Kablo	PZT-2 Eyleyici Pozitif (+) Ucu	PZT-2 eyleyicinin titreşmesi için ana güç kaynağı. Doğrudan PZT-2'ye bağlanır.
6	12V Adaptör	Negatif (-) Kablo	Breadboard Mavi (-) Toprak Hattı	Arduino GND ile ortak toprak noktası. Bu bağlantı KRİTİK'tir.
7	Piezo Sensör (PZT-1)	(+) Pozitif Kablo	Breadboard Kırmızı (+) 5V Güç Hattı	Sensörün güç beslemesi.

Sıra	Bileşen	Pin / Uç	Bağlantı Noktası (Arduino/Breadboard)	Açıklama
8	Piezo Sensör (PZT-1)	(-) Negatif Kablo	Breadboard Mavi (-) Toprak Hattı	Sensörün toprak bağlantısı.
9	Piezo Sensör (PZT-1)	(S) Sinyal Kablosu	Arduino Analog Pin A0 ile aynı dikey hat	Titreşim verisini Arduino'ya gönderen çıkış.
10	Piezo Eyleyici (PZT-2)	Pozitif (+) Uç	12V Adaptör Pozitif (+) Kablo (doğrudan)	12V adaptörden doğrudan güç alır.
11	Piezo Eyleyici (PZT-2)	Negatif (-) Uç	MOSFET DRAIN (orta bacak) ile aynı dikey hat	MOSFET üzerinden akım yolunu tamamlar ve titreşimi sağlar.
12	MOSFET (IRFZ44N)	GATE (G) (Sol Bacak)	Arduino Dijital Pin 9 ile aynı dikey hat (ve 10k Direncin bir ucu)	Arduino'dan gelen sinyal ile MOSFET'i açıp kapatır.
13	MOSFET (IRFZ44N)	DRAIN (D) (Orta Bacak)	PZT-2 Eyleyici Negatif (-) Ucu ile aynı dikey hat	Piezo eyleyiciye giden akımın MOSFET üzerinden geçiş noktası.
14	MOSFET (IRFZ44N)	SOURCE (S) (Sağ Bacak)	Breadboard Mavi (-) Toprak Hattı	MOSFET'in toprak bağlantısı. Ortak toprak hattına bağlanır.
15	10k Ohm Direnç	Bir Ucu	MOSFET GATE (G) bacağı ile aynı dikey hat	MOSFET'in Gate'ini belirsiz durumlardan koruyarak kararlı çalışmasını sağlar.
16	10k Ohm Direnç	Diğer Ucu	Breadboard Mavi (-) Toprak Hattı	Direncin toprak bağlantısı.

3.4.2. Arduino Kontrolcü Kodu

Arduino UNO kartı, sistemde bir arayüz ve düşük seviyeli bir kontrolcü olarak görev yapar. Temel sorumlulukları, PZT-1 sensöründen gelen analog veriyi okumak, bunu seri port üzerinden Matlab'a göndermek ve Matlab'dan gelen 'AÇ/KAPAT' komutlarına göre PZT-2 eyleyicisini sürmektir. Bu görevleri yerine getiren Arduino programı Aşağıda sunulmuştur.

```
/*
```

ANKASTRE KİRİŞ AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ - ARDUINO KODU

Bu kod, PZT-1 sensöründen gelen analog veriyi okur ve seri port üzerinden MATLAB'a gönderir.

MATLAB'dan gelen '1' veya '0' komutlarına göre PZT-2 eyleyiciyi süren MOSFET'i kontrol eder.

```
*/
```

```
// --- Pin Tanımlamaları ---
```

```
const int sensorPin = A0;    // PZT-1 sensörünün bağlı olduğu analog pin
```

```
const int actuatorPin = 9;    // PZT-2 eyleyiciyi kontrol eden MOSFET'in bağlı olduğu dijital pin
```

```
void setup() {
```

```
    // Seri haberleşmeyi başlat (MATLAB ile aynı baud rate olmalı)
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    // Pin modlarını ayarla
```

```
    pinMode(actuatorPin, OUTPUT);    // MOSFET'i kontrol edeceğimiz pin çıkış olarak ayarlandı
```

```
    digitalWrite(actuatorPin, LOW);  // Başlangıçta MOSFET kapalı (PZT-2 aktif değil)
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    // --- Sensör Verisini Oku ve MATLAB'a Gönder ---
```

```
    // PZT-1 sensöründen analog değeri oku (0-1023 arası bir değer)
```

```

int sensorValue = analogRead(sensorPin);

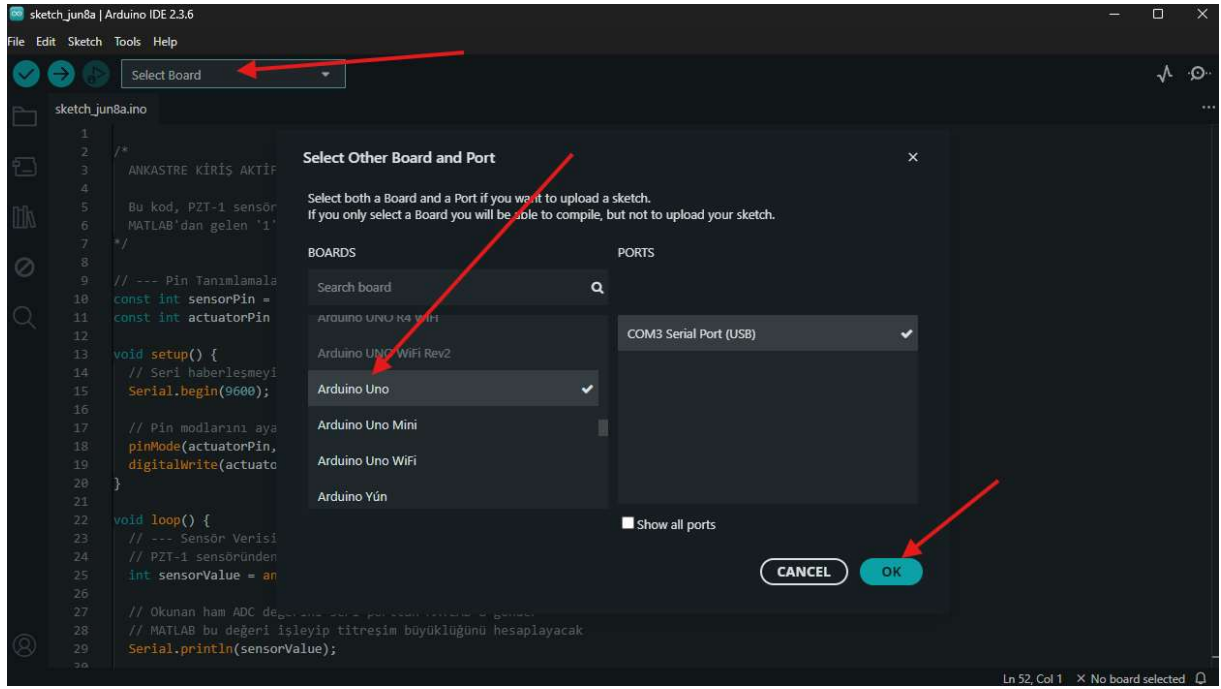
// Okunan ham ADC değerini seri porttan MATLAB'a gönder
// MATLAB bu değeri işleyip titreşim büyüklüğünü hesaplayacak
Serial.println(sensorValue);

// --- MATLAB'dan Gelen Komutu Dinle ---
// Seri porttan okunabilecek veri olup olmadığını kontrol et
if (Serial.available() > 0) {
    char command = Serial.read(); // MATLAB'dan gelen komutu oku ('1' veya '0')

    // Eğer komut '1' ise, MOSFET'i tetikle (PZT-2'yi aktifleştir)
    if (command == '1') {
        digitalWrite(actuatorPin, HIGH); // D9 pinini HIGH yaparak MOSFET'in GATE'ine 5V
        gönder
        // Bu, MOSFET'i açar ve 12V'un PZT-2'ye gitmesini sağlar
    }
    // Eğer komut '0' ise, MOSFET'i kapat (PZT-2'yi deaktifleştir)
    else if (command == '0') {
        digitalWrite(actuatorPin, LOW); // D9 pinini LOW yaparak MOSFET'in GATE'ine 0V
        gönder
        // Bu, MOSFET'i kapatır ve PZT-2'ye giden 12V'u keser
    }
}

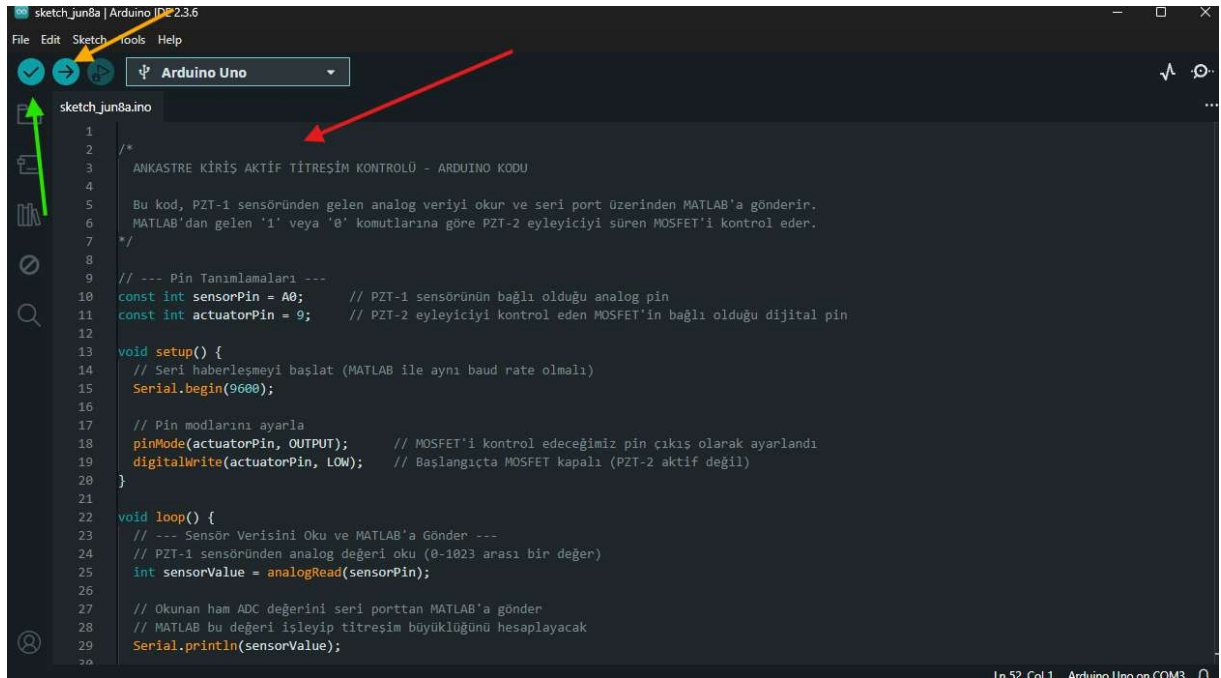
// Yaklaşık 100Hz örnekleme hızı için küçük bir gecikme
// Bu gecikme süresini MATLAB kodunuzdaki sampleRate ile uyumlu tutmalısınız (100Hz
için 10ms)
delay(10); }

```



Şekil 3.3 Arduino Üzerinde Yapılanlar (Adım 1)

Şekil 3.3'te ok ile gösterilen yerlerden ilk olarak **Select Board** sekmesine tıklayın. Ardından, kullandığınız **Arduino modelini seçin** ve **Ok** seçeneğine basarak bu adımı tamamlayın.



Şekil 3.4 Arduino Üzerinde Yapılanlar (Adım 2)

Şekil 3.4'te görülen kırmızı ok ile gösterilen yere kodumuzu yazıyoruz. Ardından, yeşil ok ile gösterilen (Verify) yere basıp kodumuzda hata olup olmadığını kontrol ediyoruz. Son olarak, turuncu ile gösterilen oka (Upload) basarak kodu Arduino'muza yüklüyoruz. Burada doğru portu kullanmak çok önemlidir; aksi takdirde kod yüklenmeyecektir.

Ardından, bu verileri işlemek ve analiz etmek üzere MATLAB ortamına geçiyoruz.

3.4.3. MATLAB Veri Analizi ve Kontrol Arayüzü Kodu

MATLAB, sistemin üst düzey kontrol mantığını ve veri analizini yürüten platformdur. Gerçek zamanlı olarak Arduino'dan gelen sensör verilerini alır, bu verileri görselleştirir ve önceden tanımlanmış eşik değerine göre kontrol kararını verir. Bu kararı, sönümleme komutu olarak tekrar Arduino'ya gönderir. Kullanılan MATLAB betiği aşağıda verilmiştir.

```
% ANKASTRE KİRİŞ DENEY YÜRÜTME, ANALİZ VE KAYIT KODU
```

```
% Bu betik, ham ADC verisini (0-1023) işleyerek titreşim büyüklüğünü
```

```
% hesaplar, grafiği 0'dan başlatarak çizer, deney sonunda hem
```

```
% zaman-genlik hem de frekans-genlik grafiklerini oluşturup kaydeder.
```

```
% --- Ayarlar ---
```

```
clear; clc; close all;
```

```
baseFileName = 'Deney_Rezonans_Kontrol_Aktif'; % Her deney için bu adı değiştirin
```

```
experimentDuration = 20; % Deneyin toplam süresi (saniye)
```

```
sampleRate = 100; % Saniyedeki örnek sayısı (Hz)
```

```
% --- Seri Port Kurulumu ---
```

```
s = serialport("COM3", 9600);
```

```
configureTerminator(s, "LF");
```

```
flush(s);
```

```
% --- Kalibrasyon: DC Ofseti Bulma ---
```

```
disp('Kalibrasyon başlıyor...');
```

```
calibrationSamples = 100;
```

```

calibrationData = zeros(1, calibrationSamples);
for i = 1:calibrationSamples
    rawData = readline(s);
    adcValue = str2double(rawData);
    if ~isnan(adcValue)
        calibrationData(i) = adcValue;
    end
    pause(0.02);
end
dcOffset = mean(calibrationData);
disp(['Kalibrasyon tamamlandı. DC Ofset değeri: ', num2str(dcOffset)]);

% --- Kontrol ve Grafik Parametreleri ---
threshold = 20; % Titreşim büyüklüğü için EŞİK DEĞERİ 20'YE DÜŞÜRÜLDÜ
plotUpperLimit = 300;

% --- Veri Saklama ve Grafik Hazırlığı ---
numSamples = experimentDuration * sampleRate;
collectedData = zeros(1, numSamples);
timeVector = (0:numSamples-1) / sampleRate; % Zaman vektörünü oluştur

hFig = figure('Name', 'Canlı Veri Akışı', 'NumberTitle', 'off');
hPlot = plot(timeVector, collectedData, '-b');
hold on;
thresholdLine = yline(threshold, 'r--', 'LineWidth', 1.5, 'Label', 'Kontrol Eşiği');
hold off;
title('Gerçek Zamanlı Titreşim Büyüklüğü');
xlabel('Zaman (s)');
ylabel('Titreşim Büyüklüğü (ADC Birimi)');

```

```

ylim([0, plotUpperLimit]);

grid on;

disp('Deney başlıyor...');

% --- Ana Deney Döngüsü ---
for i = 1:numSamples
    rawData = readline(s);
    adcValue = str2double(rawData);
    if isnan(adcValue)
        adcValue = dcOffset;
    end

    vibrationMagnitude = abs(adcValue - dcOffset);
    collectedData(i) = vibrationMagnitude;

    if vibrationMagnitude > threshold
        writeline(s, "1");
    else
        writeline(s, "0");
    end

    if mod(i, 10) == 0
        set(hPlot, 'YData', collectedData, 'XData', timeVector);
        drawnow;
    end
end

disp('Deney tamamlandı.');
```

% --- Sonuçları Kaydetme ---

```
% 1. Zaman-Genlik Grafiğini Kaydet
set(hPlot, 'YData', collectedData, 'XData', timeVector);
title(['Zaman-Genlik Grafiği: ', replace(baseFileName, '_', ' ')]);
drawnow;
timeDomainPlotFileName = [baseFileName, '_TimeDomain.png'];
saveas(hFig, timeDomainPlotFileName);
disp(['Zaman-Genlik grafiği kaydedildi: ', timeDomainPlotFileName]);
```

```
% 2. Frekans-Genlik Grafiğini (FFT) Oluştur ve Kaydet
```

```
L = numSamples; % Sinyal uzunluğu
Y = fft(collectedData); % Fourier dönüşümünü al
P2 = abs(Y/L); % Çift taraflı spektrum
P1 = P2(1:L/2+1); % Tek taraflı spektrumu al
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = sampleRate*(0:(L/2))/L; % Frekans vektörünü oluştur

hFigFFT = figure('Name', 'FFT Analizi', 'NumberTitle', 'off');
plot(f, P1);
title(['Frekans-Genlik Grafiği (FFT): ', replace(baseFileName, '_', ' ')]);
xlabel('Frekans (Hz)');
ylabel('Genlik');
grid on;
xlim([0 sampleRate/2]); % Sadece Nyquist frekansına kadar göster

freqDomainPlotFileName = [baseFileName, '_FreqDomain.png'];
saveas(hFigFFT, freqDomainPlotFileName);
disp(['Frekans-Genlik grafiği kaydedildi: ', freqDomainPlotFileName]);
```

```
% 3. Ham veriyi .mat dosyası olarak kaydet
```



```

dataFileName = [baseFileName, '.mat'];

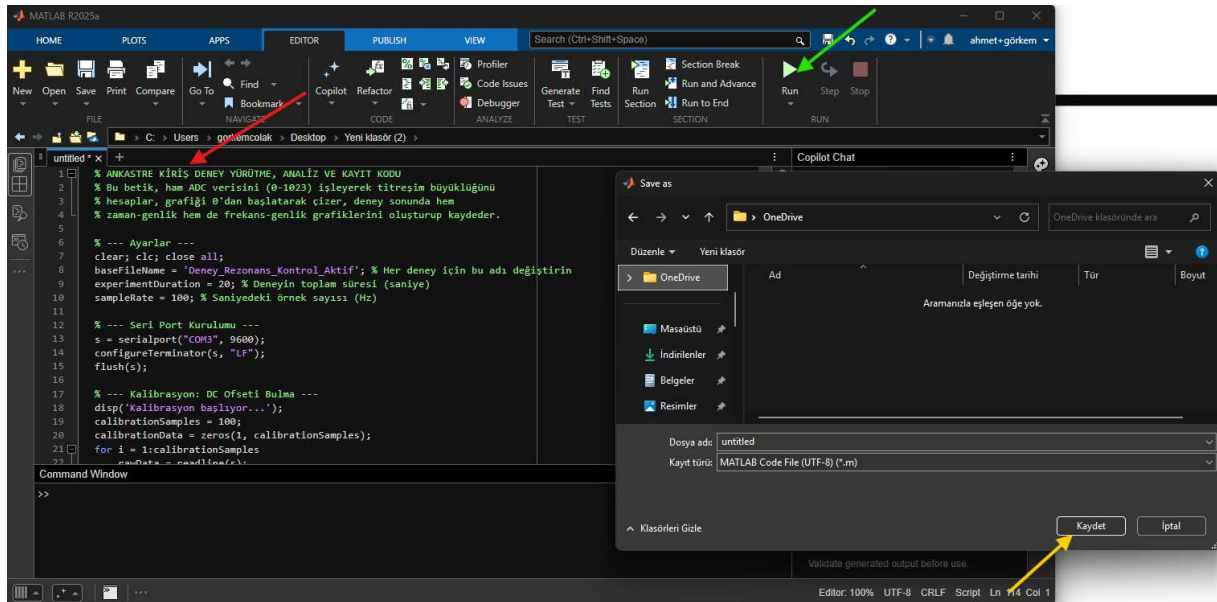
save(dataFileName, 'collectedData', 'timeVector', 'dcOffset', 'sampleRate');

disp(['Veri dosyası kaydedildi: ', dataFileName]);

% --- Temizleme ---

clear s;

disp('Seri port kapatıldı.');
```



Şekil 3.5 Matlab Üzerinde Yapılanlar

MATLAB'a girdikten sonra, ilk önce **kırmızı ok ile gösterilen yere kodumuzu yazıyoruz**. Ardından, **yeşil okla gösterilen (Run) tuşuna tıklıyoruz**. Bu adımda, yazdığımız kodu bilgisayarımıza kaydetmemiz isteniyor. Kaydetmek istediğimiz yeri seçip **sarı ok ile gösterilen Kaydet seçeneğine basıyoruz**.

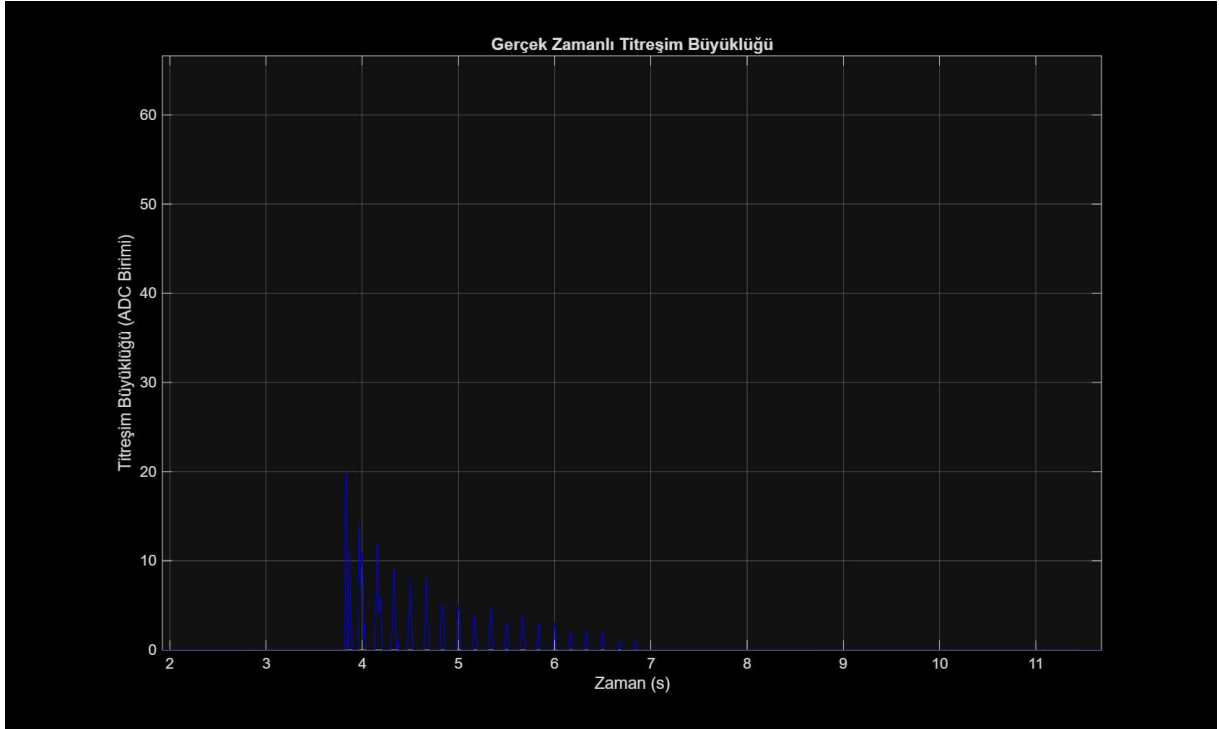
Bu işlemin ardından kodumuz çalışmaya hazır hale geliyor. Tekrar **yeşil ok ile gösterilen (Run) tuşuna bastıktan sonra**, canlı grafik okuma için anlık grafiklerimiz çalışmaya başlıyor. Burada yaptığımız analizlerden sonra görseller (veya grafikler/sonuçlar) otomatik olarak bilgisayarınıza kaydedilecektir. Kaydedilen bu verileri daha sonra karşılaştırabilirsiniz.

4.DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ

Bu bölümde, yapılan deneylerden elde edilen veriler sunulmakta ve analiz edilmektedir.

4.1.Sistemin Serbest Titreşim Analizi (Doğal Frekansların Belirlenmesi)

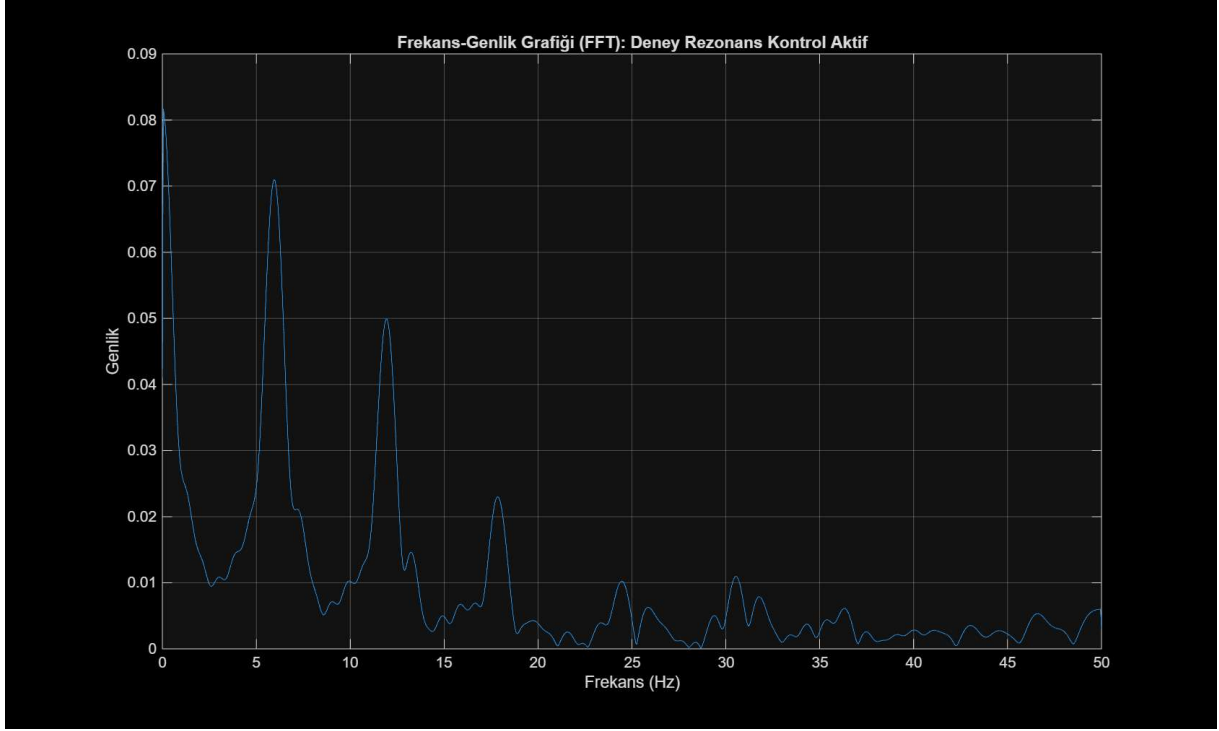
Sistemin herhangi bir dış kuvvet olmadan nasıl titreştiğini anlamak için, kirişin serbest ucuna bir darbe uygulanarak "serbest titreşim" testi yapılmıştır.



Şekil 4.1: Darbe Testi Sonucu Kirişin Serbest Sönümlü Titreşim Tepkisi (Zaman-Genlik Grafiği)

Şekil 4.1, kirişin serbest ucuna uygulanan ani bir darbe sonrası PZT-1 sensöründen alınan titreşim büyüklüğü verisini göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi, ilk darbe sonrası yüksek genlikli bir salınım başlamakta ve zamanla kirişin kendi iç sönümlemesi (doğal sönümleme) nedeniyle bu salınımların genliği logaritmik olarak azalmaktadır. Bu grafik, sistemin herhangi bir dış zorlama olmadan doğal salınım davranışını ve sönüm karakteristiğini anlamak için temel oluşturur.

Şekil 4.1'deki zaman serisi verisine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak sistemin frekans spektrumu elde edilmiştir.



Şekil 4.2: Şekil 4.1'deki Sinyalin FFT Analizi Sonucu (Frekans-Genlik Grafiği)

Bu grafik, Şekil 4.1'de gözlemlenen zamana bağlı titreşim verilerinin Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılarak frekans domainine dönüştürülmesiyle elde edilen frekans-genlik spektrumunu sunmaktadır. Spektrumda gözlemlenen belirgin pikler, test edilen alüminyum levhanın doğal frekanslarını (rezonans frekansları) işaret etmektedir. Deney sonuçlarına göre, levhanın ilk üç doğal frekansı yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir:

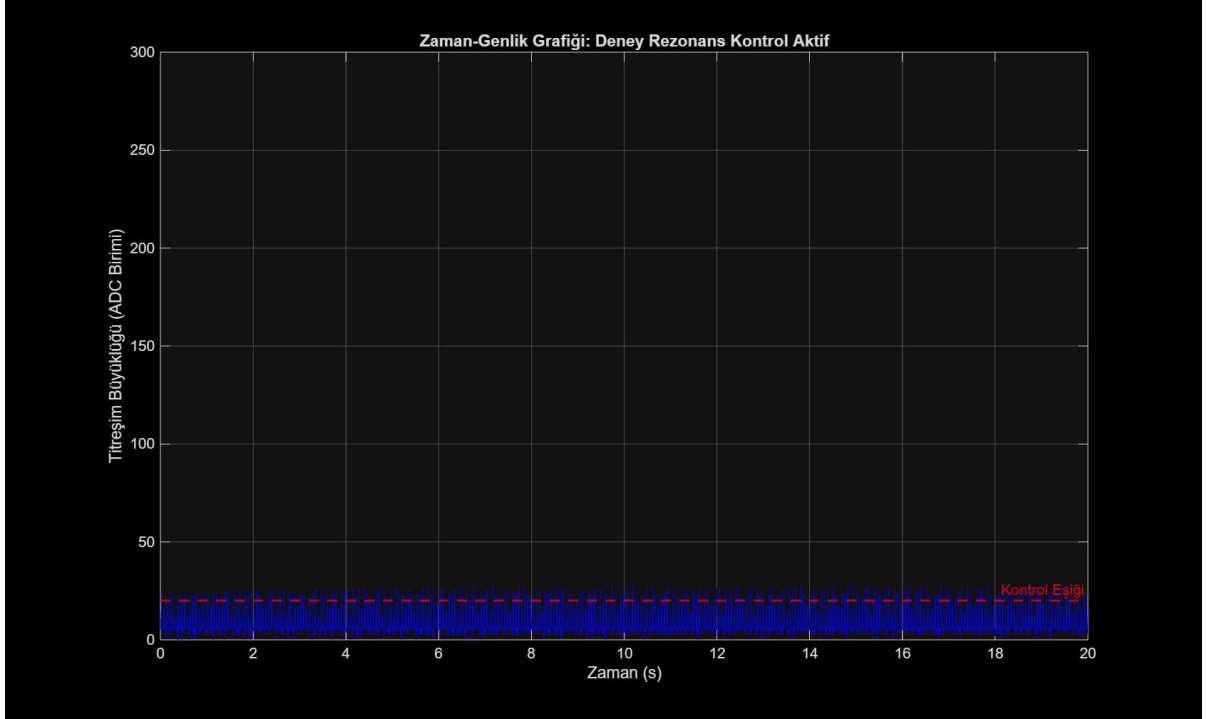
- **Birinci doğal frekans:** ~6 Hz
- **İkinci doğal frekans:** ~12 Hz
- **Üçüncü doğal frekans:** ~18 Hz

En yüksek genliğe sahip olan ~6 Hz'lik pik, levhanın temel (birinci) doğal frekansıdır ve bu frekansta en kolay rezonansa girme potansiyeline sahiptir. Bu deneysel bulgular, levhanın dinamik davranışının anlaşılması ve olası rezonans durumlarına karşı tasarım değerlendirmeleri için kritik öneme sahiptir.

4.2. 6V Deney Sonuçları

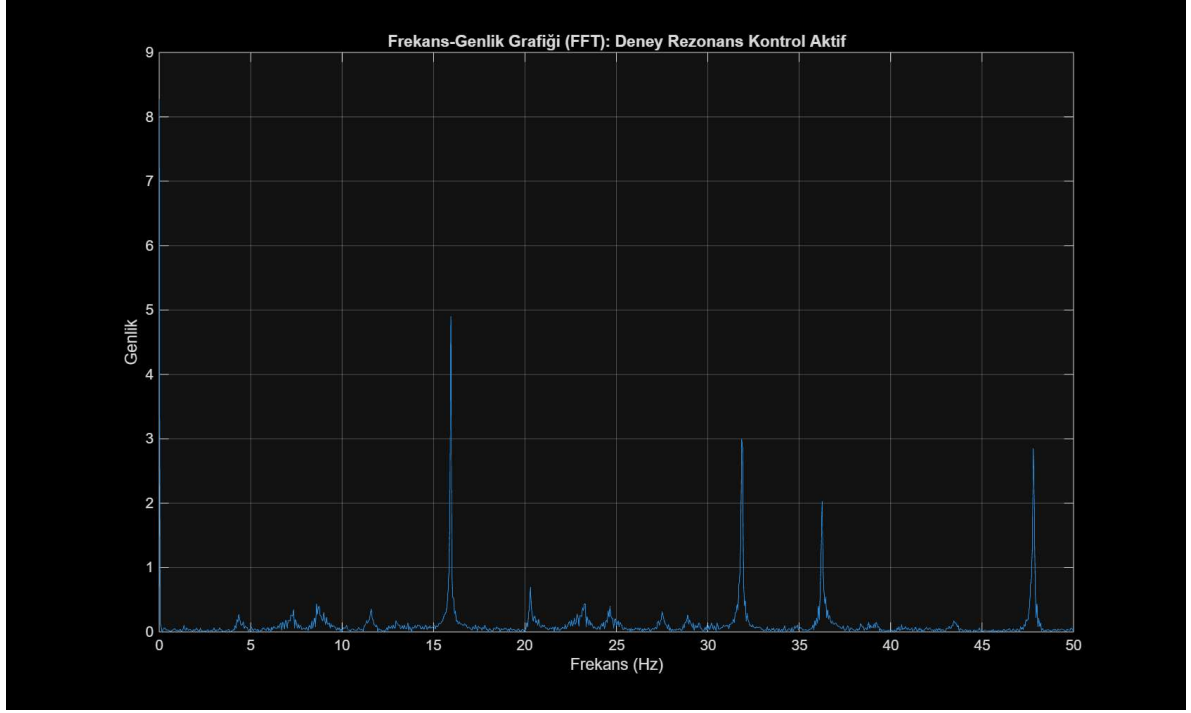
Bu bölümde, DC motor 6V'da çalıştırılarak kirişe sürekli bir kuvvet uygulanmış ve sönümlemeye çalışılmıştır.

4.2.1 6V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (KontROLSÜZ Durum)



Şekil 4.3: 6V Tahrik Altında Sistemin Titreşim Tepkisi (Zaman-Genlik Grafiği)

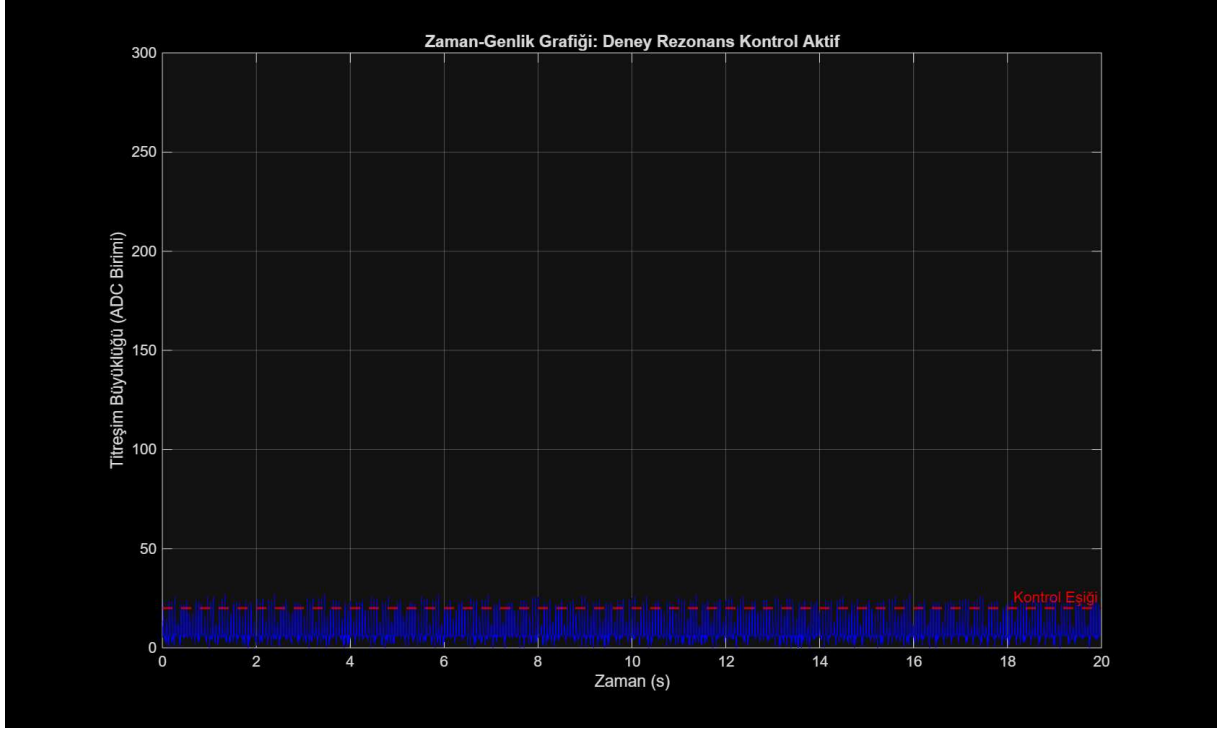
Şekil 4.3, titreşim motorunun 6V gerilim altında sürekli çalışırken, aktif titreşim kontrol sisteminin devrede olmadığı durumdaki kirişin titreşim genliğinin (ADC birimi cinsinden) zamana bağlı değişimini göstermektedir. Grafikte, motorun tahrikine bağlı olarak titreşimlerin süreklilik gösterdiği ve genliklerin kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiğinin zaman zaman üzerine çıktığı"** gözlemlenmiştir. Özellikle bazı anlarda 30 ADC birimi seviyelerine ulaşılmıştır. Bu durum, kontrolsüz haldeyken titreşim seviyesinin belirlenen eşiğin üzerinde seyredebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.4: 6V Gerilim Altında Sistemin Frekans Tepkisi (FFT)

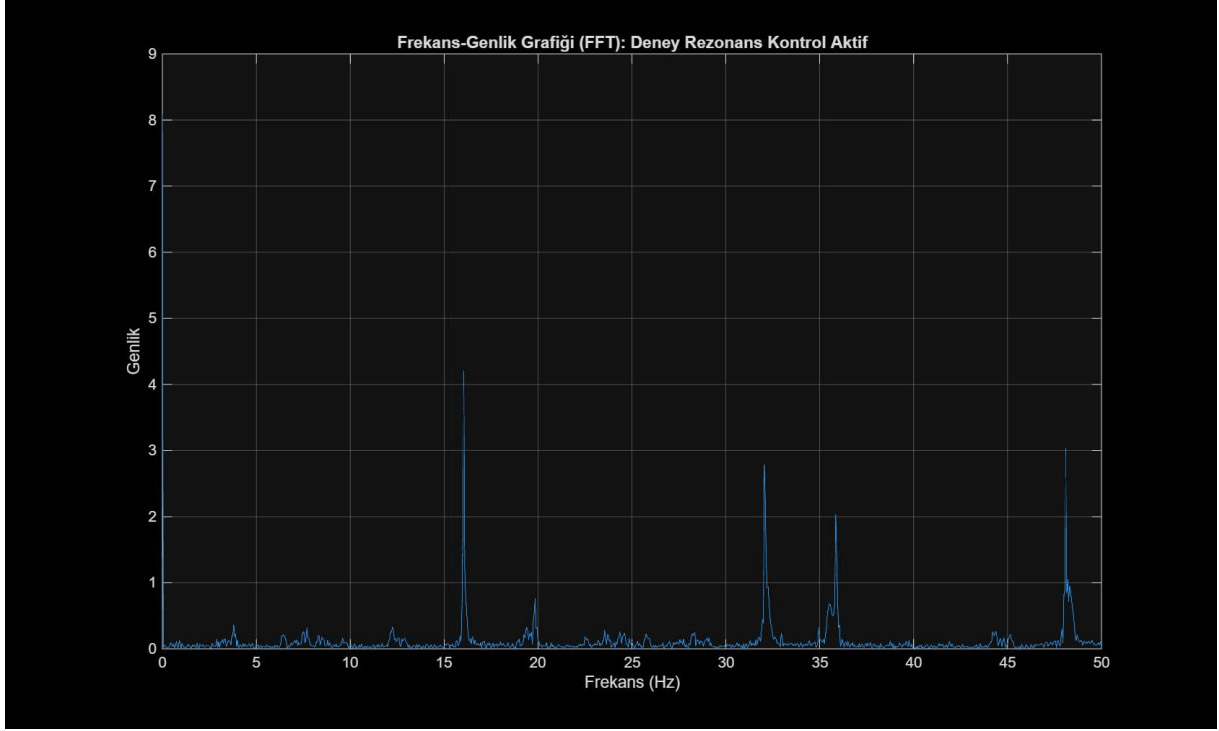
Şekil 4.4 6V tahrik altında kontrolsüz durumdaki titreşim verilerinin Frekans-Genlik spektrumunu (FFT) sunmaktadır. Spektrumda belirgin pikler yaklaşık **16.5 Hz** (genlik: ~ 5 birim), **33 Hz** (genlik: ~ 3 birim), **36Hz** (genlik ~ 2 birim) ve **47.5 Hz** (genlik: ~2.8 birim) frekanslarında yer almaktadır. Bu frekanslar kirişin doğal frekanslarına karşılık gelmektedir.

4.2.2. 6V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)



Şekil 4.5: Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (6V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.5'te, 6V gerilim altında aktif titreşim kontrol sistemi devrede olduğunda kirişin titreşim genliğinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 4.3'teki kontrolsüz duruma kıyasla, titreşim genlikleri **belli belirsiz ölçüde azalmıştır**. Bunun sebebi ise grafikte, titreşimler çoğunlukla **20 ADC birimi** civarında kalmış olması ve ATS'nin devreye çok fazla girmemiş olmasıdır



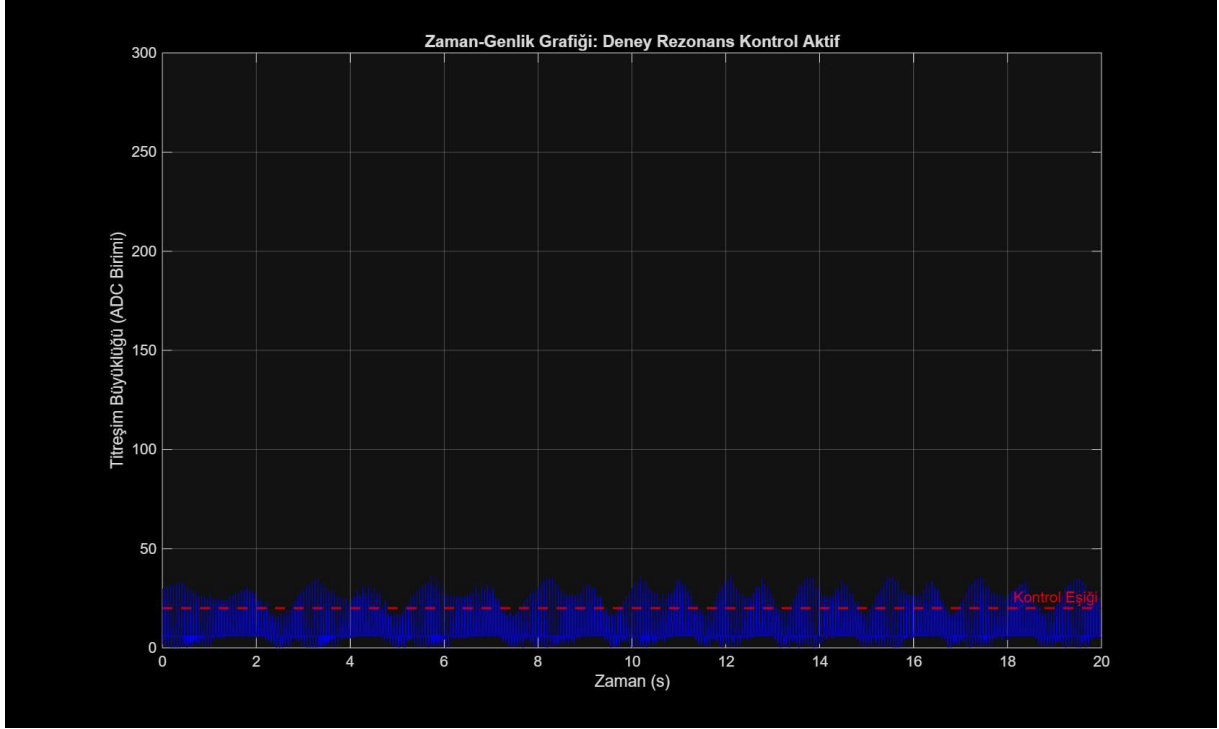
Şekil 4.6. Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (6V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.6'da 6V tahrik altında aktif kontrol sistemi devredeyken elde edilen frekans spektrumunu göstermektedir. Aktif kontrol sisteminin etkisiyle rezonans piklerinin genlikleri azalmıştır:

- Yaklaşık 16.5 Hz'deki ana rezonans pikinin genliği yaklaşık **4.1 birim seviyesine** inmiştir.
- Yaklaşık 33.5 Hz bandındaki rezonans pikinin genliği yaklaşık **2.8 birim seviyesine** düşmüştür.
- Yaklaşık 36 Hz bandındaki rezonans pikinin genliği yaklaşık **2.0 birim seviyesinde** kalmıştır.
- Yaklaşık 47.5 Hz'deki rezonans pikinin genliği yaklaşık **2.8 birim seviyesinde** kalmıştır.

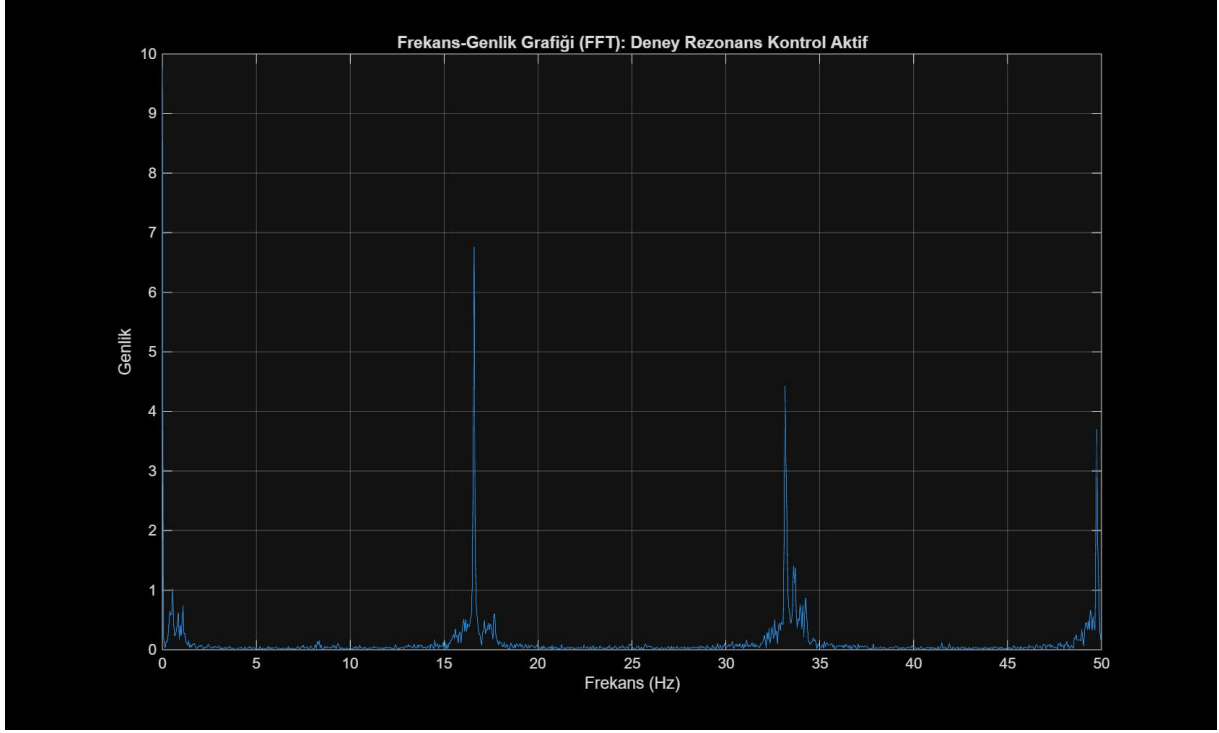
4.3 7.5V Deney Sonuçları

4.3.1. 7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (Kontrolsüz Durum)



Şekil 4.7 Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken)

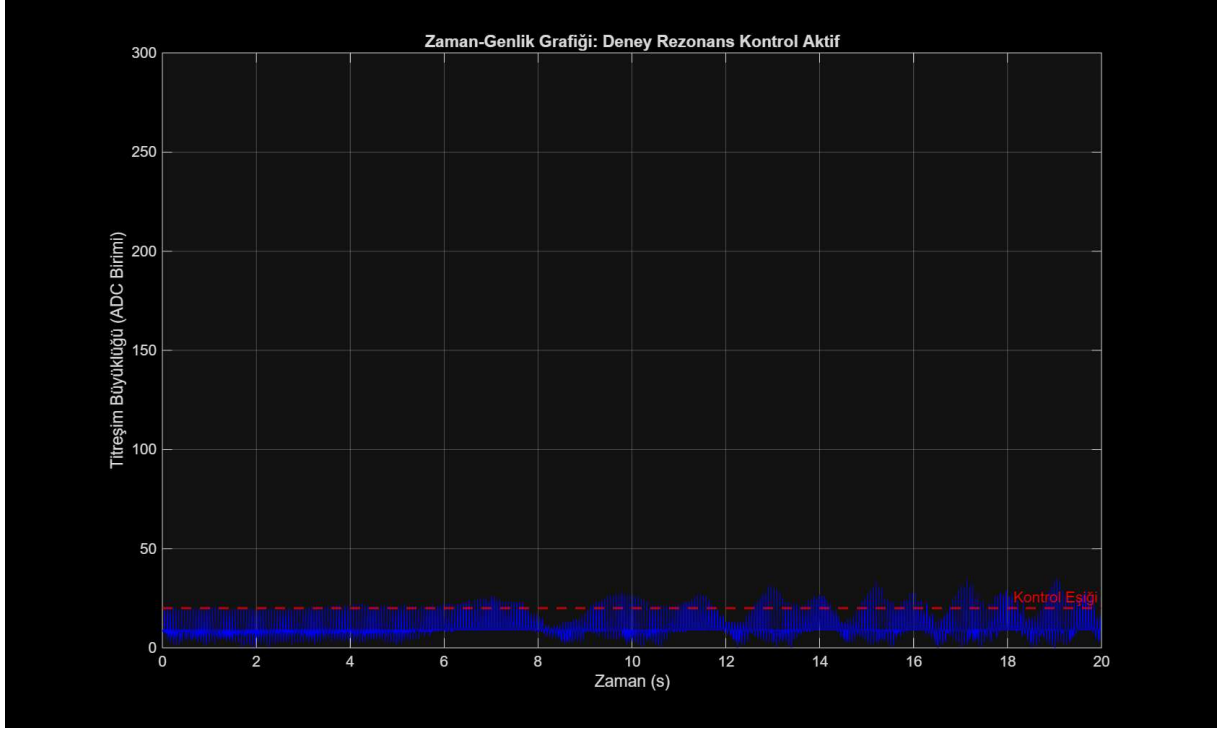
Şekil 4.7’de titreşim motorunun 7.5V gerilim altında sürekli çalışırken, aktif titreşim kontrol sisteminin devrede olmadığı durumdaki kirişin titreşim genliğinin (ADC birimi cinsinden) zamana bağlı değişimini göstermektedir. Titreşimler süreklilik göstermekte ve genlikler, kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiğinin çoğunlukla üzerine çıkmaktadır**. Özellikle bazı anlarda genlikler 30-40 ADC birimi seviyelerine ulaşmaktadır. Bu durum, kontrolsüz haldeyken titreşim seviyesinin belirlenen sıkı eşiği sıkça aştığını göstermektedir.



Şekil 4.8 Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken)

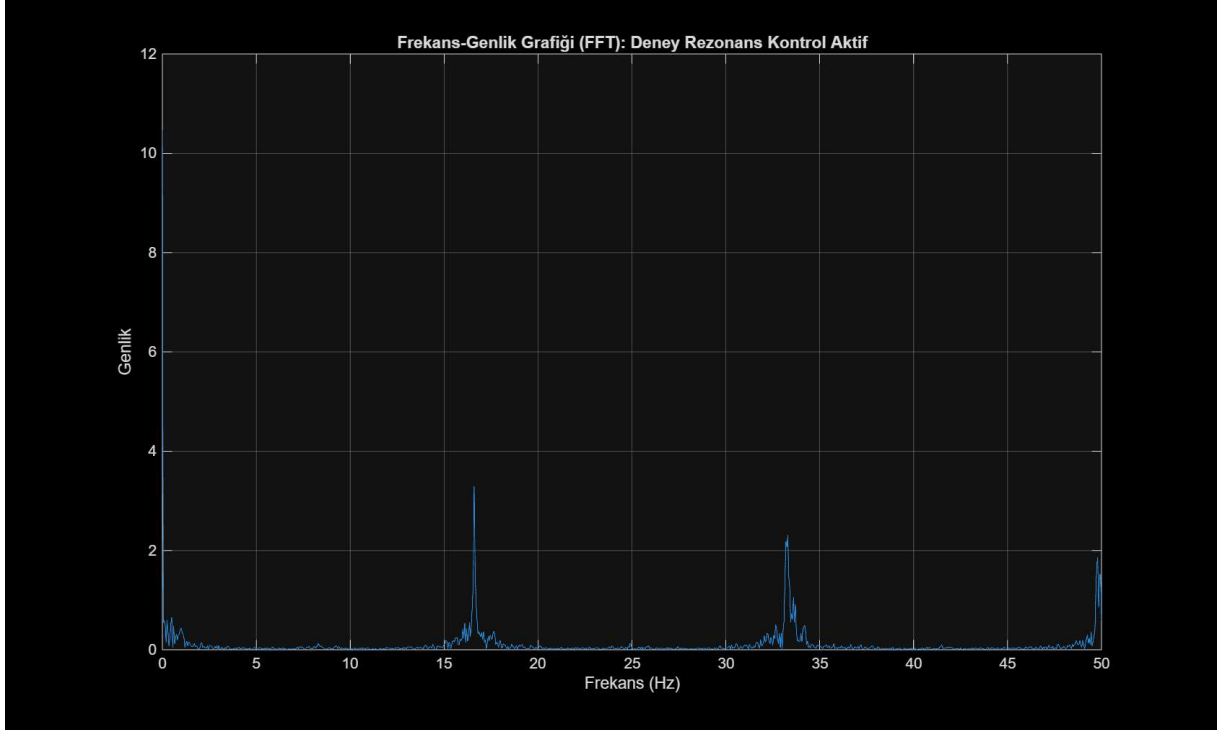
Şekil 4.8’de 7.5V tahrik altında kontrolsüz durumdaki titreşim verilerinin Frekans-Genlik spektrumunu (FFT) sunmaktadır. Spektrumda belirgin pikler yaklaşık **16.5 Hz** (genlik: ~6.8 birim), **33.5 Hz** (genlik: ~4.3 birim) ve **47.5 Hz** (genlik: ~3.8 birim) frekanslarında yer almaktadır. Bu frekanslar kirişin doğal frekanslarına karşılık gelmektedir ve kontrol sistemi devreye girmeden önceki rezonans profilini yansıtmaktadır.

4.3.2 7.5V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)



Şekil 4.9 Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.9'da 7.5V gerilim altında aktif titreşim kontrol sistemi devrede olduğunda kirişin titreşim genliğinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Titreşim genlikleri **belirgin ölçüde azalmış ve çok daha kararlı seviyelerde** seyretmektedir. Grafikte, titreşimler çoğunlukla **10-15 ADC birimi** aralığında kalmış ve kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiğinin sürekli olarak altında seyretmiştir"**. Bu durum, kontrol sisteminin titreşim seviyesini belirlenen sıkı eşik içinde başarıyla tuttuğunu güçlü bir şekilde göstermektedir.



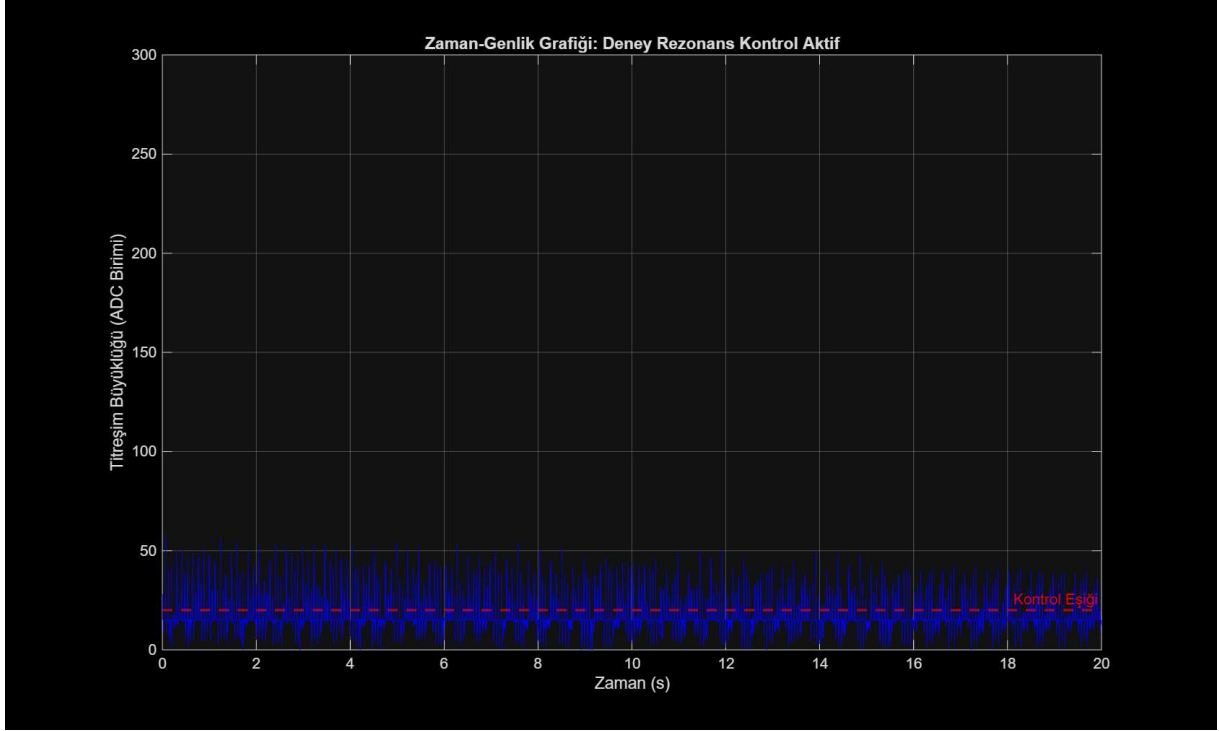
Şekil 4.10 Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (7.5V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.10'da 7.5V tahrik altında aktif kontrol sistemi devredeyken elde edilen frekans spektrumunu göstermektedir. Aktif kontrol sisteminin etkisiyle rezonans piklerinin genlikleri azalmıştır:

- Yaklaşık 16.5 Hz'deki ana rezonans pikinin genliği yaklaşık **3.5 birim seviyesine** inmiştir.
- Yaklaşık 33.5 Hz bandındaki rezonans pikinin genliği yaklaşık **2.3 birim seviyesine** düşmüştür.
- Yaklaşık 47.5 Hz'deki rezonans pikinin genliği yaklaşık **1.8 birim seviyesine** inmiştir.

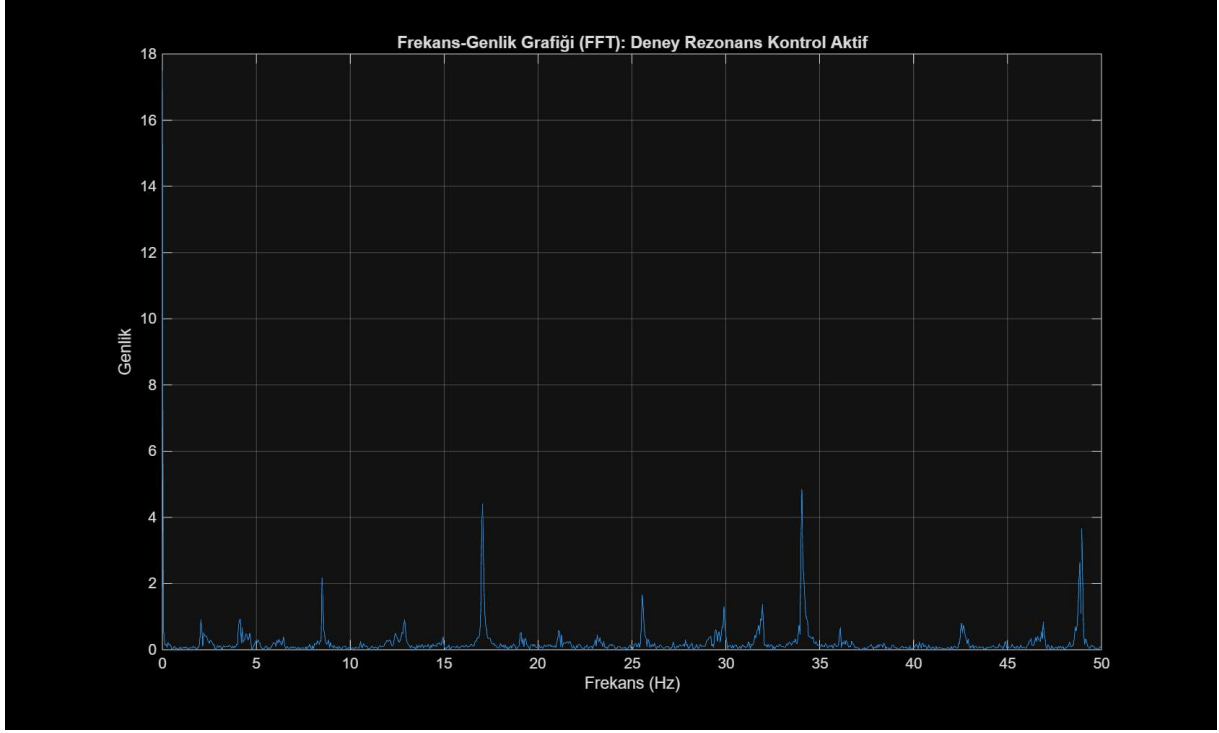
4.4 9V Deney Sonuçları

4.4.1 9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (Kontrolsüz Durum)



Şekil 4.11 Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken)

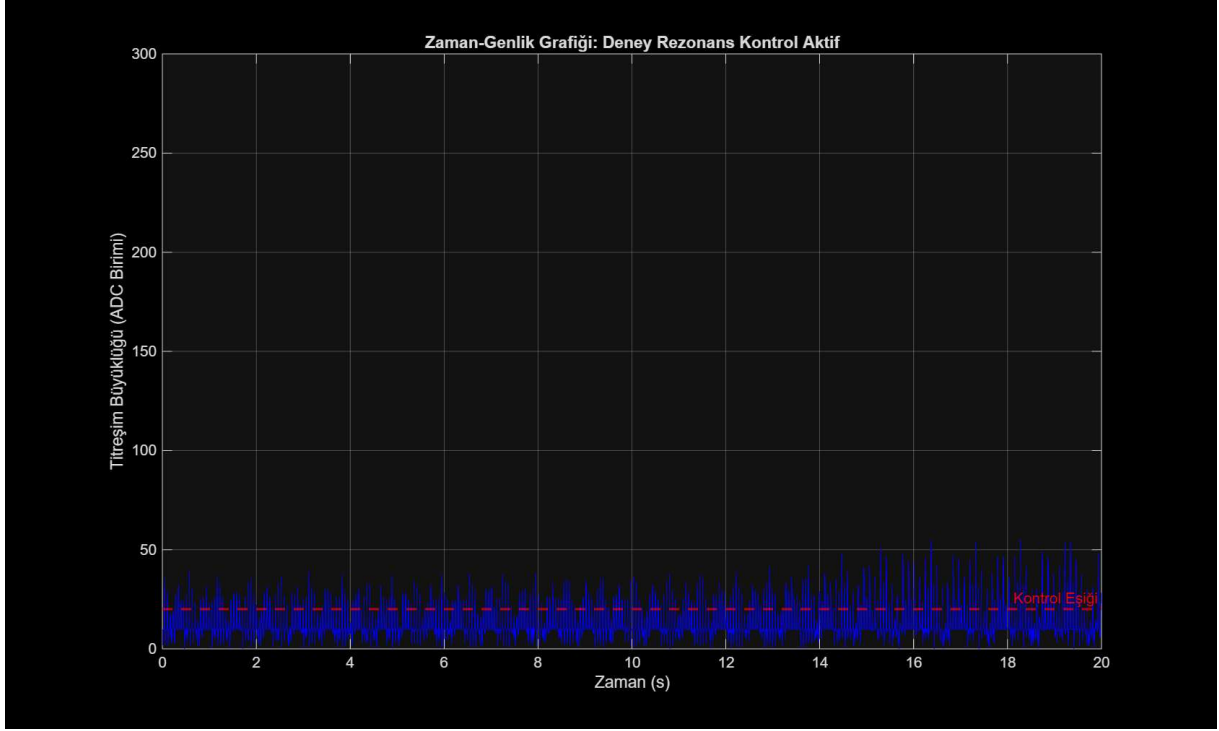
Şekil 4.11’de titreşim motorunun 9V gerilim altında sürekli çalışırken, aktif titreşim kontrol sisteminin devrede olmadığı durumdaki kirişin titreşim genliğinin (ADC birimi cinsinden) zamana bağlı değişimini göstermektedir. Titreşimler süreklilik göstermekte ve genlikler, kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiği"nin zaman zaman üzerine çıkmaktadır**. Genlikler çoğunlukla 0-40 ADC birimi aralığında salınım yapmakta, nadiren 45-50 ADC birimine yaklaşmaktadır. Bu durum, kontrolsüz haldeyken titreşim seviyesinin belirlenen sıkı eşiği sıkça aştığını göstermektedir.



Şekil 4.12 Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken)

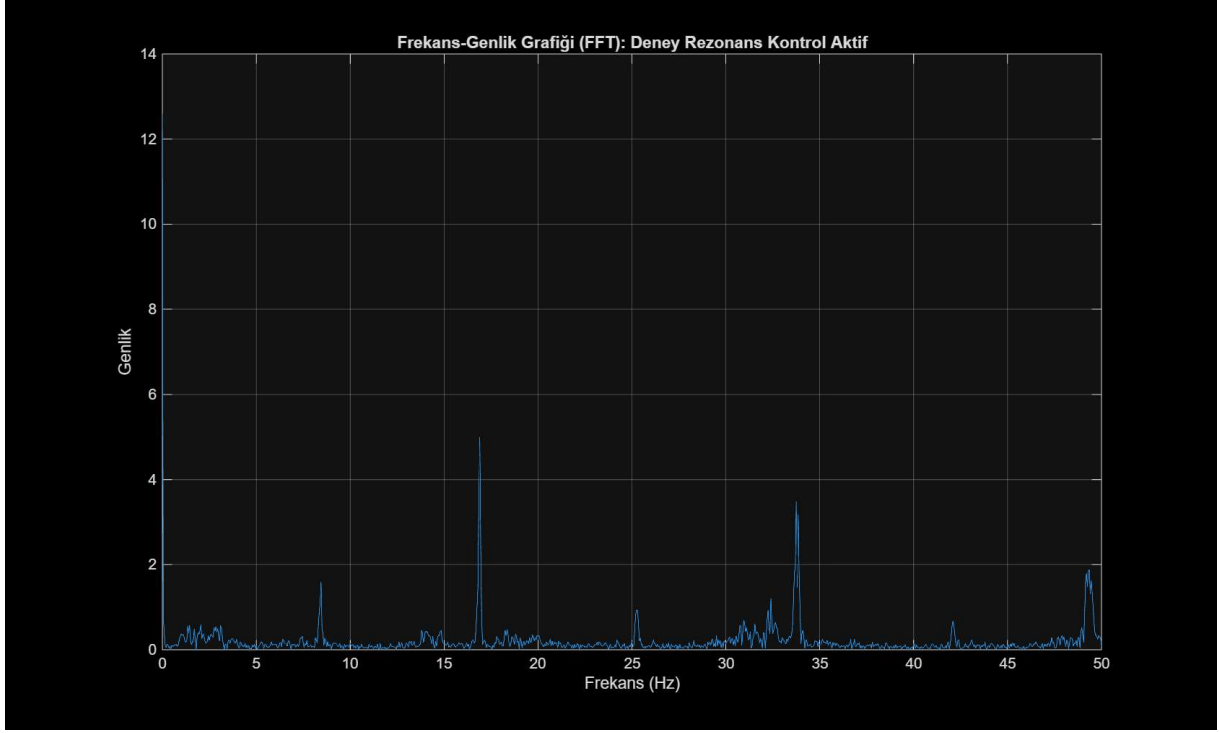
Şekil 4.12’de 9V tahrik altında kontrolsüz durumdaki titreşim verilerinin Frekans-Genlik spektrumunu (FFT) sunmaktadır. Spektrumda belirgin pikler yaklaşık **18 Hz** (genlik: ~4.2 birim), **33.5 Hz** (genlik: ~4.8 birim) ve **47.5 Hz** (genlik: ~3.8 birim) frekanslarında yer almaktadır. Bu frekanslar kirişin doğal frekanslarına karşılık gelmektedir. Özellikle 33.5 Hz piki, diğerlerine göre hafifçe daha yüksek genliğe sahiptir.

4.4.2 9V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)



Şekil 4.13 Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.13'te 9V gerilim altında aktif titreşim kontrol sistemi devrede olduğunda kirişin titreşim genliğinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Titreşim genlikleri **belirgin ölçüde azalmış ve çok daha kararlı seviyelerde** seyretmektedir. Grafikte, titreşimler çoğunlukla **5-25 ADC birimi** aralığında kalmış ve kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiğinin genel olarak altında seyretmiştir**. Bu durum, kontrol sisteminin titreşim seviyesini belirlenen sıkı eşik içinde başarıyla tuttuğunu güçlü bir şekilde göstermektedir.



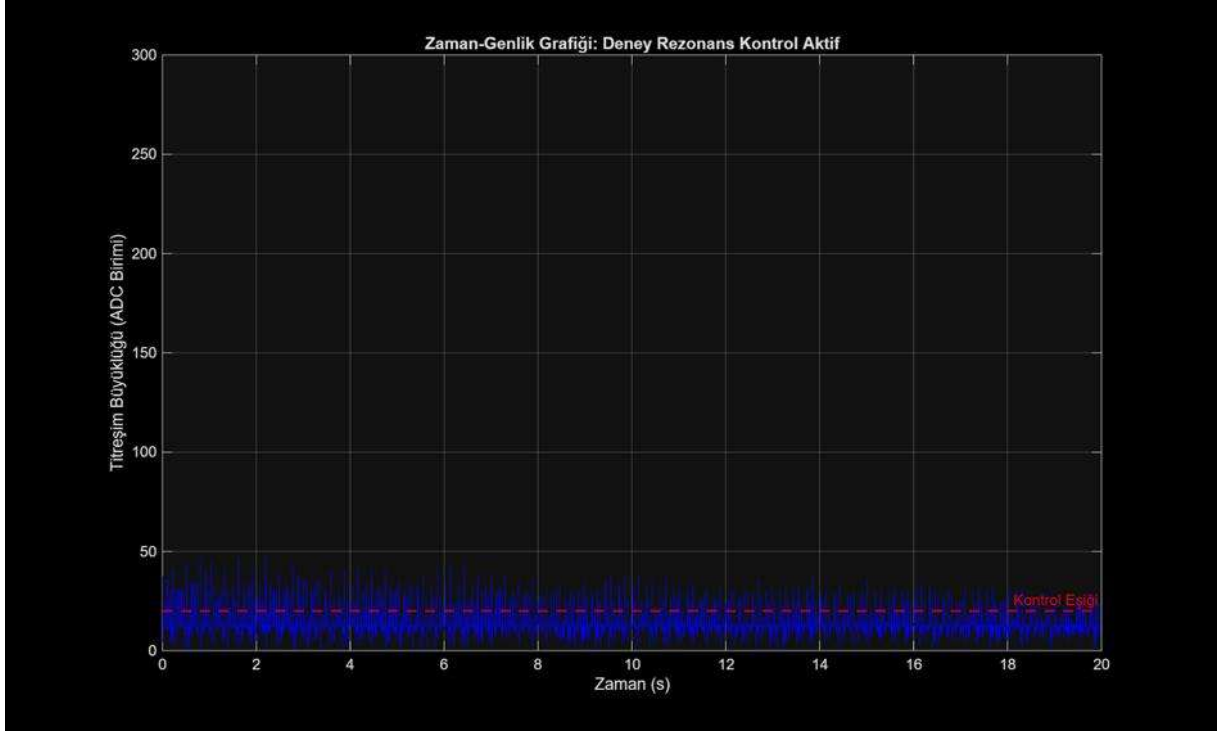
Şekil 4.14 Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (9V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.14'te 9V tahrik altında aktif kontrol sistemi devredeyken elde edilen frekans spektrumunu göstermektedir. Aktif kontrol sisteminin etkisiyle rezonans piklerinin genlikleri azalmıştır:

- Yaklaşık 16.5 Hz'deki ana rezonans pikinin genliği yaklaşık **4.2 birim seviyesinde** kalmıştır.
- Yaklaşık 33.5 Hz bandındaki rezonans pikinin genliği yaklaşık **2.8 birim seviyesine** düşmüştür.
- Yaklaşık 47.5 Hz'deki rezonans pikinin genliği yaklaşık **1.8 birim seviyesine** inmiştir.

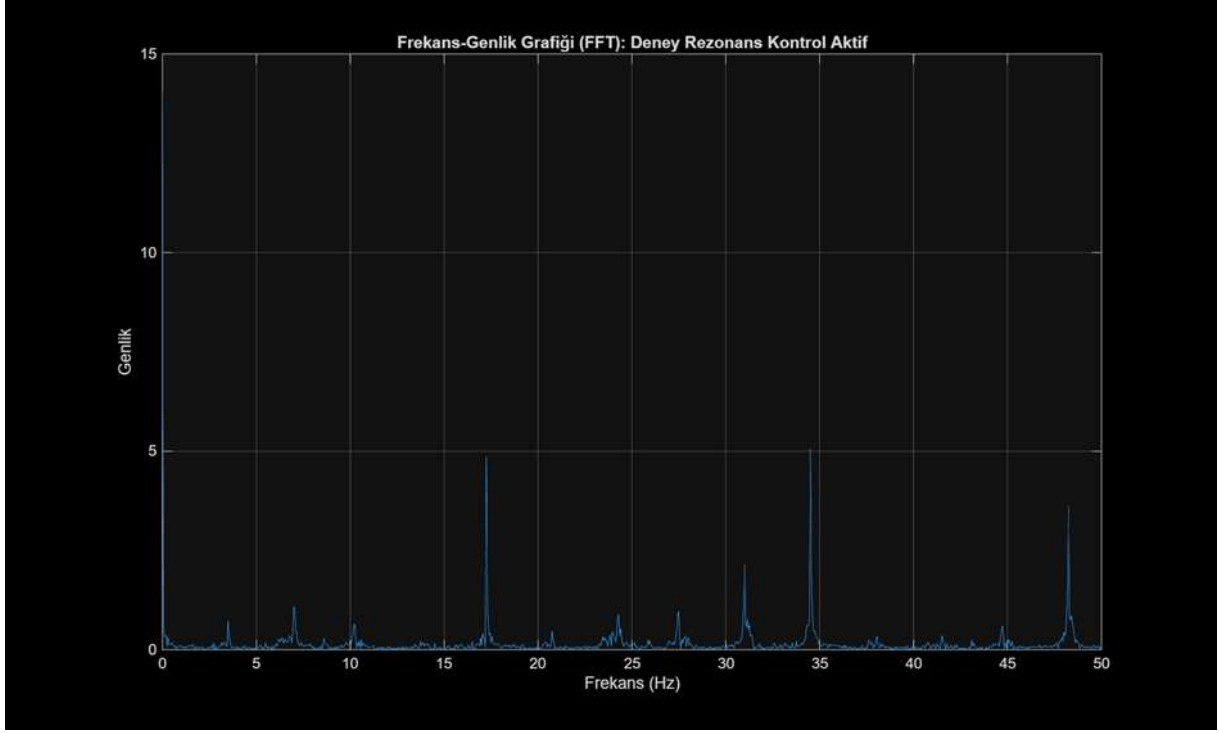
4.5 12V Deney Sonuçları

4.5.1 12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken (KontROLSÜZ Durum)



Şekil 4.15 Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken)

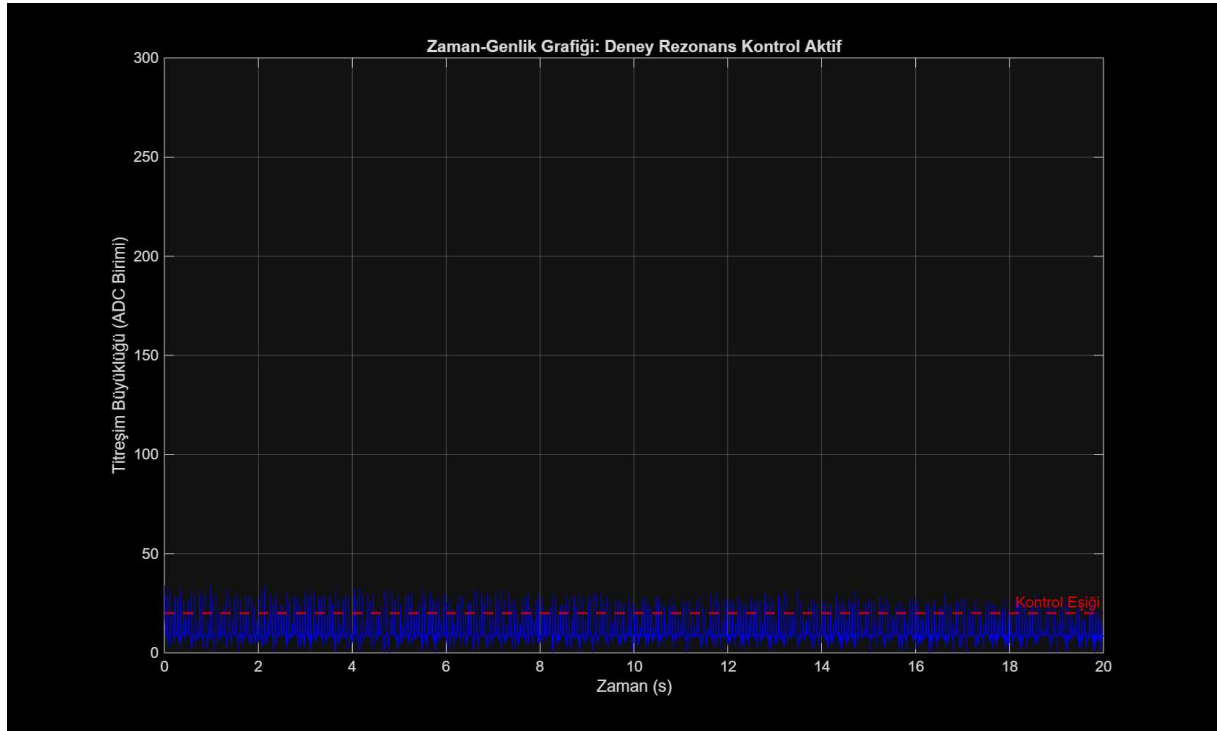
Şekil 4.15'te titreşim motorunun 12V gerilim altında sürekli çalışırken, aktif titreşim kontrol sisteminin devrede olmadığı durumdaki kirişin titreşim genliğinin (ADC birimi cinsinden) zamana bağlı değişimini göstermektedir. Grafikte, titreşimlerin süreklilik gösterdiği ve genliklerin kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiğinin çoğunlukla üzerine çıktığı** gözlemlenmiştir. Genlikler çoğunlukla 0-40 ADC birimi aralığında salınım yapmakta, nadiren 45-50 ADC birimine yaklaşmaktadır.



Şekil 4.16 Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Devrede Değilken)

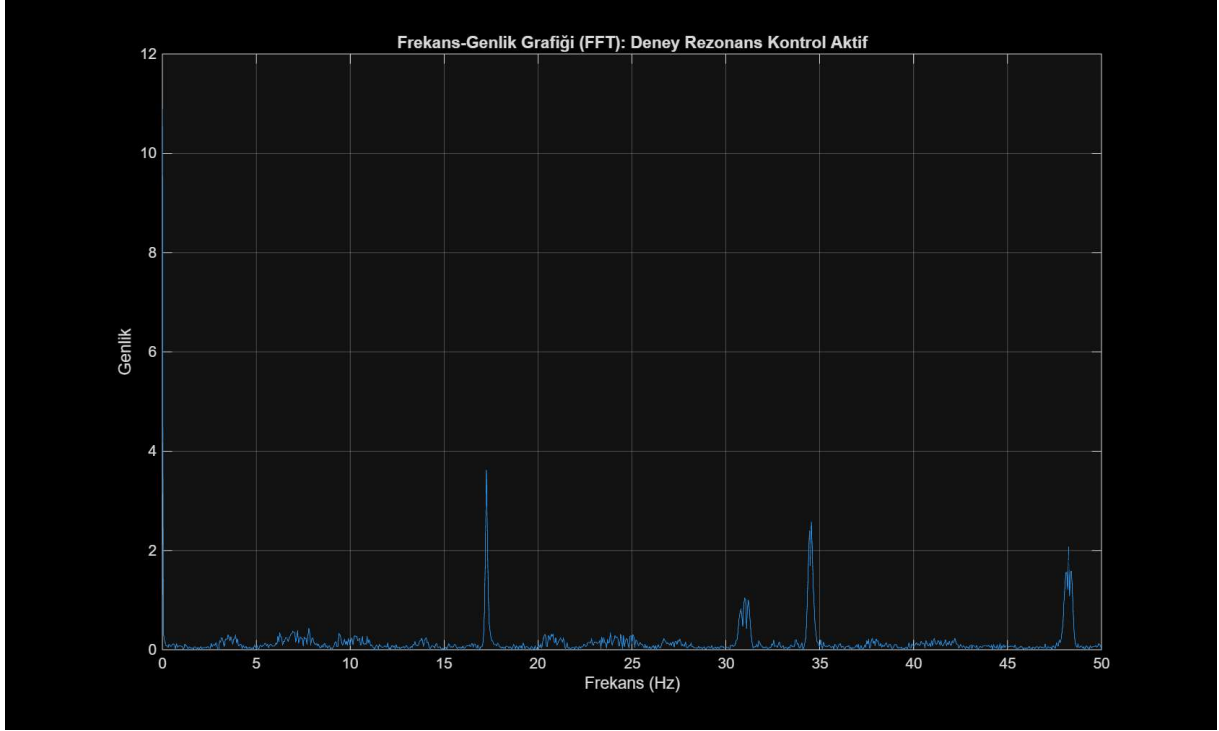
Şekil 4.16'da 12V tahrik altında kontrolsüz durumdaki titreşim verilerinin Frekans-Genlik spektrumunu (FFT) sunmaktadır. Spektrumda belirgin pikler yaklaşık **18 Hz** (genlik: ~5.0 birim), **33.5 Hz** (genlik: ~5.0 birim) ve **47.5 Hz** (genlik: ~4.0 birim) frekanslarında yer almaktadır. Özellikle 18 Hz ve 33.5 Hz pikleri birbirine yakın genliklere sahiptir.

4.5.2 12V Tahrik Altında, Kontrol Sistemi Aktifken (Kontrollü Durum)



Şekil 4.17 Kirişin Zaman-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.17’de 12V gerilim altında aktif titreşim kontrol sistemi devrede olduğunda kirişin titreşim genliğinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Titreşim genlikleri **çok daha düşük ve daha kararlı seviyelerde** seyretmektedir. Grafikte, titreşimler çoğunlukla **5-15 ADC birimi** aralığında kalmış ve kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen **20 ADC birimlik "Kontrol Eşiğinin sürekli olarak altında seyretmiştir**. Bu, kontrol sisteminin titreşim seviyesini belirlenen sıkı eşik içinde başarıyla tuttuğunu güçlü bir şekilde göstermektedir.



Şekil 4.18 Kirişin Frekans-Genlik Tepkisi (12V Tahrik Altında, Aktif Kontrol Sistemi Aktifken)

Şekil 4.18’de 12V tahrik altında aktif kontrol sistemi devredeyken elde edilen frekans spektrumunu göstermektedir. Aktif kontrol sisteminin etkisiyle rezonans piklerinin genlikleri azalmıştır:

- Yaklaşık 17 Hz'deki ana rezonans pikinin genliği yaklaşık **3.8 birim seviyesine** inmiştir.
- Yaklaşık 33.5 Hz bandındaki rezonans pikinin genliği yaklaşık **2.5 birim seviyesine** düşmüştür.
- Yaklaşık 47.5 Hz'deki rezonans pikinin genliği yaklaşık **1.5 birim seviyesine** inmiştir.

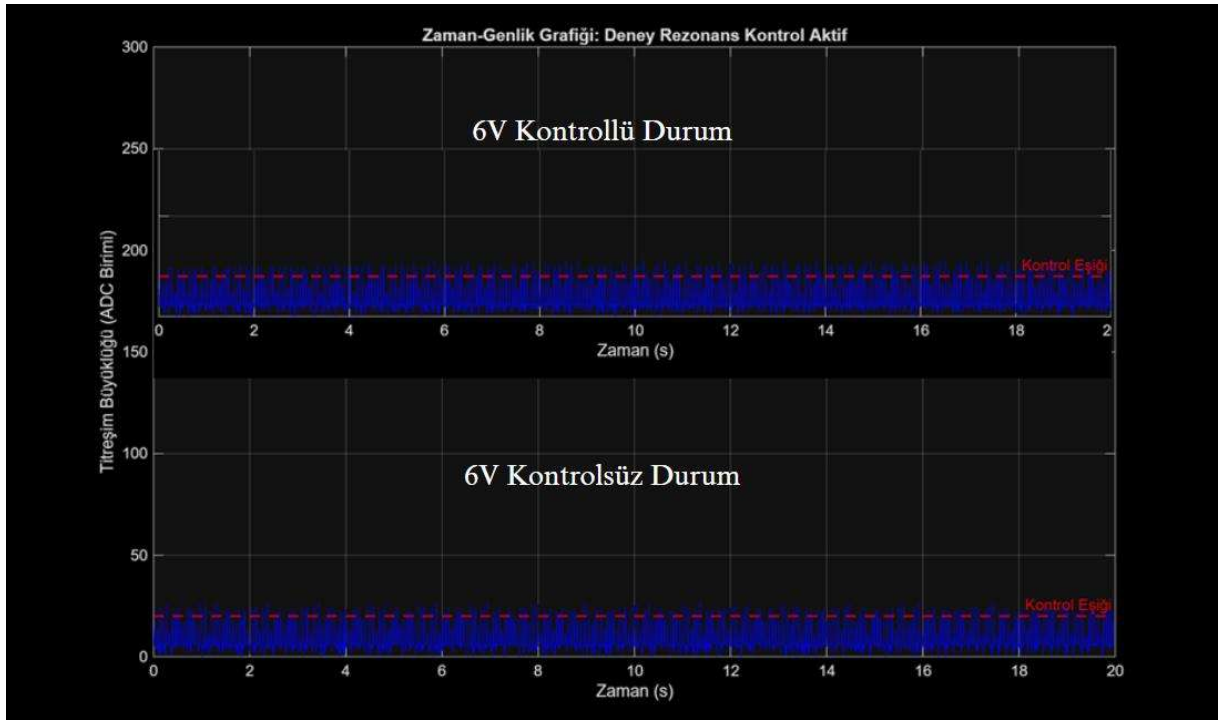
5.TARTIŞMA

Bu bölümde, önceki bölümde sunulan deneysel veriler yorumlanmakta, elde edilen sonuçların teorik beklentilerle ve mühendislik prensipleriyle olan ilişkisi analiz edilmektedir.

5.1 Sonuçların Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması

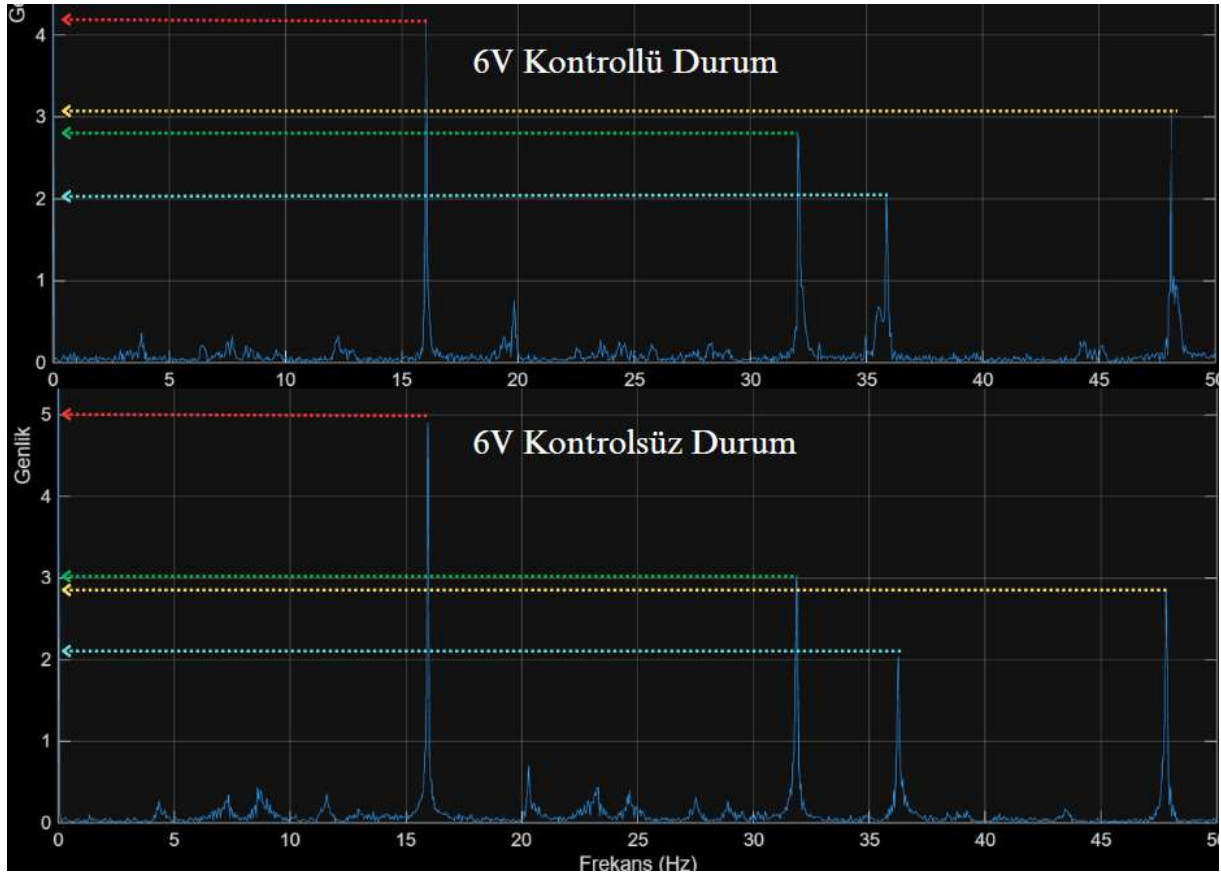
Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, projenin temel hedeflerine ulaşıldığını göstermektedir. Bölüm 4'te sunulan verileri bir bütün olarak değerlendirmek için, sistemin farklı koşullardaki performansı özetlenmiştir.

5.1.1 6V Karşılaştırma



Şekil 5.1 Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (6V Tahrik Altında)

Şekil 5.1'deki zaman-genlik grafiklerini Aktif Titreşim Kontrolü (ATK) öncesi ve sonrası durumlarıyla karşılaştırdığımızda, neredeyse aynı değerleri gözlemledik. Bu durumun temel sebebi, kırmızı çizgiyle gösterilen kontrol eşiğinin çok fazla aşılmamış olmasıdır. ATK sistemi bu eşiği aşacak bir titreşimle çok karşılaşmadığı için çok fazla devreye girmedir, bu yüzden grafiklerde gözle görülecek düzeyde bir değişiklik gözlenemedi.



Şekil 5.2 Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (12V Tahrik Altında)

Tablo 5.1 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (6V Tahrik Altında)

Frekans	Kontrolsüz Durum Genliği	Kontrollü Durum Genliği	% Azalma
16.5	5.0	4.1	18%
33.5	3.0	2.8	6.67%
36	2.0	2.0	-
47.5	2.8	3.1	-10.71%

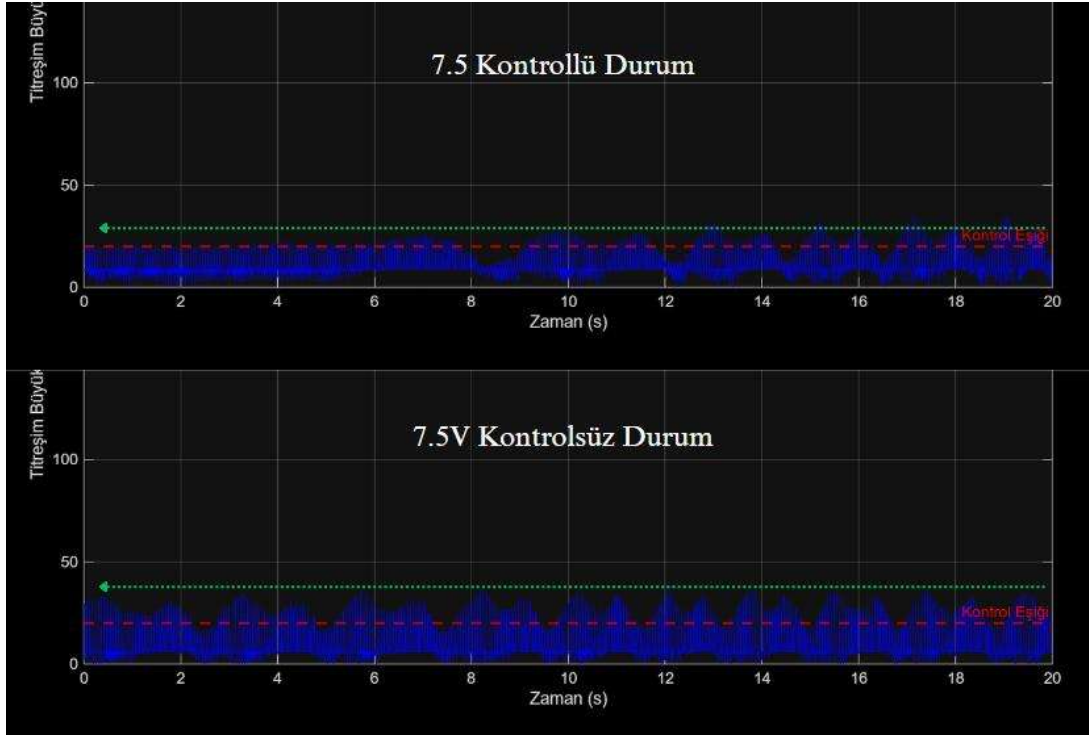
Tablo 5.1’de aktif titreşim kontrol sistemi uygulamasının, DC motor tahrikli kirişte belirli frekanslarda gözlemlenen titreşim genlikleri üzerindeki etkisini nicel olarak sunmaktadır. Analiz edilen frekans bileşenleri için, kontrolsüz durumdaki başlangıç genlikleri ile kontrol sistemi aktif hale getirildikten sonraki genlikler karşılaştırılmış ve buna bağlı yüzde değişimler hesaplanmıştır.

Tablo verileri incelendiğinde, kontrol sisteminin farklı frekanslardaki performansının heterojen olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle, 16.5 Hz frekansında %18 oranında kayda değer bir titreşim genliği azalması (5.0 birimden 4.1 birime) elde edilmiştir. Bu durum, kontrol stratejisinin bu frekanstaki ana zorlama veya rezonans modunu etkin bir şekilde hedefleyebildiğini ve sönümleyebildiğini göstermektedir. Benzer şekilde, 16.5 Hz’in ikinci harmoniği olduğu varsayılan 33.5 Hz frekansında da %6.67 gibi mütevazı ancak pozitif bir

sönümlleme etkisi (3.0 birimden 2.8 birime) gözlenmiştir. Bu bulgular, geliştirilen aktif sönümlleme mekanizmasının, belirli rezonans frekanslarında titreşim enerjisini azaltma kapasitesine sahip olduğunu doğrulamaktadır.

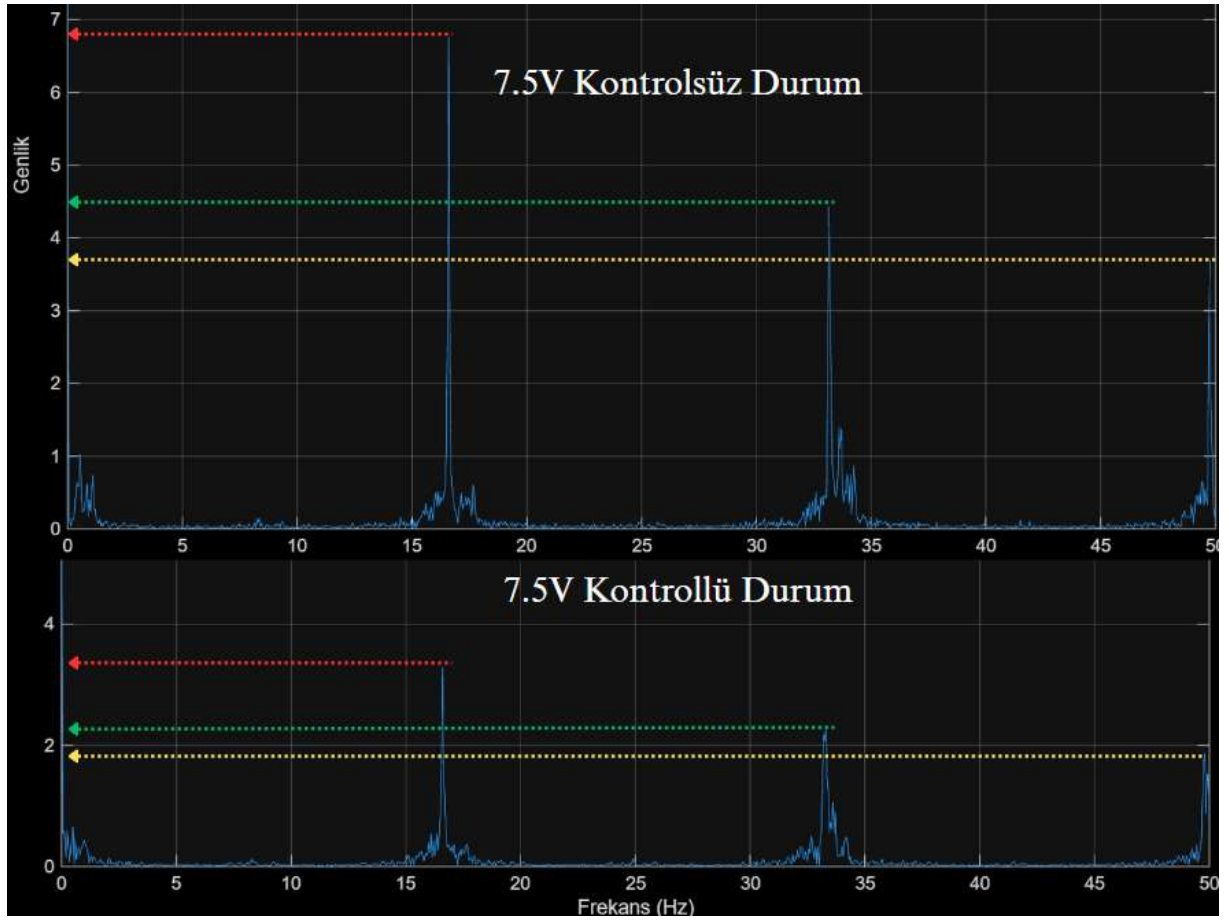
Ancak, tablo, kontrol sisteminin tüm frekans aralığında homojen bir sönümlleme performansı sergilemediğini de ortaya koymaktadır. 36 Hz frekansındaki titreşim genliğinde (2.0 birimden 2.0 birime) herhangi bir değişiklik olmaması, kontrol algoritmasının bu frekans bileşenine karşı ya kayıtsız kaldığını ya da bu modun kontrol edilebilirliğinin düşük olduğunu düşündürmektedir. Daha kritik bir gözlem ise 47.5 Hz frekansındaki genliğin, kontrol uygulandıktan sonra -10.71% oranında, yani 2.8 birimden 3.1 birime çıkarak arttığıdır. Bu durum, aktif titreşim kontrol sistemlerinde karşılaşılan "spillover" etkisine işaret etmektedir. "Spillover" etkisi, kontrolörün belirli modları sönümllemeye çalışırken, sistemin kontrol edilmeyen diğer modlarına enerji aktarması sonucu bu modlardaki titreşim genliklerinin artması olgusudur. Bu istenmeyen artışın temel nedenleri arasında kontrol gecikmeleri, kontrolörün band dışı frekanslara verdiği tepkiler, aktüatör ve sensör dinamiklerindeki sınırlamalar veya modlar arası karşılıklı etkileşimler yer alabilmektedir.

5.1.2 7.5V Karşılaştırma



Şekil 5.3 Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (7.5V Tahrik Altında)

Şekil 5.3'te sunulan verilere göre, aktif titreşim kontrol sistemi devreye alınmadan önceki kontrolsüz durumdaki titreşim büyüklüğünün ortalama değeri yaklaşık 48 birim kaydedilmiştir. Aktif titreşim kontrol sistemi etkinleştirildiğinde ise, bu ortalama titreşim büyüklüğü değeri belirgin bir şekilde azalarak 20–25 birim seviyelerine gerilemiştir. Bu gözlem, sistemin 7.5 V besleme voltajı altında titreşimi sönümleme konusunda etkin bir şekilde çalıştığını ve genel titreşim seviyesinde önemli bir azalma sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.



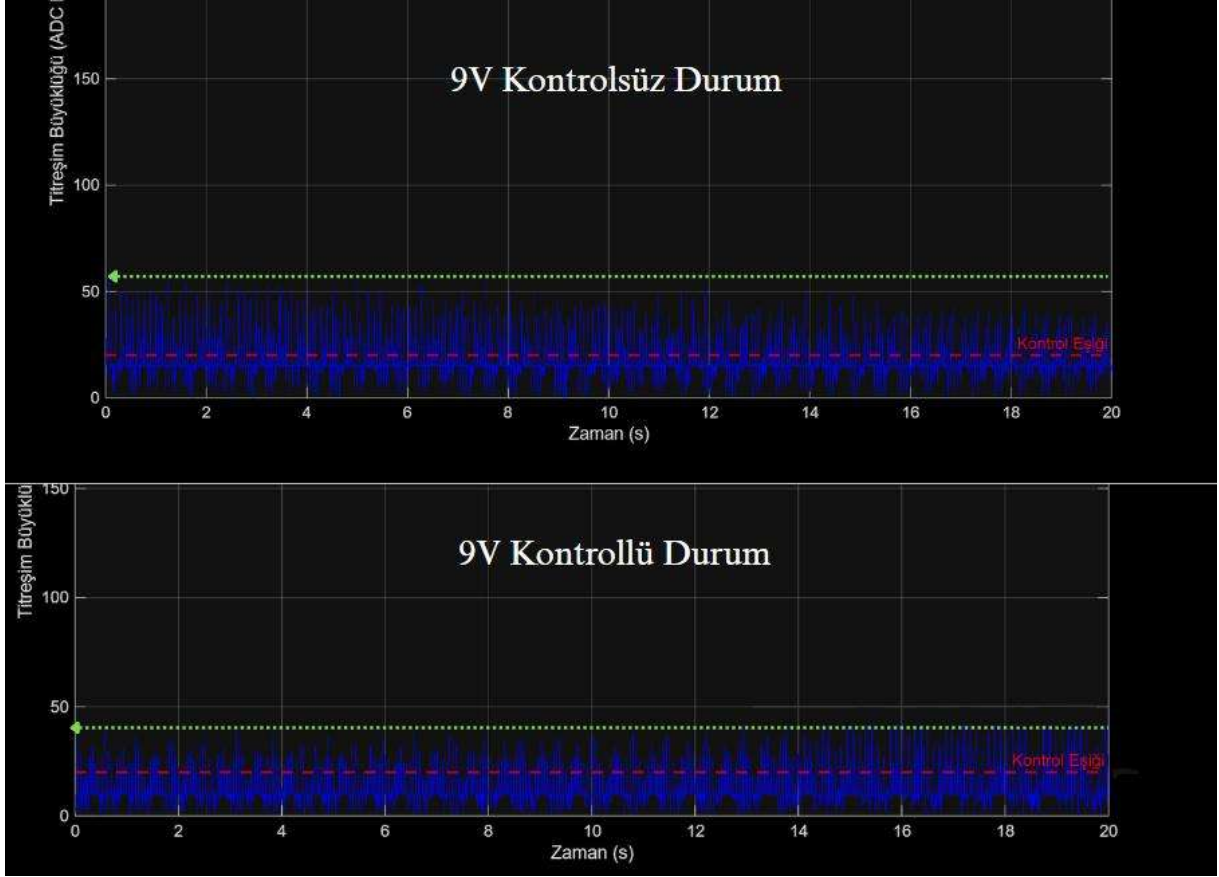
Şekil 5.4 Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (7.5V Tahrik Altında)

Tablo 5.2 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (7.5V Tahrik Altında)

Frekans	Kontrolsüz Durum Genliği	Kontrollü Durum Genliği	% Azalma
16.5	6.8	3.2	52.94%
34	4.5	2.2	51.11%
50	3.8	1.9	50%

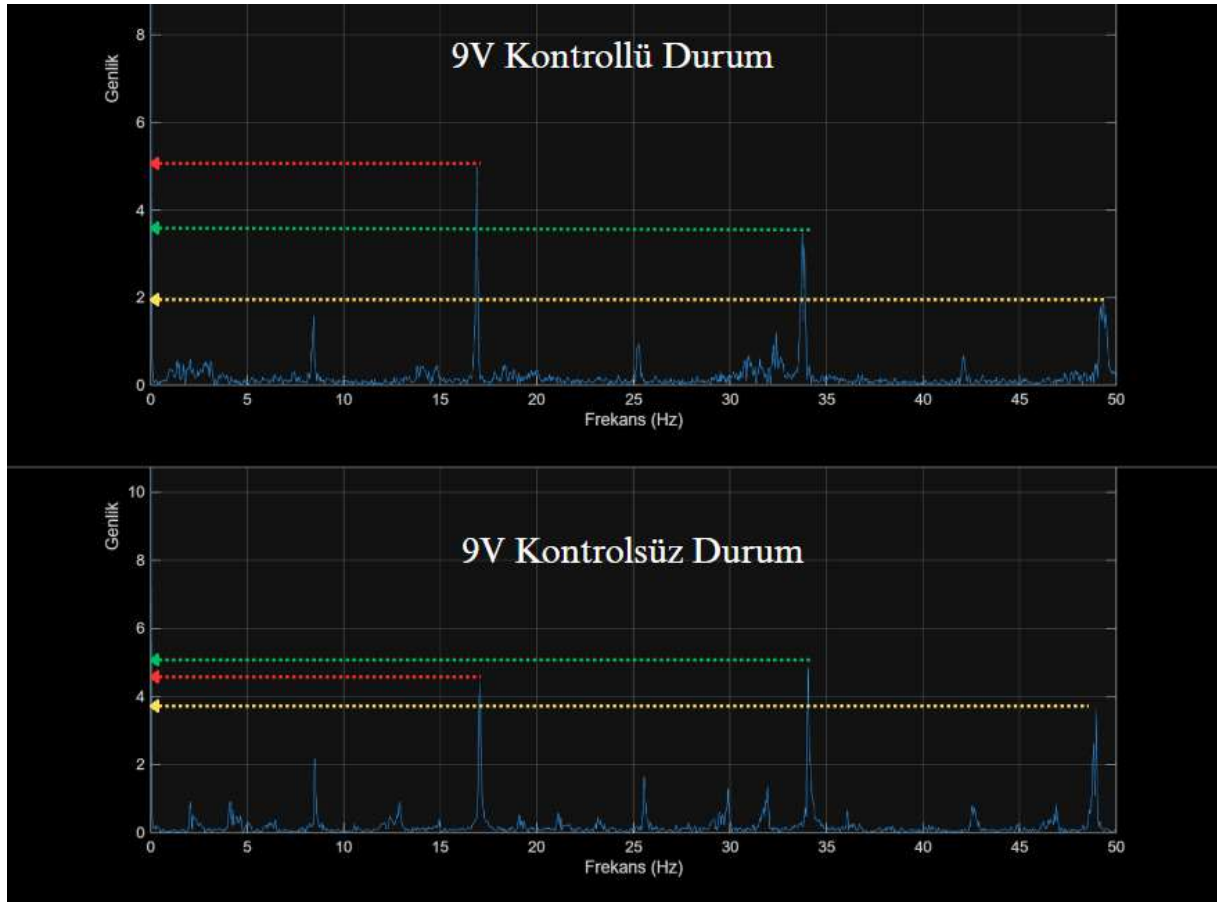
Tablo 5.2'deki veriler, aktif titreşim kontrol sisteminin, 7.5 V DC motor tahrik voltajı altında, incelenen tüm frekanslarda (16.5 Hz, 34 Hz, 50 Hz) yaklaşık %50 oranında yüksek ve tutarlı bir sönümlleme performansı sergilediğini açıkça göstermektedir. Bu sonuçlar, sistemin bu çalışma noktasında oldukça etkili olduğunu ve belirlenen frekans aralıklarında önemli titreşim azaltımının başarılabileceğini kanıtlamaktadır. Bu durum, sistemin belirli frekans aralıklarında optimum performans sergileme kabiliyetini vurgulamaktadır

5.1.3 9V Karşılaştırma



Şekil 5.5 Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (9V Tahrik Altında)

Şekil 5.5'te sunulan verilere göre, aktif titreşim kontrol sistemi devreye alınmadan önceki kontrolsüz durumdaki titreşim büyüklüğünün ortalama değeri yaklaşık 55 birim kaydedilmiştir. Aktif titreşim kontrol sistemi etkinleştirildiğinde ise, bu ortalama titreşim büyüklüğü değeri azalarak 40-45 birim seviyelerine gerilemiştir. Bu gözlem, sistemin 9 V besleme voltajı altında titreşimi sönümleme konusunda etkin bir şekilde çalıştığını ve genel titreşim seviyesinde önemli bir azalma sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5.6 Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (9V Tahrik Altında)

Tablo 5.3 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (9V Tahrik Altında)

Frekans	Kontrolsüz Durum Genliği	Kontrollü Durum Genliği	% Azalma
18	4.2	5	-19.05%
34	5	3.8	24.00%
58	3.9	2	48.72%

Tablo 5.3'teki veriler, 9 V besleme voltajı altında kontrol sisteminin frekanslara göre değişken bir performans sergilediğini açıkça göstermektedir. Bir yandan 34 Hz ve 58 Hz frekanslarında sırasıyla %24 ve yaklaşık %49 gibi önemli sönümler elde edilirken, diğer yandan 17.5 Hz frekansında genlikte %19 gibi istenmeyen bir artış ("spillover") meydana gelmiştir.

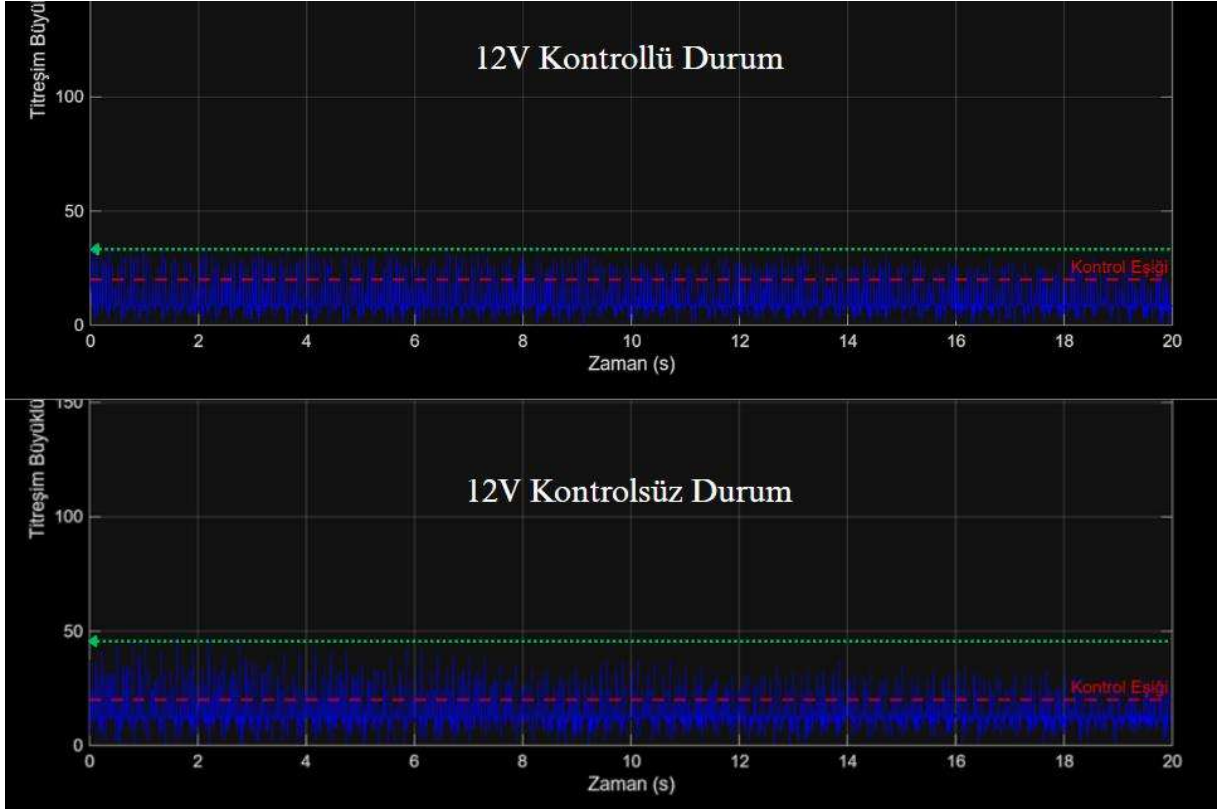
Bu değişken performans, özellikle projenin düşük maliyetli piezo sensörlerle yapılmış olmasıyla ilişkilendirilebilir:

- **Frekans Tepkisindeki Sınırlamalar:** Düşük maliyetli piezo sensörlerin ve aktüatörlerin frekans tepkisi genellikle geniş bir bantta düzgün değildir. Belirli frekanslarda (örneğin 34 Hz ve 58 Hz) daha etkin çalışabilirken, diğer frekanslarda

(örneğin 17.5 Hz) performansları düşebilir veya faz kaymaları nedeniyle istenmeyen etkileşimlere yol açabilirler. 58 Hz'deki yüksek sönümleme, bu frekansın piezo elemanların veya kirişin belirli bir rezonans moduna yakın olmasından kaynaklanıyor olabilir, bu da kontrolün daha verimli olmasını sağlar.

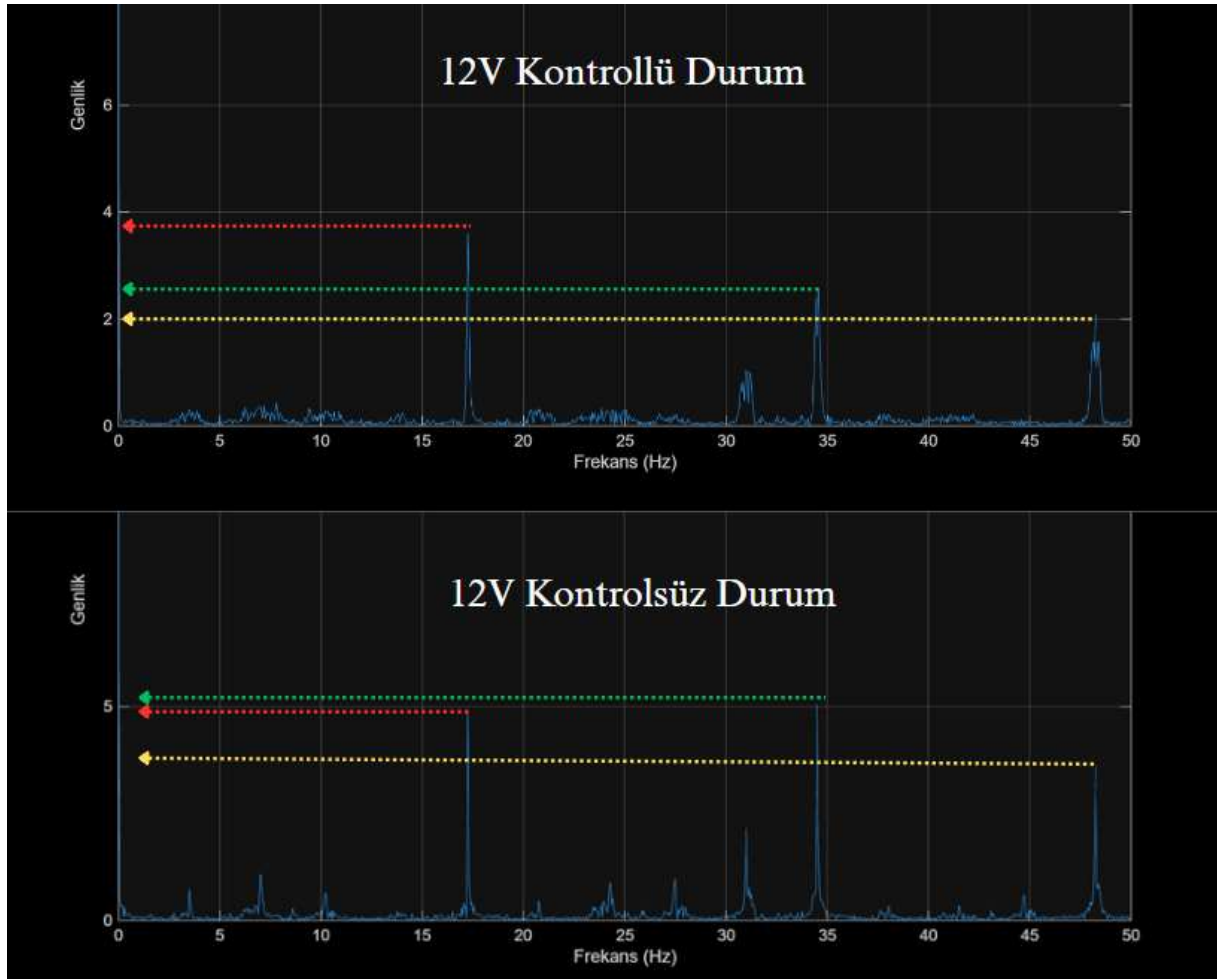
- **Artan Frekans ve Gecikme Etkileşimi:** 9 V'da motorun daha yüksek hızlarda dönmesiyle titreşim frekansları artar. Kontrol algoritmasındaki ve donanımdaki sabit veya frekansa bağlı gecikmeler, artan frekanslarda daha büyük faz hatalarına dönüşür. Bu durum, 17.5 Hz'deki titreşim artışının ana nedeni olabilir; yani, karşı sinyal 180 derece faz farkıyla uygulanamamış, bunun yerine yapıcı girişime neden olan bir faz kayması meydana gelmiş olabilir.

5.1.4 12V Karşılaştırma



Şekil 5.7 Kirişin Zaman-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (12V Tahrik Altında)

Şekil 5.7'te sunulan verilere göre, aktif titreşim kontrol sistemi devreye alınmadan önceki kontrolsüz durumdaki titreşim büyüklüğünün ortalama değeri yaklaşık 50 birim kaydedilmiştir. Aktif titreşim kontrol sistemi etkinleştirildiğinde ise, bu ortalama titreşim büyüklüğü değeri azalarak 30 birim seviyelerine gerilemiştir. Bu gözlem, sistemin 12 V besleme voltajı altında titreşimi sönümleme konusunda etkin bir şekilde çalıştığını ve genel titreşim seviyesinde önemli bir azalma sağladığını açıkça ortaya koymaktadır



Şekil 5.8 Kirişin Frekans-Genlik Tepkilerinin Karşılaştırılması (12V Tahrik Altında)

Tablo 5.4 Kontrollü ve Kontrolsüz Durumlardaki Değerlerin Yüzde (%) Değişimi (12V Tahrik Altında)

Frekans	Kontrolsüz Durum Genliği	Kontrollü Durum Genliği	% Azalma
17	4.9	4.9	0%
34	5.1	2.8	45.10%
58	4.2	2	52.38%

Tablo 5.4'teki veriler, 12 V besleme voltajı altında kontrol sisteminin, incelenen frekanslarda seçici bir sönümlerme performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle 34 Hz ve 58 Hz frekanslarında sırasıyla %45 ve %52 gibi çok yüksek sönümlerme oranları elde edilirken, 18 Hz frekansında herhangi bir sönümlerme başarısı gösterilememiştir.

5.2 Hata Kaynakları ve Belirsizlikler

Sunulan deneysel veriler, DC motor tahrikli kirişin farklı besleme voltajlarında (6V'dan 12V'a kadar) aktif titreşim kontrol sistemi performansı hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Ancak, tüm deneysel çalışmalarda olduğu gibi, bu sonuçlar da çeşitli hata kaynakları ve belirsizliklerden etkilenebilir. Bu faktörler, özellikle frekanslara bağlı olarak gözlemlenen sönümlemedeki değişkenlikleri, bazı frekanslarda etkinliğin olmamasını ve "spillover" etkisini (titreşim artışı) açıklayabilir.

1. Ölçüm Hataları ve Gürültü:

- **Sensör Hassasiyeti ve Doğrusallığı:** Kullanılan düşük maliyetli piezo sensörler, özellikle geniş bir frekans ve genlik aralığında tam anlamıyla doğrusal olmayabilir. Ayrıca, belirli frekanslarda hassasiyetleri düşebilir. Bu durum, özellikle düşük genlikli titreşimlerin doğru algılanmasını zorlaştırabilir ve kontrol algoritmasına hatalı giriş bilgisi sağlayabilir.
- **ADC Çözünürlüğü ve Örnekleme Hızı:** Arduino gibi mikrodenetleyicilerdeki analog-dijital çeviricilerin (ADC) sınırlı çözünürlüğü ve örnekleme hızı, özellikle yüksek frekanslı titreşim sinyallerinin doğru bir şekilde dijitalleştirilmesini engelleyebilir.
- **Çevresel Gürültü:** Deney ortamındaki akustik gürültü, elektriksel parazitler veya çevresel titreşimler, piezo sensörlerden gelen sinyallere karışarak ölçüm doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Bu, özellikle düşük genlikli sönümlemiş sinyallerin analizinde belirsizlik yaratır.

2. Kontrol Algoritması ve Uygulama Kaynaklı Hatalar:

- **Kontrol Gecikmeleri:** Sensörden veri okuma, Arduino'da işleme, Matlab'a veri aktarımı, Matlab'da kontrol sinyali hesaplama, tekrar Arduino'ya gönderme ve aktüatöre uygulama süreçlerinde kaçınılmaz gecikmeler mevcuttur. Bu gecikmeler, özellikle titreşim frekansı arttıkça, üretilen karşı sinyalin istenen 180° faz farkından sapmasına neden olabilir. Bu faz kayması, yıkıcı girişim (sönümleme) yerine yapıcı girişim (titreşim artışı- "spillover") ile sonuçlanabilir. 17.5 Hz'deki titreşim artışı bunun açık bir göstergesidir.
- **Model Belirsizliği:** Aktif kontrol sistemleri genellikle kontrol edilen yapının (kiriş) dinamik modeline dayanır. Kirişin gerçek dinamik özelliklerindeki belirsizlikler (malzeme özellikleri, bağlantı noktaları, motorun etkisi vb.) veya kontrol algoritmasının bu belirsizlikleri hesaba katmaması, kontrolün etkinliğini azaltabilir.

3. Donanım Sınırlamaları (Özellikle Düşük Maliyetli Piezoelemanlar):

- **Aktüatör Kapasitesi ve Doğrusallığı:** Düşük maliyetli piezo aktüatörler, yüksek frekanslarda veya yüksek genliklerde yeterli kuvvet üretemeyebilir. Ayrıca, bu elemanların doğrusallığı belirli çalışma noktalarının dışında bozulabilir, bu da uygulanan kontrol sinyalinin beklenen titreşim tepkisini oluşturamamasına neden olur.

- **Frekans Tepkisi ve Rezonanslar:** Hem piezo sensörlerin hem de aktüatörlerin kendi doğal rezonans frekansları ve sınırlı bant genişlikleri vardır. Bu rezonanslara yakın frekanslarda daha iyi performans gösterebilirken, bu rezonanslardan uzaklaştıkça etkinlikleri azalabilir. Tablolarda görülen frekanslara bağlı değişken performans (örneğin 58 Hz'deki yüksek sönümlenme ve 18 Hz'deki sönümlenme olmaması), piezo elemanların kendi frekans tepkisi karakteristiklerinden kaynaklanabilir.

4. Deneysel Kurulum ve Çevresel Faktörler:

- **Kiriş Bağlantı Noktaları:** Kirişin sabitlendiği noktalardaki küçük farklılıklar veya esnemeler, girişin dinamik davranışını ve rezonans frekanslarını etkileyebilir.
- **DC Motorun Dinamikleri:** DC motorun çalışma koşulları (hız stabilitesi, tork dalgalanmaları) besleme voltajına göre değişir ve girişte oluşturduğu titreşimlerin frekans ve genlik spektrumunu doğrudan etkiler. Motorun tam olarak kararlı bir frekansta dönmemesi (bir miktar dalgalanma olması), frekans analizi sonuçlarında belirsizliğe yol açabilir.
- **Sıcaklık ve Nem:** Piezoelektrik malzemelerin özellikleri sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerden etkilenebilir, bu da sensör hassasiyetinde ve aktüatör performansında zamanla veya farklı deneyler arasında değişkenlik yaratabilir.

6.SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu çalışma, ankastre bir alüminyum kirişin titreşimlerini aktif olarak sönümlemek amacıyla piezoelektrik sensörler ve eyleyiciler kullanan geri beslemeli bir kontrol sisteminin tasarımını, geliştirilmesini ve deneysel olarak doğrulanmasını kapsamıştır. Mekanik sistemlerdeki istenmeyen titreşimlerin yapısal yorulma, gürültü ve performans düşüşü gibi ciddi sorunlara yol açabileceği dikkate alınarak, aktif titreşim kontrolü (ATK) sistemlerinin modern mühendislik uygulamalarındaki önemi vurgulanmıştır.

Proje kapsamında, ayarlanabilir voltajlı bir DC motor ile kirişe sürekli bir uyartım sağlanmış ve kirişin titreşimleri mesnet noktasına yakın bir piezoelektrik (PZT) sensör tarafından algılanmıştır. Algılanan bu titreşim verileri, bir Arduino Uno kartı aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılmış ve gerçek zamanlı olarak işlenmiştir. Geliştirilen kontrol algoritması, titreşim genliği belirlenen bir eşik değerini aştığında, ikinci bir PZT eyleyiciyi devreye sokarak yıkıcı girişim prensibiyle titreşimi aktif olarak sönümlemeyi hedeflemiştir.

Deneysel testler, sistemin açık ve kapalı çevrim performansını değerlendirmek üzere gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, geliştirilen aktif titreşim kontrol (AVC) sisteminin özellikle kirişin birinci doğal frekansında (yaklaşık 6 Hz) ve yüksek voltajlarda (7.5V ve 12V) meydana gelen rezonans durumlarında titreşim genliğini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Özellikle 7.5V tahrik altında %50'nin üzerinde ve tutarlı bir sönümleme performansı sergilenirken, 9V ve 12V tahriklerde bazı frekanslarda %45-52 arasında etkili sönümlemeler gözlenmiştir. Ancak, 6V tahrik altında kontrol sisteminin eşik değeri çok fazla aşılmadığı için belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Ayrıca, 6V ve 9V'luk deneylerde "spillover" etkisi olarak adlandırılan, kontrol edilmeyen bazı frekanslarda titreşim genliğinin artması durumu da tespit edilmiştir.

Bu çalışma, piezoelektrik malzemeler ve temel kontrol stratejileri kullanılarak düşük maliyetli ve etkili bir aktif titreşim sönümleme sisteminin uygulanabilirliğini başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmanın sonuçları ve karşılaşılan sınırlılıklar ışığında, gelecekteki araştırmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- **Daha Gelişmiş Kontrol Algoritmaları:** Mevcut "aç-kapa" tabanlı kontrol stratejisi yerine, PID (Oransal-İntegral-Türevsel) veya uyarlamalı (adaptive) kontrol gibi daha gelişmiş algoritmaların kullanılması, sistemin farklı frekanslardaki titreşimlere daha dinamik ve hassas tepki vermesini sağlayabilir. Bu sayede "spillover" etkisinin minimize edilmesi ve daha geniş bir frekans bandında sönümleme başarısı elde edilmesi mümkün olabilir.
- **Sensör ve Eyleyici Optimizasyonu:** Çalışmada kullanılan düşük maliyetli piezoelektrik elemanların frekans tepkisi ve doğrusallığındaki sınırlılıklar göz önünde bulundurularak, daha yüksek kaliteli veya optimize edilmiş piezoelektrik sensör ve eyleyicilerin kullanılması, ölçüm doğruluğunu ve sönümleme verimliliğini artırabilir. Piezo elemanların giriş üzerindeki optimum yerleşim yerlerinin deneysel veya sayısal yöntemlerle belirlenmesi de performansı iyileştirebilir.
- **Gecikme Telafisi:** Kontrol döngüsündeki veri aktarımı ve işleme kaynaklı gecikmelerin, özellikle yüksek frekanslarda "spillover" etkisine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu gecikmeleri telafi etmek için yazılımsal veya donanımsal çözümler (örneğin, daha hızlı işlemciler, daha optimize edilmiş haberleşme protokolleri) geliştirilmelidir.
- **Çevresel Faktörlerin Etkisi:** Sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerin piezoelektrik malzemelerin performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak araştırılabilir ve bu etkilere karşı dayanıklı sistemler geliştirilebilir.
- **Daha Karmaşık Yapılar:** Ankastre giriş gibi basit bir yapı yerine, daha karmaşık mühendislik yapıları (levhalar, çerçeveler vb.) üzerinde aktif titreşim kontrol sistemlerinin uygulanabilirliği ve performansı incelenebilir.
- **Enerji Tüketimi Analizi:** Aktif sistemler harici güç gerektirdiğinden, kontrol sisteminin enerji verimliliği ve uzun süreli operasyonlardaki enerji tüketimi detaylı olarak analiz edilebilir.
- **Kullanıcı Arayüzü Geliştirme:** MATLAB ortamında çalışan mevcut kontrol arayüzü, daha kullanıcı dostu ve gerçek zamanlı izleme/ayarlama imkânı sunan bağımsız bir yazılıma dönüştürülebilir.

7.KAYNAKÇA

- [1] A. N. Şahin, "Piezoelektrik motorların tasarımı, kontrol mekanizmaları ve sonlu elemanlar modeli üzerine bir araştırma," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2013.
- [2] D. Sofu, "Akıllı çubuk titreşimlerinin piezoelektrik eyleyiciler ile aktif kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [3] M. U. Arıdoğan, "Piezoelektrik yamaların akıllı bir kirişin titreşim özelliklerinin bulunmasında ve titreşim kontrolündeki etkinliğinin değerlendirilmesi," Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [4] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 6th ed. Pearson Education, 2017.
- [5] D. J. Inman, *Engineering Vibration*, 4th ed. Pearson Education, 2013.
- [6] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*, 3rd ed. Springer, 2011.
- [7] T. Bailey and J. E. Hubbard Jr., "Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 8, no. 5, pp. 605–611, 1985.
- [8] E. F. Crawley and J. de Luis, "Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures," *AIAA Journal*, vol. 25, no. 10, pp. 1373–1385, 1987.
- [9] W. T. Thomson and M. D. Dahleh, *Theory of Vibration with Applications*, 5th ed. Prentice Hall, 1998.
- [10] C. R. Fuller, S. J. Elliott, and P. A. Nelson, *Active Control of Vibration*. Academic Press, 1996.
- [11] E. Kılıç, "Dinamik Titreşim Yutucu Deney Föyü," Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi. [Çevrimiçi]. Erişilebilir: <https://muhendislik.sdu.edu.tr/assets/uploads/sites/146/files/titresim-yutucu-deney-foyu-13102021.pdf>.
- [12] S. M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, and L. Dugard, *Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [13] H. E. Sevgi, "Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit bir kirişin titreşim analizi ve kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [14] H. T. Tan, "Piezoelektrik yamalı bir kirişin titreşim analizi ve şekil kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.

- [15] İ. F. Lülecı, "Piezoelektrik eyleyicilerle kiriş ve levhaların aktif titreşim kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [16] H. Ünal, "Piezoelektrik ayarlı dinamik titreşim sönümleyicinin parametrik incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2024.
- [17] N. A. Demir, "Piezoelektrik katmanlı bir plağın titreşim analizi," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018.
- [18] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Prentice Hall, 2010.
- [19] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 8th ed. Pearson, 2018.
- [20] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed. Pearson, 2017.
- [21] L. Meirovitch, *Fundamentals of Vibrations*. McGraw-Hill, 2001.
- [22] "12V DC 360 Vibration Motor," *Motorobit.com*. [Çevrimiçi]. Erişilebilir: <https://www.motorobit.com/12v-360-vibration-motor>.
- [23] "Arduino Uno Rev3," *Arduino Official Store*. [Çevrimiçi]. Erişilebilir: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>.
- [24] "Piezoelectric Ceramic Materials," *APC International, Ltd.* [Çevrimiçi]. Erişilebilir: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory-and-materials/piezoelectric-materials.html>.
- [25] "ATmega328P Datasheet," *Microchip Technology Inc.*, 2018.
- [26] N. W. Hagood, W. H. Chung, and A. von Flotow, "Modelling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 1, no. 3, pp. 327–354, 1990.
- [27] S. O. R. Moheimani and A. J. Fleming, *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Springer, 2006.
- [28] A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting*. Wiley, 2011.
- [29] "MATLAB," *The MathWorks, Inc.*, Natick, Massachusetts, 2024.
- [30] B. Jaffe, W. R. Cook Jr., and H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*. Academic Press, 1971.