

**T. C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PERİYODİK YÜK ALTINDAKİ 2R ROBOT KOLUN DİNAMİK
ANALİZİ VE PERFORMANS İNCELEMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özer YÜCEL
(201292091131)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Aydın DEMİR

**SİVAS
OCAK 2016**

Özer YÜCEL'in hazırladığı ve “**Periyodik Yük Altındaki 2R Robot Kolun Dinamik Analizi ve Performans incelemeleri**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Aydın DEMİR**
Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Orhan ÇAKAR**
Fırat Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali ERTAŞ
Cumhuriyet Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Aydın DEMİR
Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-573 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Özer YÜCEL, 2016

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

22.04.2016

Özer YÜCEL

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Aydın DEMİR’e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren hocalarım Doç. Dr. Orhan ÇAKAR, Doç. Dr. Ahmet FERTELLİ, Doç. Dr. Züleyha ASLAN’a, Yrd. Doç. Dr. H.Ali ERTAŞ, Yrd. Doç. Dr. Ahmet AKKUŞ, Arş. Gör. Sakine KIRATLI’ya, Arş. Gör. Ahmet YÜCEL’e, arkadaşım Mak. Müh. Ömer KARABEY’e teşekkür ederim.

Ayrıca her konuda sabır ve desteklerini esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından M-573 numaralı projeyle desteklenmiştir.

ÖZET

PERİYODİK YÜK ALTINDAKİ 2R ROBOT KOLUN DİNAMİK ANALİZİ VE PERFORMANS İNCELEMELERİ

Özer YÜCEL

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Aydın DEMİR

2016, 103+xvi sayfa

Günümüzde gerek genel amaçlı gerekse özel amaçlı robotlar üretim, askeri ve sağlık alanları gibi çok geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Robot kollar birçok endüstriyel uygulamalarda genellikle ulaşım, yükleme, kaynak, malzeme montaj, paketlenme, delme ve frezeleme gibi rutin işletme koşullarında da kullanılırlar. Üretimde verimlilik ve kalite esasına dayalı bu tip otomasyon sistemlerin uygulama alanlarının artmasıyla birlikte, tasarımda yapılacak iyileştirmeler büyük önem arz etmektedir. Üretilen robot kolların uzun süre problemsiz ve yüksek hassasiyette çalışmaları beklenir. Robot kolların kontrol kartına tanımlanmış hareketlerin tekrarı esasına dayanan bir çalışma prensipleri vardır. Bu prensip gereği robot kolların kısa bir sürede yapmaları gereken ani kalkış ve duruş hareketlerinin verimi arttırmak için yumuşatılması gerekmektedir. Bu projede periyodik yük altındaki 2R robot kolun dinamik analizleri deneysel ve sayısal yöntemlerle yapılmış ve performansı optimize edecek parametreler incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: 2R Robot Kol, Dinamik Analiz, Performans İncelemesi.

ABSTRACT

DYNAMIC ANALYSIS AND PERFORMANCE INVESTIGATIONS OF 2R ROBOT ARM UNDER CYCLIC LOADING Özer YÜCEL

Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Aydın DEMİR

Asst. Prof. of Mechanical Engineering

2016, 103 pages

Nowadays robots which are designed as general purpose or special purpose have a large usage area like manufacturing, army and health areas. Robot arms are used in many industrial applications, usually transportations, installation, welding, assembling, packaging and in the routine operating conditions as drilling and milling. On the basis of efficiency and quality in the production of this type automation systems with the increase of the application areas, improvements to be made in the design take great importance. Manufactured robot arms are expected to work a long time with high precision without any trouble. Robot arms have a working principle on the basis of repetition the defined movements to the control card. By this principle robot arms movements need to be softened of their starts and stops in a short period in order to increase the efficiency. In this study, dynamic analysis of 2R robot arm which is running under periodic load is analyzed by the experimental and computational methods and examined the parameters which are optimize the performances.

Key Words: 2R Robot Arm, Dynamic Analysis, Performance Examination.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK.....	iii
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Robot Tanımları.....	1
1.2 Robotların Kronolojik Tarihçesi.....	1
1.3 Robot Teknolojisi ve Uygulamaları.....	7
1.4 Robotların Sınıflandırılmaları.....	8
1.4.1 Uygulama Konularına Göre Sınıflandırma.....	8
1.4.2 Konumlarına Göre Sınıflandırma.....	8
1.4.3 Boyutlarına Göre Sınıflandırma.....	8
1.4.4 İşlevlerine Göre Sınıflandırma.....	8
1.5 Tezin Konusu.....	10
1.6 Tezin Amacı.....	10
1.7 Literatür Özetleri.....	11
2. TİTREŞİM.....	14
2.1 Temel Kavramlar.....	14
2.1.1 Periyot.....	14
2.1.2 Frekans.....	14
2.1.3 Açısal Frekans.....	15
2.1.4 Faz.....	15
2.1.5 Genlik.....	15
2.1.6 Deplasman.....	15
2.1.7 Hız.....	15
2.1.8 İvme.....	16
2.1.9 Doğal Frekans.....	17
2.1.10 Rezonans.....	17
2.2 Titreşimin Sınıflandırılması.....	17
2.2.1 Sönümsüz ve sönümlü titreşimler.....	17
2.2.2 Serbest ve zorlanmış titreşimler.....	18
2.2.3 Lineer ve lineer olmayan (nonlinear) titreşimler.....	19
2.3 Titreşim Analizi.....	19
2.3.1 Dalgaform Grafiği.....	19
2.3.2 Spektrum Grafiği.....	19
2.4 Titreşim Analiz Cihazı.....	21
2.4.1 Titreşim Ölçerler.....	22
2.4.2 Hız Sensörü.....	22
2.4.3 İvme Sensörü.....	23
2.4.5 Deplasman Sensörleri.....	24
3. DİNAMİK TİTREŞİM ABSORBERİ.....	25

3.1 Sönümsüz Dinamik Titreşim Absorberi	25
3.2 Sönümlü Dinamik Titreşim Absorberi	27
4. MATEMATİKSEL MODEL	28
4.1 Kinetik ve Potansiyel Enerjiler	28
4.2 Genelleştirilmiş Kuvvetler (Momentler)	33
4.3 Hareket Denklemleri.....	34
4.3.1 Absorbersiz sistem için hareket denklemleri	34
4.3.2 Arka kola absorber bağlandığı zaman hareket denklemleri	34
4.3.3 Ön kola absorber bağlandığı zaman hareket denklemleri	35
4.3.4 Arka kola dengeleme yayı yerleştirilen sistemdeki hareket denklemleri.....	36
4.3.5 Absorbersiz sistemde dengeleme yayı yerleştirildiğinde hareket denklemleri.....	37
4.3.6 Arka koldaki absorberli sisteme dengeleme yayı yerleştirildiğinde hareket denklemleri	37
4.3.7 Ön koldaki absorberli sisteme dengeleme yayı yerleştirildiğinde hareket denklemleri	38
4.4 İkinci Mertebeden Türevlere Bağlı Diferansiyel Denklemleri Birinci Mertebeye İndirgeme.....	39
5. TEORİK HESAPLAMALAR.....	41
5.1 Dengeleme Yaysız ve Absorbersiz Sistem İçin Analizler	42
5.1.2 Dengeleme yaylı ve absorbersiz sistem için analizler	44
5.2 Arka Kola Absorber Eklendiği Durumda Analizler	46
5.2.1 Dengeleme yaysız arka kola absorber eklendiği durumdaki analizler....	46
5.2.2 Dengeleme yaylı arka kola absorber konulduğu durumdaki analizler....	48
5.3 Ön Kola Absorber Eklendiği Durumda Analiz	50
5.3.1 Ön kolda absorber eklenip arka kola dengeleme yayı eklenmeden yapılan analizler	50
5.3.2 Ön kolda absorber ve arka kola dengeleme yayı eklenerek yapılan analizler	52
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	54
6.1 Deney Düzenegi.....	56
6.1.1 2R robotun programlanması ve sensör yerleşimi.....	57
6.1.2 Titreşim analiz cihazının programlanması ve kontrolü.....	58
6.1.3 Kontrol ölçümleri	61
6.2.2R Robot Kolda Doğal Frekans Tayini.....	62
6.3 DeneySEL çalışmalar	64
6.3.1 Robot kollara absorber ve dengeleme yayı bağlanmadan yapılan titreşim analizleri.....	65
6.3.2 Sistemin arka koluna dengeleme yayı eklenmesi durumunda yapılan deneySEL titreşim ölçümleri	66
6.3.3 Arka kolda absorber kullanımı durumunda yapılan titreşim ölçümleri ..	68
6.3.4 Robotun arka koluna absorber ve dengeleme yayı bağlıyken yapılan titreşim ölçümleri	70
6.3.5 Robotun ön kolunda absorber kullanımı durumunda yapılan titreşim ölçümleri.....	72
6.3.6 Robotun arka kolunda dengeleme yayı ve ön kolunda absorber bağlıyken yapılan titreşim ölçümleri.....	74
6.3.7 Robot kolda çift absorber kullanımı durumunda yapılan analizler	76
7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER	78

7.1 Robot Kolda Absorber Kullanımı.....	79
7.2 Robot Kolda Dengeleme Yayı Kullanımı.....	80
7.3 Sistemin Arka Kolunun Farklı Durumlara Göre Titreşim Karşılaştırma Grafikleri	82
7.4 Sistemin Ön Kolunun Farklı Durumlara Göre Titreşim Karşılaştırma Grafikleri	91
7.5 Genel Değerlendirme ve Sonuçlar.....	100
7.5.1 Sayısal sonuçların değerlendirilmesi.....	100
7.5.2 Deneysel sonuçların değerlendirilmesi	101
KAYNAKLAR	102

ÖZGEÇMİŞ



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1	Shakey Robotu	3
Şekil 1.2	Stanford Kolu	4
Şekil 1.3	PUMA	4
Şekil 1.4	Stanford Cart	5
Şekil 1.5	Pioneer 1.....	5
Şekil 1.6	Furby	6
Şekil 1.7	Aibo.....	6
Şekil 1.8	Asimo	6
Şekil 1.9	Kellrob kablo kontrollü robot.....	7
Şekil 2.1	Çalışma bölgeleri.....	16
Şekil 2.2	Sönümsüz serbest titreşim.	17
Şekil 2.3	Sönümlü serbest titreşim.	18
Şekil 2.4	Zorlanmış kuvvetle sönümlü sistem.....	18
Şekil 2.5	FFT çevrimi.....	20
Şekil 2.6	Titreşim analiz cihazı ve arayüzü.	21
Şekil 2.7	Sismik hız sensörü görünümü	22
Şekil 2.8	Piezoelektrik hız sensörü görünümü	23
Şekil 2.9	İvme sensörü	23
Şekil 2.10	Titreşim ölçerlerin çalışma frekans aralıkları.....	24
Şekil 3.1	Şematik olarak dinamik titreşim absorberinin sisteme eklenmesi	26
Şekil 3.2	Ana sistem ve dinamik titreşim absorberinde titreşim büyüklüğüne bağlı frekans değişimi	26
Şekil 3.3	Sönümlü dinamik titreşim absorberinin sistemdeki etkisi	27
Şekil 4.1	İki serbestlik dereceli robot kol sistemi.....	28
Şekil 4.2	Genelleştirilmiş kuvvetler için referans sistemi.	33
Şekil 4.3	Dengeleme yaylı sistemin şematik gösterimi.....	36
Şekil 5.1	Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.	42
Şekil 5.2	Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.	42
Şekil 5.3	Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.	43
Şekil 5.4	Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.	43
Şekil 5.5	Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.	44
Şekil 5.6	Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.	44
Şekil 5.7	Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.	44
Şekil 5.8	Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.	45
Şekil 5.9	Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.	46
Şekil 5.10	Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.	46
Şekil 5.11	Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.	46
Şekil 5.12	Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.	47
Şekil 5.13	Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.	48
Şekil 5.14	Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.	48
Şekil 5.15	Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.	48
Şekil 5.16	Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.	49
Şekil 5.17	Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.	50
Şekil 5.18	Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.	50
Şekil 5.19	Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.	51

Şekil 5.20	Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.....	51
Şekil 5.21	Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.	52
Şekil 5.22	Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.	52
Şekil 5.23	Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.	52
Şekil 5.24	Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.	53
Şekil 6.1	Robot kol katı model görünümü.	54
Şekil 6.2	2R robot kolun titreşim deney düzeneği.	56
Şekil 6.3	Deneysel çalışmalar için robot kola program kodlarının yüklenmesi.	57
Şekil 6.4	Robotun ön ve arka koluna ivme sensörünün bağlanması.	58
Şekil 6.5	Robotun arka koluna dengeleme yayının bağlanması.	58
Şekil 6.6	Robotun arka ve ön koluna dinamik titreşim absorberlerinin bağlanması.....	58
Şekil 6.7	Laboratuvardaki priz bağlantılarının kontrolü.	59
Şekil 6.8	Titreşim analiz cihazının elektrik ve topraklama bağlantısı.....	60
Şekil 6.9	Robot kollar hareketsiz iken ölçülen titreşim değerleri.	61
Şekil 6.10	Robot kollar hareketsiz iken ölçülen frekans spektrumu.	61
Şekil 6.11	İvme sensörü arka kol kütle merkezinde iken ölçülen titreşim değerleri.....	62
Şekil 6.12	İvme sensörü arka kol kütle merkezinde iken ölçülen frekans spektrumu.	62
Şekil 6.13	İvme sensörü ön kol kütle merkezinde iken ölçülen titreşim değerleri... ..	63
Şekil 6.14	İvme sensörü ön kol kütle merkezinde iken ölçülen frekans spektrumu.	63
Şekil 6.15	Ön kolun bekleme konumunda ölçülen titreşim değerleri.	64
Şekil 6.16	Arka kolun bekleme konumunda ölçülen titreşim değerleri.	64
Şekil 6.17	Dengeleme yaysız ve absorbersiz sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	65
Şekil 6.18	Dengeleme yaysız ve absorbersiz sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	66
Şekil 6.19	Dengeleme yaylı sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	66
Şekil 6.20	Dengeleme yaylı sistemin ön kolunun lineer ölçekli, ivme genlikli titreşim.....	67
Şekil 6.21	Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	68
Şekil 6.22	Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	68
Şekil 6.23	Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	69
Şekil 6.24	Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	69
Şekil 6.25	Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	70
Şekil 6.26	Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	70
Şekil 6.27	Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	71
Şekil 6.28	Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	71

Şekil 6.29	Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	72
Şekil 6.30	Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	72
Şekil 6.31	Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	73
Şekil 6.32	Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	73
Şekil 6.33	Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	74
Şekil 6.34	Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	74
Şekil 6.35	Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	75
Şekil 6.36	Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	75
Şekil 6.37	Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	76
Şekil 6.38	Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	76
Şekil 6.39	Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	77
Şekil 6.40	Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri	77
Şekil 7.1	Arka kolun dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız titreşim değerlerinin karşılaştırılması	82
Şekil 7.2	Dengeleme yaysız arka kolda absorber bulunan sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 7.3	Dengeleme yaylı arka kolda absorber bulunan sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 7.4	Dengeleme yaylı arka kolda absorber bulunan sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 7.5	Dengeleme yaysız ön kolda absorber bulunan sistemin arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 7.6	Dengeleme yaylı ön kolda absorber bulunan sistemin arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	87
Şekil 7.7	Dengeleme yaysız çift absorberli sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	88
Şekil 7.8	Dengeleme yaylı çift absorberli sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	89
Şekil 7.9	Dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız çift absorberli sistemin arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	90
Şekil 7.10	Arka kolu dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız sistemin ön kolunun titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	91
Şekil 7.11	Arka kolu dengeleme yaysız ön kolu absorberli sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 7.12	Dengeleme yaylı ön kolda absorber bulunan sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	93
Şekil 7.13	Dengeleme yaylı ön kolda absorber bulunan sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	94

Şekil 7.14	Dengeleme yaysız arka kolda absorber bulunan sistemin ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 7.15	Dengeleme yaylı arka kolda absorber bulunan sistemin ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	96
Şekil 7.16	Dengeleme yaysız çift absorberli sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	97
Şekil 7.17	Dengeleme yaylı çift absorberli sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması	98
Şekil 7.18	Dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız çift absorberli sistemin ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.....	99



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1	Mekatronik teknoloji uygulama örneklerinin sınıflandırması..... 10
Çizelge 5.1	Teorik hesaplamada kullanılan değerler..... 42
Çizelge 5.2	Sisteme dengeleme yayı eklenerek elde edilen sonuçlar..... 46
Çizelge 5.3	Dengeleme yaysız sistemin arka koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar..... 48
Çizelge 5.4	Dengeleme yaylı sistemin arka koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar..... 50
Çizelge 5.5	Dengeleme yaysız sistemin ön koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar..... 52
Çizelge 5.6	Dengeleme yaylı sistemin ön koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar..... 54
Çizelge 6.1	Robotta kullanılan malzeme listesi..... 56
Çizelge 7.1	Dengeleme yaylı deneysel ölçüm sayısal titreşim sonuçları 80
Çizelge 7.2	Robota absorber eklenerek elde edilen titreşim değerleri 81
Çizelge 7.3	Deneysel ölçüm sayısal titreşim sonuçları 82

SİMGELER DİZİNİ

θ_1	Arka kolun yatay eksenle yaptığı açı
θ_2	Ön kolun arka kola yaptığı açı
$\dot{\theta}_1$	Arka kolun hızı
$\dot{\theta}_2$	Ön kolun hızı
m_1	Arka kolun kütlesi
m_2	Ön kolun kütlesi
u_1	Arka koldaki absorberin yay deplasmanı
u_2	Ön koldaki absorberin yay deplasmanı
$\dot{u}_1$	Arka koldaki absorberin hızı
$\dot{u}_2$	Ön koldaki absorberin hızı
l_1	Arka kol uzunluğu
l_2	Ön kol uzunluğu
a_1	Arka koldaki absorberin kola yerleştirildiği uzaklık
a_2	Ön koldaki absorberin kola yerleştirildiği uzaklık
G	Kolların ağırlık merkezleri
F_x	Kuvvetin yatay bileşeni
F_y	Kuvvetin düşey bileşeni
ω	Kuvvet frekansı
φ	Kuvvetin yatayla yaptığı açı
ϕ	Dengeleme yayının yatayla yaptığı açı
C	Sönüm elemanı katsayısı
k	Yay katsayısı
k_d	Dengeleme yayının katsayısı
F_0	Uygulanan ilk kuvvet
I_1	Arka kol kütleli atalet momenti
I_2	Ön kol kütleli atalet momenti
A_1	Arka koldaki absorber konumu
A_2	Ön koldaki absorber konumu
τ_1	Mafsal sürücü torku
τ_2	Mafsal sürücü torku

KISALTMALAR DİZİNİ

CÜ	: Cumhuriyet Üniversitesi
CÜBAP	: Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
SMPS	: Switch Mode Power Supply
CAD	: Computer Aided Design
EMG	: Elektromiyogram
İMA	: İnsan makine arayüzü
PIC	: Peripheral Interface Controller (Çevrebirim arayüz denetleyicisi)
PID	: Proportional,Integral,Derivative (oransal-integral-türevsel denetleyici)
CNC	: Computer Numerical Control
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
ENIAC	: Electronic Numerical Integrator And Computer
RAD	: Radyan

1. GİRİŞ

1.1 Robot Tanımları

Robotlar; Çek, Slovak ve Polonya dillerinde köle işçi anlamına gelen roboti, eski Slav kilisesi servis yapan anlamına gelen rabota, Almancada ise işçi anlamına gelen Arbeiter uzantılarıyla adlandırılmışlardır.

Webster's Dictionary (1993); Normal koşullarda insanlara atfedilen işlevleri yapan veya şekilsel olarak insana benzeyen otomatik bir düzenek olarak tanımlamıştır.

Amerika Robot Enstitüsü (1979): Çeşitli işleri yapabilmek için programlanmış hareketlerle malzeme, parça, alet veya özel cihazları taşımak için tasarlanmış çok işlevli, tekrar programlanabilir düzenek olarak tanımlamıştır.

Günümüz koşullarında ve robot sıfatı ile anılan çok sayıda örnekleri incelediğimizde, bu tanımlardan birincisinin yetersiz olduğu, robot kavramlarının insan işlevleri ve şekli ile tanımlandırılması ve sınırlandırılmasının yanlış olduğu açıktır. Bu nedenle, robot tanımı olarak, “canlılara benzer işlevleri olan ve davranış biçimleri sergileyen makinalar” diyebiliriz.

Robotların temel özellikleri olarak da: işlevsel olarak kendi kendilerine yeter ve programlanabilir" olmaları sayılabilir [1].

1.2 Robotların Kronolojik Tarihçesi

Robot kelimesi ilk olarak 1920 yılında kullanılmış olsa da, robotlara ait ilk kavramlar ve robot benzeri ilk makinalara ait bilgiler MÖ 3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Eski Mısır, eski Yunan ve Anadolu medeniyetlerinde otomatik su saatleri benzeri makinaların geliştirildiği bilinmektedir. Homerus'un İlyada eserinde insan yapımı kadın hizmetçiler anlatılmaktadır. MÖ 100 yıllarında yaşamış olan İskenderiyeli bir mühendisin otomatik açılan kapılar, fiskiyeler gibi düzenekleri su ve buhar gücü ile çalıştırdığı eski kitaplarda yazılmaktadır. Daha yeni çağlarda Leonardo da Vinci'nin yürüyen mekanik aslanı olduğu söylenmektedir [1].

MÖ 270: Ctesibus isimli bir eski Yunan bilgini hareketli parçalardan oluşan organ ve su saatleri üretti.

MÖ 100: Otomatik açılan tapınak kapıları (İskenderiye).

1136-1206: El Cezeri'ye ait çeşitli otomatik makinalar.

1800: Jacques de Vaucanson, Pierre & Henri-Louis Jacquet-Droz, Henri Maillerdet otomatik yazı yazan ve müzik enstrümanı çalan makinalar geliştirdiler.

1801: Joseph Jacquard ilk kez delikli kart kullanarak çalıştırılan otomatik dokuma makinası geliştirdi.

1818: Mary Shelley "Frankenstein" isimli hikayesinde yapay bir yaşam şeklini kullandı.

1830: Christopher Spencer mekanik kam denetimli otomatik bir torna tezgahı geliştirdi.

1892: Seward Babbitt sıcak metal parçaları fırından almak üzere motorlu tutucuya sahip kren tasarladı.

1920 - 1921: Çekoslovak Karel Capek'in yazdığı bir tiyatro oyununda ilk kez ROBOT kelimesi kullanıldı. Yazar bu kelimeyi Çek lisanında "hizmet eden" anlamında kullanılan "robota"dan türetmiştir. Tiyatro oyunu, "insan makinayı yapar, makina da insanı öldürür" teması üzerine kurulmuştur.

1938: DeVillbis firması için Willard Pollard ve Harold Roselund programlanabilir püskürtme boyama makinası geliştirdiler.

1940: MIT'de radar teknolojisinin geliştirilmesi, cisimleri insan etmeni olmadan algılama konusunda en önemli adımlardan birisi oldu.

1940: Grey Walter ışığa yönelen ilk gezer robotları (machina speculatrix) üretti.

1941: Isaac Asimov "Robot" kelimesinden "Robotik" kelimesini türeterek ilk kez kullandı. Robotik, robot teknolojisi ile ilgili tüm alanları kapsayan bir tanım olarak kabul ediliyor.

1946: George Devol, genel amaçlı, manyetik kayıt yapabilen ve tekrar çalıştırılabilen bir cihaz geliştirmiş ve çeşitli makinalarda kullandı.

1946: J. Presper Eckert ve John Mauchly, Pennsylvania Üniversitesi'nde ilk elektronik bilgisayar olarak bilinen ENIAC isimli bilgisayarı geliştirdi. Whirlwind isimli bir başka bilgisayar M.I.T.'de ilk olarak bir bilimsel problemi çözdü.

1948: M.I.T.'den Norbert Wiener Elektronik, Mekanik, ve Biyolojik sistemlerin denetim ve iletişimini inceleyen, "Sibernetik" başlıklı kitabı yayınladı.

1951: Raymond Goertz, ABD Atom Enerjisi Komisyonu için uzaktan işletilen (teleoperated) bir kol tasarladı.

1954: George Devol programlanabilir genel amaçlı robotu tasarladı ve patent başvurusunu yaptı.

1956: G. Devol ve Joseph F. Engelberger "Unimation Inc." isimli dünyanın ilk robot firmasını kurmuşlardır.

1958: Satış amaçlı ilk ticari robot üretildi.

1959: MIT’de servomekanizma laboratuvarında robot kullanılarak bilgisayar destekli üretim amaçlı bir gösteri yapıldı.

1959: Planet firması ilk genel amaçlı ticari robotu pazarlamaya başladı.

1960: Harry Johnson ve Veljko Milenkovic tarafından tasarlanan Versatran isimli robot pazarlanmaya başladı. Unimation robotlarının adı Unimate Robot sistemleri olarak değiştirildi.

1962: General Motors ilk kez bir endüstriyel robotu (Unimate), sıcak parçaları kalıp döküm makinasından alarak istiflemek amacıyla üretim hattında kullanmaya başladı.

1963: Bilgisayar denetimli, altı eklemlilik ilk yapay kol (Rancho arm) geliştirildi.

1964: Dünyanın önde gelen bazı üniversite ve araştırma merkezlerinde (M.I.T., Stanford Araştırma Enstitüsü, Stanford Üniversitesi, Edinburgh Üniversitesi) ilk kez Yapay Zeka araştırmaları başladı ve laboratuvarları açıldı.

1965: DENDRAL isimli ilk uzman sistem yazılımı geliştirildi.

1966: Nokta kaynağı yapan ilk robotlar üretildi.

1967: Japonya ilk kez robot ithal ederek robot teknolojisini kullanmaya başladı.

1968: Marvin Minsk tarafından on ayaklı ahtapot benzeri robot geliştirildi.

1968: Stanford Araştırma Enstitüsü tarafından Shakey isimli ve görme yeteneği olan ilk gezer robot üretildi [1].



Şekil 1.1 Shakey Robotu [2].

1970: Stanford Üniversitesi tarafından bir robot kol geliştirilmiş ve bu robot kol Stanford kolu adı ile araştırma projelerinde bir standart olarak yerleşti.

1973: Richard Hohn tarafından Cincinnati Milacron Corporation adına ilk mini-bilgisayar denetimli robot geliştirildi. Geliştirilen robot T3 (The Tomorrow Tool) olarak adlandırıldı.

1974: Stanford kolunu geliştiren Prof. Scheinman, Vicarm Inc. isimli bir firma kurarak mini-bilgisayar kullanan robot kollarının pazarlamasına başladı.

1974: Dokunma ve basınç duyucuları kullanarak küçük parçaların montajını yapabilen ilk robot, üretim hattında kullanılmaya başladı.



Şekil 1.2 Stanford Kolu [2].

1976: Viking 1 ve 2 uzay araçlarında robot kollar kullanıldı.

1977: ASEA isimli Avrupalı bir robot firması iki ayrı boyutta robot üretimine başladı [1].

1977: Star Wars sinema filmindeki C3PO ve R2D2 robot animasyonları ile robot kelimesi geniş insan kitlelerine yayıldı.

1978: PUMA isimli robot üretildi ve pazarlanmaya başladı.



Şekil 1.3 PUMA [3].

1979: Stanford Cart isimli gezer robot, üzerine monte edilmiş bir kameradan alınan görüntüleri kullanarak engellerle dolu bir odayı engelleri aşarak boydan boya geçti.



Şekil 1.4 Stanford Cart [3].

1984: SRI tarafından Shakey'den daha fazla gelişmiş bir gezer robot olan Lakey üretildi.

1990: ABD'de 12 dolaylarında, Japonya'daysa 40'dan fazla robot firması kuruldu.

1993-1994: Önceki robotlara göre ucuz maliyetli ERRATIC ve PIONEER 1 isimli gezer robotlar üretildi [1].



Şekil 1.5 Pioneer 1 [4].

1998: Robot oyuncak FURBY piyasaya çıktı.



Şekil 1.6 Furby [4].

1999: Sony yeni oyuncak ve ev hayvanı Aibo''yu piyasaya sürdü.



Şekil 1.7 Aibo [5].

2000: Honda, yeni humanoid (insansı) robotu Asimo''yu dünyaya tanıttı [1].



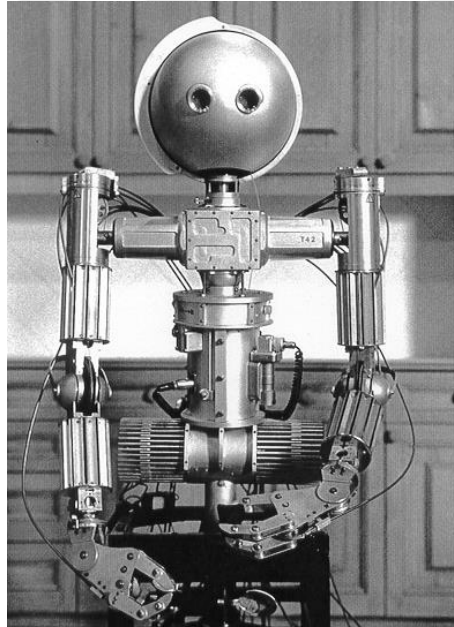
Şekil 1.8 Asimo [6].

1.3 Robot Teknolojisi ve Uygulamaları

Robot teknolojisi, bilimsel ve teknolojik olarak kolektif bir çalışmanın ürünüdür. Bu teknolojinin üretilmesinde ve uygulamasında sayılamayacak kadar çok kişi ve kurum katkıda bulunmuş, yine çok geniş bir yelpaze içinde tanımlanan tüm bilim ve mühendislik kolları bu gelişim süreci içinde ve değişik düzeylerde rol almıştır.

İnsan yaşamına benzeterek; robot teknolojisini emekleme çağını henüz yeni tamamlayarak, iki ayağı üzerinde sadece bir kaç adım atabilmiş küçük bir çocuk olarak düşünebiliriz. Böyle bir insan yavrusunun gelişerek erişkin bir insan olarak ulaşacağı düzeyi, günümüzde içinde yaşadığımız robot teknolojisi düzeyiyle karşılaştırırsak, bundan sonraki nesilleri nasıl bir teknolojinin beklediğini açıkça görebiliriz.

Bu teknolojik gelişim sürecinin içinde yaşamak, bu süreci gözlemlemek, bu ilk adımlardan yararlanmak gerçekten heyecan verici bir olgu. Bu heyecanı duyan ve yaşayan insanların robot teknolojisine gelecek yıllarda yapacakları daha yoğun ve verimli katkılar, önümüzdeki yıllarda tüm toplumların konfor ve güvenliğinde hissedilir önemli değişimlere neden olacaktır [1].



Şekil 1.9 Kellrob kablo kontrollü robot [7].

1.4 Robotların Sınıflandırılmaları

Robot teknolojisi uygulamaları çağdaş teknoloji kapsamında kısa örneklemler yapamayacak kadar çoğalmıştır. Bu uygulama konularının sınıflandırmasına yönelik yapılabilecek her tür sınıflandırmanın bazı konuları sınıflandırma dışında bırakması da çok olasıdır. Yine de tamamen gözleme dayalı çeşitli sınıflandırmalar verilmiştir.

1.4.1 Uygulama Konularına Göre Sınıflandırma

- a. Üretim otomasyonuna yönelik uygulamalar (tezgah ve makinalarının otomasyonu, fabrika içi otomasyon sistemleri ve tarımda otomasyon uygulamaları),
- b. Sağlık ve tıp ile ilgili uygulamalar,
- c. Silah ve savunma sistemleri,
- d. Güvenlik sistemleri,
- e. Çalışma koşullarının insan için uygun olmadığı çevrelerdeki (Uzay, Yangın, Petrol vb.) uygulamalar,
- f. Eğitim ve eğlence amaçlı uygulamalar.

1.4.2 Konumlarına Göre Sınıflandırma

- a. Gezer (Hareketli) robotlar (Gövde hareketli)
- b. Robot Kollar (Gövde sabit, kollar ve alt sistemler hareketli) [8].

1.4.3 Boyutlarına Göre Sınıflandırma

- a. Normal boyuttaki uygulamalar; 25 mm'den büyük robot ve makinalar
- b. Mini (robot) uygulamaları; 10 – 25 mm arasındaki boyutlardaki robot ve makinalar
- c. Mikro (robot) uygulamaları; 10 mm'den küçük robot ve makinalar

1.4.4 İşlevlerine Göre Sınıflandırma

- a. Gözlem yapan robot ve cihazlar
- b. İşlem yapan robot ve makinalar
- c. Gözlem ve İşlemi birlikte yapan robot ve makinalar

Yukarıda verilen sınıflandırmaları özetleyen ve yaygın uygulama konuları kümelenendirilerek verilen uygulama özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir. Bu tür sınıflandırmaların hiçbir zaman tüm uygulamaları kapsamadığını, eksik ve özel uygulamaların sınıflandırma dışı kalabildiği durumlar olabileceğini tekrar belirtmek gerekir [8].

Çizelge 1.1 Mekatronik teknoloji uygulama örneklerinin sınıflandırması [8].

Uygulama Grubu	Uygulama Örnekleri	Sabit konumlu	Gezer (Hareketli) Konumlu	Otomasyon Sistemleri	Gözlem ve Bilgilendirme	Eylem ve işlem	Normal Boyut	Mini Boyut	Mikro Boyut
Endüstriyel Robot ve cihazlar, Otomasyon Sistemleri	Otomatik üretim tezgahları ve hatları	●		●		●	●		
	Kaynak robotları		●			●	●		
	Boyama robotları		●			●	●		
	Montaj robotları	●		●		●	●		
	Makina sağlığı izleme	●			●		●		
	Çevre koşullarını izleme	●	●		●		●		
	Kalite kontrol robotları	●	●		●		●		
	Bakım robotları	●	●			●	●		
	Malzeme taşıma robotları		●		●		●		
	Depolama robotları	●		●	●	●	●		
Tıp ve Sağlık Sistemleri	Teşhise yardımcı cihazlar	●	●		●		●	●	●
	Protezler				●		●	●	●
	Tedaviye yardımcı robotlar	●	●		●	●	●	●	●
Savunma Uygulamaları	Patlayıcı taşıyan robot ve Uzaktan Kumandalı Makinalar		●			●	●		
	Silah nitelikli robotlar		●		●		●		
	Gözlem robotları	●	●		●		●	●	
	İmha robotları		●				●		
Tarım Endüstrisi	Hasat robotları		●			●	●		
	Tarım ürünlerini işleme robot ve makinaları	●		●		●	●		
	Ürün sınıflandırma sistemleri	●			●		●		
	Kalite denetleme sistemleri	●			●		●		
Eğitim ve Eğlence	Eğitim robotları ve ukm	●	●			●	●	●	
	Araştırma robotları ve ukm	●	●		●		●	●	
	Eğlence sistemleri ve ukm	●	●		●		●		
Diğer çeşitli uygulamalar	Kurtarma robotları ve ukm		●		●	●	●		
	Yangın söndürme robotları ve ukm		●		●	●	●		
	Duvar tırmanan robotlar ve ukm (Yangın, boyama, kaynak, gözlem vb. İşler için)		●		●	●	●		
	Su altı robotları ve ukm (Gözlem, arkeoloji, kurtarma, tamir, bakım, boyama vb. İşler		●		●	●	●		
	Maden kazaları ve deprem sonrası kurtarma robotları ve ukm		●		●	●	●		
	Radyoaktif ve zehirli ortamlarda çalışan robot ve Uzaktan Kumandalı Makinalar		●		●	●	●		

1.5 Tezin Konusu

Sanayide çok geniş bir kullanım alanına sahip endüstriyel robotlar genellikle açık kinematik zincirli robotlardır, dönel ve prizmatik mafsallarla birbirlerine seri bağlı uzuvlardan oluşurlar. Açık kinematik zincirli robot kollar basit yapılı olmalarına rağmen, yetersiz mekanik rijitliğe sahiptirler. Kapalı kinematik zincirli robot kollar ise açık kinematik zincirli olan robot kollara göre yüksek mekanik rijitliğe, direkt tahrik kolaylığına, daha düşük pozisyon hatasına ve güç gereksinimine ve iyi kuvvet-hız karakteristiğine sahiptirler. Son zamanlarda robot teknolojisinin çok gelişmiş olmasına rağmen, yine de çözülmesi gereken bazı problemleri bulunmaktadır. Ağır ve yüksek hızlı çalışma koşullarında robot kollar yapıları gereği performanslarını azaltan istenmeyen elastik davranışlar sergileyebilirler. Bu işletme koşulları, robot kolun yapısı üzerinde istenmeyen titreşim problemlerine de neden olabilir ve sistemin performansı bundan çok olumsuz bir şekilde etkilenebilir. Robot kolların yüksek hassasiyette ve problemsiz çalışmaları; manipülatörleri oluşturan elemanların çalışma esnasında meydana gelen, kalite ve performanslarını önemli ölçüde etkileyen titreşimlerin azaltılmalarına bağlıdır. Bu titreşimlerin azaltılabilmesi için robot kolların dinamik karakteristiğinin tam olarak anlaşılması gerekir. 2R robot kolun hareketlerinin dinamik denklemleri, Lagrange-Euler formülasyonları ile sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjileri yardımıyla elde edilmiştir. Lineer dinamik titreşim absorberleri ön ve arka kola önce teker teker, daha sonra da her ikisine birden konularak seçilen parametreler yardımıyla, 2R robot kolun dinamik davranışları ve kinematik performansı deneysel ve teorik çalışmalarla incelenmiştir.

1.6 Tezin Amacı

Tasarımı ve üretimi yapılan iki dönebilen mafsallı (2R) robot kol üzerinde çalışılmıştır. Robotun arka koluna dengeleme yayı bağlanarak yerçekiminden kaynaklanan potansiyel enerji dengelenmiştir. 2R robot kolun hareket denklemleri, sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjileri yardımıyla Lagrange-Euler formülasyonları kullanılarak elde edilmiştir. Sistemde ağırlık kuvvetlerinin dengelendiği ve lineer titreşim teorisine göre çok küçük titreşimler olduğu varsayılmıştır. Robot kolun kararsız davranışları belirlenerek bu kararsız davranışları ortadan kaldırmak üzere dinamik titreşim absorberi uygulaması yapılmıştır. Arka koluna dengeleme yayı eklenen sistem ile dengeleme yaysız ana sisteme lineer dinamik titreşim absorberleri eklenmiştir. Lineer dinamik titreşim absorberleri, ön ve

arka kola farklı iki konumda önce teker teker daha sonra her iki kola birden konularak seçilen parametreler yardımıyla, 2R robot kolun dinamik davranışları ve kinematik performansı incelenmiştir. Sistemin hareket denklemleri, Mathcad matematiksel programı yardımıyla çözdürülerek robot kolların konum ve hızları elde edilmiştir.

2R robot kolda arka kola bağlanan dengeleme yayı ile ön ve arka kola farklı konumlarda bağlanan lineer dinamik titreşim absorberinin sistemin dinamik performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda sisteme absorber eklenmeden önce arka kola dengeleme yayı eklenmiş ve dengeleme yayının ön kol ve arka koldaki titreşime etkileri de incelenmiştir. Sisteme dengeleme yayı eklenmeden sırasıyla arka kolun orta ve üst konumlarına daha sonra ön kolun orta ve üst konumlarına ve her iki kolun üst konumlarına absorber eklenerek dinamik titreşim absorberinin sistemin titreşimi üzerindeki etkileri de ölçülmüştür. Ayrıca dengeleme yaylı sistemde, ön ve arka kolda absorberin aynı anda kullanılmasının sistemin dinamik karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak ölçülmüştür.

Bu çalışmada, teorik ve deneysel analizlerle elde edilen sonuçlardan yararlanılarak sistemde var olan titreşimlerin minimize edilmesi ve dinamik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

1.7 Literatür Özetleri

Bisu C., Cherif M., Gerard A., K'Nevez J.Y.,(2011), 6 eksenli KUKA endüstriyel robot koldaki dinamik davranışları üç aşamada incelemişlerdir. Birinci aşamada robotun lineer hareketlerinde frekanstaki değişimleri incelemişlerdir. İkinci aşamada dönme hızıyla birlikte dinamik titreşim analizini yapmışlardır. Üçüncü aşamada ise frezeleme işlemi esnasında oluşan titreşimlerin analizlerini yapmışlardır. Sonuç olarak robotun çalışma uygulamalarındaki konum ve kesici takım merkezlenmesinin önemi hakkında çıkarımlarda bulunmuşlardır [9].

Frederick F., kitabında; robot çeşitleri, robot kinematiği, robot dinamiği, robotların matematiksel modellemesi gibi robot mekaniğinin temellerini oluşturan konuları içeren değerli bilgiler verilmiştir [10].

Şahin İ., Yalvaç M., Bu çalışmada elektrik, elektronik, bilgisayar ve makine alanında lisans seviyesinde okutulan birçok derste örnek ders materyali olarak kullanılabilecek bir mobil robot prototipi tasarlamışlardır [11].

Kandemir G., Bu çalışmada, elektromiyogram (EMG) tabanlı insan makine ara yüzü (İMA) sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem EMG sinyallerini toplayıp işleyerek robot kolun kontrolü için gerekli komutları üretmiştir [12].

Alp O, Bu çalışmada üç eksen ve bir adet tutucuya sahip bir robot manipülatör ve robot manipülatöre insansı el hassasiyeti kazandırmak amacı ile ivmeölçer sensörlerden gönderilen komutlarla yönlendirilen, mikroişlemci ailesinden PIC ile kontrol edilen servo motor sürücü kartı tasarım çalışmasını ortaya koymaktadır [13].

Savaş Y., Bu çalışmasında adım motorları kullanarak mikro denetleyicilerle kontrol edilebilen bir robot tasarlamıştır [14].

Namlı C., Bu çalışmada genel uzuv tiplerinden farklı olarak eğri uzva sahip ve bütün eklemleri döner tip olan bir manipülatörün kinematik ve dinamik denklemleri hesaplayarak kinematik ve dinamik analizlerini yapmıştır [15].

Caner O., Bu çalışmasında manipülatörün izlediği yörünge boyunca sistem parametreleri güncelleyerek kutup yerleştirme işlemi yapan bir bilgisayar programı yazılmış, robot eklemlerinde kullanılan doğru akım motorları üzerinde akım sınırlama operasyonu yapılarak, daha hafif ve ucuz motorlarla yüksek dönme momentlerinin elde edilebileceği simülasyonlarla gösterilmiştir [16].

Çelik S., Bu çalışmasında iki serbestlik dereceli düzlemsel koordinatlarda hareket kabiliyeti olan, step motor ile tahrikli bir robot kolunun mekanik ve elektronik aksamalarının dizaynı yapılmıştır [17].

Kojima H., Hayakawa T., Tanaka T., KamiyamaA., Bu çalışmalarında üç eklemlili robotlarda teorik olarak titreşim analizi yapmışlardır [18].

Gattringer, H., Kilian F. J., Höbarth, W., Bremer H., Bu çalışmalarında hızlı lineer harekete sahip robotlarda titreşim azaltılması üzerinde çalışmışlardır. Ritz tekniği ile robot hareketinin dinamik denklemleri hesaplayarak geri besleme döngüsüne sahip matematiksel model oluşturmuşlardır [19].

Xu, F., Jiang, G., Wang, L., Wang, X., Bu çalışmalarında; halat kontrolü yapan robotlardaki dinamik analizler yapılmıştır. Çalışmada robotun doğal frekansı sayısal yöntemlerle hesaplanmış ve titreşimi incelenmiştir [20].

Hiroyuki K., Akihiro M., Katsuhiro K., Toshio K., Bu çalışmalarında; düşen çelik bir küreyi yakaladıktan sonra esnek kollu bir robotta oluşan titreşimin minimize edilmesi optimum parametreler ile geri beslemeli bir kontrol yöntemi kullanmışlardır [21].

Boz M., Bu çalışmasında Huang ve Milenkoviç tarafından sınıflandırılan on altı adet temel endüstriyel robotun eklem düzenleşimi ve katı gövde yapılarını vermiş ve bu robotların dinamik denklemlerini Lagrange-Euler ile Newton-Euler yöntemlerini kullanarak elde etmiştir [22].

Kucuk, S., Bingul, Z., Endüstriyel robotların modellenmesi, kontrolü ve kinematiği üzerine çalışmışlardır [23].

Herman, H., Robotların modellenmesi ve simülasyonu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında robotların hareket denklemlerini çıkarmış ve eklemlerdeki hareketlerin simülasyonunu yaparak çıkarımlarda bulunmuştur [24].

2. TİTREŞİM

Kütle ve elastisite şartlarına haiz mühendislik sistemleri izafi hareket yapabilirler. Eğer böyle bir sistemin hareketi verilen zaman aralığından sonra tekrarlanıyorsa böyle bir hareket titreşim olarak tarif edilir. Genel halde titreşim istenmeyen ve lüzumsuz bir enerji halidir. Bilhassa makinalarda gürültü yapması, parçaları kırması ve istenmeyen kuvvetleri iletmesi bir gerçektir [25].

2.1 Temel Kavramlar

Titreşim analizi yapabilmemiz için öncelikle mekanik titreşimlerle ilgili temel kavramları bilmemiz gerekir. Bu temel kavramlar bir titreşim hareketini tanımlayabilmemiz için gereklidir [26].

2.1.2 Periyot

Titreşim sinyalinin bir tam tekrarının kaç saniyede geçtiğinin ölçüsüdür. Birimi saniye veya saniyenin alt katları cinsinden ifade edilebilir. Örneğin bir titreşim hareketi kendini 15 sn'de tekrarlıyorsa bu hareketin periyodu 15sn'dir denir.(T) ile gösterilir [26].

2.1.2 Frekans

Bir titreşim hareketinin birim zamandaki tekrar sayısıdır. (f) ile gösterilir. Titreşim terminolojisinde frekans üç değişik birimle ifade edilir,

- a. Titreşim hareketinin bir saniye süre içinde tekrarlanma miktarı: Birimi Hertz(Hz) veya CPS(Cycles Per Second)'tir.
- b. Titreşim hareketinin bir dakika süre içinde tekrarlanma miktarı: Birimi CPM(Cycle Per Minute)'dir. $CPM/60=CPS=Hz$ eşitliği vardır.

Titreşim hareketinin o harekete neden olan birincil hareketin dönme devrinin hangi katlarında(çarpanlarında) meydana geldiğinin ölçüsü: Birimi, Kat(orders) olan bu bağıl hareket, titreşimin ölçüldüğü yatak içinde dönen milin dönüş devri katlar ile titreşim hareketinin tekrarlanma frekanslarının çakışıp çakışmadıklarını ifade eder. Örneğin rulman elemanlarında oluşan titreşim hareketleri kendini dönme devrini hesaplanabilen bir katı cinsinden belli eder [26].

2.1.3 Açısal Frekans

Dönme hareketi yapan bir cismin birim zamanda kat ettiği yolun (taradığı açının) radyan açı derecesi cinsinden değeridir. Birimi rad/s olup ω ile gösterilir. Açısal frekans, 2π saniyedeki titreşimlerin sayısı olarak tanımlanır.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad [2.1]$$

2.1.4 Faz

İki olay arasındaki, referans veya başlangıç noktasına bağlı olan aralıktır. Olay veya hareketlerden birinin diğerine göre ne kadar önce veya sonra meydana geldiğinin ölçüsüdür. Birimi açı birimidir (derece veya radyan). 0-360 derece ve ya 0- 2π radyan arasında değerler alır.

2.1.5 Genlik

Titreşimin şiddetini ifade eder. Genlik; titreşim eğrisi üzerindeki 0 noktası ile en üst nokta arasındaki mesafe ile (peak), +/- iki tepe arasındaki mesafe ile (peak to peak), ortalama değer ile (average), RMS (Root Mean Square: Bir hareketin iki zaman aralığında aldığı değerlerinin karelerinin ortalamasının kareköküdür.) değerleri ile ifade edilebilir. Bu değerler arasında aşağıdaki dönüşümler vardır:

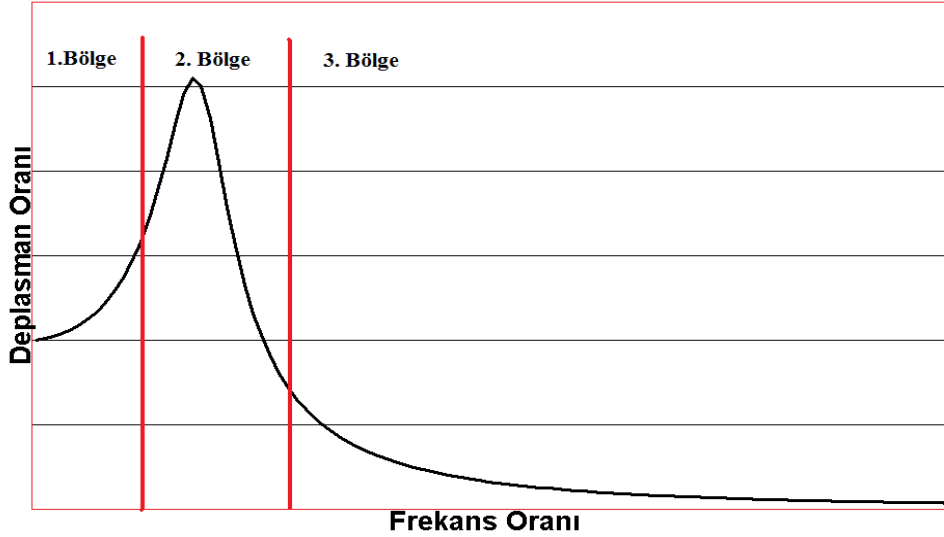
$$\text{peak to peak}(p-p)=2 \times \text{peak}(p), \text{RMS}=0,707 \times p, \text{ortalama(average)}=0,637 \times p$$

2.1.6 Deplasman

Bir kuvvetin etkisi altındaki kütle, sıfır noktasına veya belli bir referans noktasına göre ötelenmesi sonunda kat ettiği yol veya yer değiştirme miktarıdır. (X) ile gösterilir. Birimi mm, μm ve inch cinsindendir

2.1.7 Hız

Birim zamanda alınan yol veya deplasmanın genliğinin zamana göre değişimidir. Hızın aldığı değer, eğrinin x eksenini kestiği noktalarda maksimum, tepe noktalarında ise sıfırdır. Bu da deplasman ile hız arasında 90 derecelik bir faz farkı olduğu anlamına gelir (Deplasman hızdan 90 derece ileridedir.). (V) ile gösterilir. Birimi mm/s, $\mu\text{m/s}$ ve inch/s cinsindendir. Dönen bir milin rezonansa geldiği dönme hızına, kritik hız adı verilir. Bu hızda kütle, sahip olduğu dengesizliğin etkisi maksimumdur. Bu nedenle normal çalışma devirlerinin kritik hız ile çakışmamasına özen gösterilir. Aşağıdaki şekilde az sönümlü bir sistem ile ilgili çalışma bölgeleri gösterilmektedir [26].



Şekil 2.1 Çalışma bölgeleri [26].

Şekil 2.1 de az sönümlü bir sistemin deplasmanı ile frekansı arasındaki ilişki verilmektedir. Birinci bölgede hız düşük olduğundan deplasman da düşüktür. İkinci bölgeye gelindiğinde hız çok artmamasına rağmen genliklerin aşırı bir artışı görülür. Bunun nedeni sistemin kritik hızına veya rezonans frekansına yakın oluşumuzdur. Üçüncü bölgede ise yüksek hıza rağmen düşük genlik görülür. Bu sebeple düşük hızlı makinalarda 1. bölgede, yüksek hızlılarda ise 3. bölgede çalışmalıyız ve 2. bölgeden olabildiğince hızlı geçmeliyiz [26].

2.1.8 İvme

Birim zamanda hızda meydana gelen değişiklik veya hızın değişim oranındaki değişikliktir. İvmenin aldığı değer tepe noktalarda maksimum, eğrinin x eksenini kestiği noktalarda ise sıfırdır. Bu da ivme ile deplasman arasında 180 derecelik, ivme hız arasında da 90 derecelik bir faz farkı olduğu anlamına gelir. Birimi G's, mm/s², µm/s², inch/s² cinsindendir. Burada G yerçekimi ivmesi sabiti olup değeri; $386 \frac{inch}{s^2} = 9,8 \frac{m}{s^2}$ dir. (a) ile gösterilir.

Bu üç parametre, sinüs eğrisinin çizdiği alanın;

- RMS değeri ile,
- Ortalama değeri ile,
- Peak değeri ile,
- Peak-Peak değeri ile tanımlanabilir. Trend izlemek amacıyla bir standart oluşturabilmek için deplasman ölçümleri peak-peak, hız ölçümleri peak, ivme ölçümleri RMS cinsinden ifade edilmektedir.

Deplasman, hız ve ivme matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\text{Yer de\u0131i\u015ftirme(deplasman): } X(t) = X.\sin(\omega t) \quad [2.2]$$

$$\text{Hız: } V(t) = dX/dt = X.\omega.\cos(\omega t) \quad [2.3]$$

$$\text{İvme: } a(t) = dV/dt = -X.(\omega^2).\sin(\omega t) \quad [2.4]$$

Bu form\u00fclleri s\u00f6zle ifade etmek gerekirse, deplasmanın zamana g\u00f6re t\u00fcrevi hızı, hızın zamana g\u00f6re t\u00fcrevi ivmeyi verir [26].

2.1.9 Do\u011fal Frekans

Sistemin kendi haline bırakılması sonucunda, s\u00fcr\u00fct\u00fcms\u00fcsz serbest titre\u015fimi esnasındaki frekansdır [25].

2.1.10 Rezonans

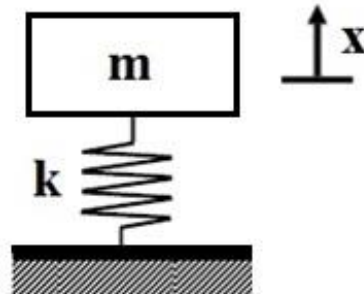
Tatbik edilen d\u0131\u015f kuvvetin frekansının, sistemin tabii frekansına e\u015fit oldu\u011fu zaman rezonans meydana gelir. Rezonans oldu\u011fu zaman sistemin amplit\u00fcd\u00fc sınırsız olarak artacak ve bu olay ancak sistemde s\u00f6n\u00fcm olması halinde kontrol edilebilecektir. B\u00f6yle bir durumda, titre\u015fim sisteminin denge konumundan uzakla\u015fmasının \u00e7ok artması ve meydana gelecek istenmeyen olaylardan sakınmak i\u00e7in, sistemin tabii frekansı bilinmeli ve ona g\u00f6re kontrol edilmelidir [25].

2.2 Titre\u015finin Sınıflandırılması

Titre\u015fim a\u015fa\u011fıdaki \u015fekilde sınıflandırılabilir.

2.2.1 S\u00f6n\u00fcs\u00fcsz ve s\u00f6n\u00fcmli titre\u015fimler

Sistemde s\u00fcr\u00fct\u00fcme veya benzeri diren\u00e7ler sebebi ile enerji kaybı ve s\u00f6n\u00fcm\u00fcne sebep olacak bir etkinin olmadı\u011fı durumlarda meydana gelen titre\u015fimler s\u00f6n\u00fcs\u00fcsz titre\u015fimler olarak adlandırılır [27].

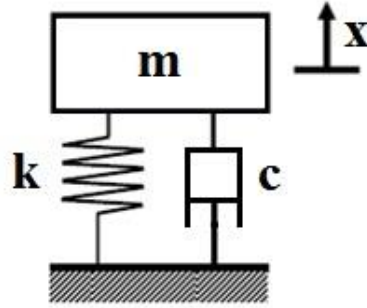


Şekil 2.2 S\u00f6n\u00fcs\u00fcsz serbest titre\u015fim.

E\u011fer sistemde s\u00fcr\u00fct\u00fcme ve diren\u00e7ler dolayısıyla s\u00f6n\u00fcm olayı varsa sistemdeki salınım yavaşlayacak ve duracaktır. E\u011fer \u015fidetli bir s\u00f6n\u00fcm varsa bu durumda

sistemde salınım olmayacaktır. Bu haldeki sistem fazla sönümlü sistem olarak tanımlanır. Eğer hafif bir sönüm varsa sistemde salınım olacaktır ve bu tip sistemlere az sönümlü sistemler denilir. Bu iki halin sınırında kalan durumdaki bir sistemde kritik sönüm halindeki sistem denir. Serbest bırakılan kütle basitçe statik denge durumuna dönecektir.

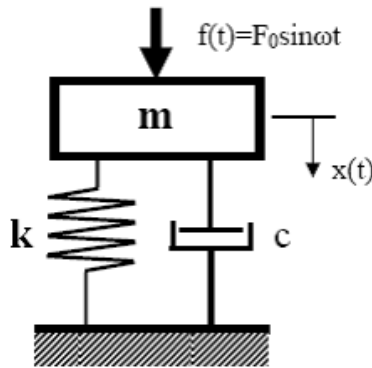
Kütlenin hızıyla orantılı olarak kuvvet üreten viskoz bir sönümleyicinin bulunduğu sistemler ise sönümlü titreşim sistemleri olarak adlandırılır. Sönümleme viskoz olarak adlandırılmaktadır çünkü bir akışkanın içindeki bir objeyi modellemektedir. Orantı sabiti “c” sönüm katsayısı olarak adlandırılır ve kuvvet/hız birimindedir [27].



Şekil 2.3 Sönümlü serbest titreşim.

2.2.2 Serbest ve zorlanmış titreşimler

Eğer sistem ilk şartlar neticesinde titreşiyor ise ($t > 0$ için sisteme etki eden dış zorlama yok) sistem titreşimlerine serbest titreşim adı verilir. Eğer sistem dış zorlama etkisi ile titreşiyor ise oluşan titreşimlere zorlanmış titreşim adı verilir [27].



Şekil 2.4 Zorlanmış kuvvetle sönümlü sistem [27].

2.2.3 Lineer ve lineer olmayan (nonlinear) titreşimler

Eğer titreşim yapan sistemin tüm bileşenleri doğrusal (lineer) davranışa sahip ise oluşan titreşimlere lineer titreşim adı verilir. Eğer sistem elemanlarından herhangi biri doğrusal olmayan davranışa sahip ise oluşan titreşimlere lineer olmayan (nonlinear) titreşim adı verilir. Bu tip sistemlerin hareketini ifade eden diferansiyel denklemler lineer olmayan formdadır. Birçok titreşim sistemi, büyük titreşim genlikleri için lineer olmayan davranışa sahiptir [27].

2.3 Titreşim Analizi

Titreşim hareketi, düzenli aralıklarla tekrarlanan, periyodik bir yer değiştirme aksiyonudur. Bu titreşim hareketinin nasıl yorumlanacağı aşağıda sıralanan grafiklerde detaylı olarak anlatılmıştır.

2.3.1 Dalgaform Grafiği

Birbirine karışmış çoklu sinyal grubunu genlik-zaman ilişkisi içinde gösterildiği grafiklerdir. Bu grafiklerdeki desenler çeşitli mekanik ve elektriksel arızaların tespitinde kullanılır. Problemlerin özelliklerine göre, dalgaform grafiğinde değişik desenlerin oluşmasına neden olurlar. Örneğin, titreşim genliği hız birimi cinsinden seçilirse; saf sinüs eğrisi balanssızlık işaretidir. Piklerin her periyotta eşit sayıda olmaması, mekanik gevşeklik belirtisidir. Genlik skalası ivme birimi cinsinden seçilirse; melek balığı deseni, rulman arızası belirtisidir [28].

2.3.2 Spektrum Grafiği

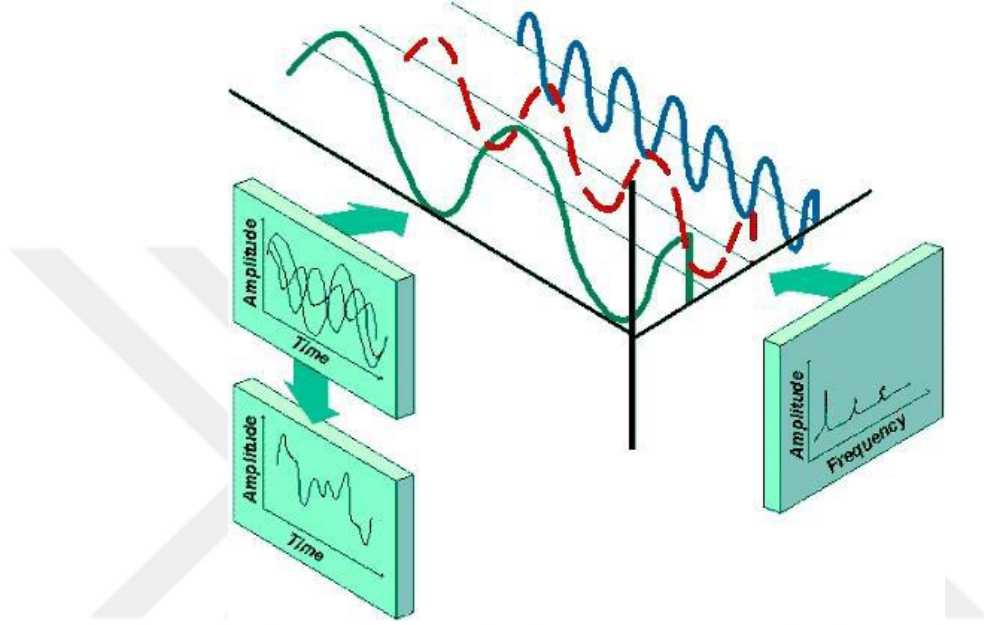
Dalgaform grafiğinin bir dizi matematiksel işleme tabi tutulması sonunda hesap yoluyla elde edilmiş sanal bir grafiklerdir. Bu grafikte titreşim sinyali genlik/frekans bazında gösterilir. Uygulanan matematiksel işlemin adı ise FFT(Fast Fourier Transform)'dir [28].

FFT esas olarak istatistik tabanlı matematiksel bir çevrimdir. Karışık titreşim sinyalleri yumağını ayırıştırır ve hangi frekansta ne şiddette bir titreşimin mevcut olduğunu gösterir. Yapılan işlem dalgaform grafiğindeki tekrarlanan sinyallerin frekanslarına göre ayırıştırılarak frekans/genlik grafiğinde gösterilmesidir. Bu sayede dalgaform grafiğine göre daha kolay anlaşılabilir bir grafik elde edilmiş olur.

FFT tekrarlanmayan sinyalleri dikkate almamakta ve onları yok saymaktadır. Bir başka ifade ile karışık bir sinyaller kümesi içinden periyodik olanları belirleyerek onları harmoniklerine ayırmaktadır.

Spektrum grafiğinde görülen her tepeciğin, makinenin dinamik özelliklerinden kaynaklanan bir vericisi vardır. Bu verici noktayı belirleyebilmek makinenin fiziksel özelliklerini ve mekanik yapısını bilmekle mümkün olabilir. Ancak bu suretledir ki makine üzerindeki hangi elemanın böyle bir titreşim sinyalini üreteceği kestirilebilir.

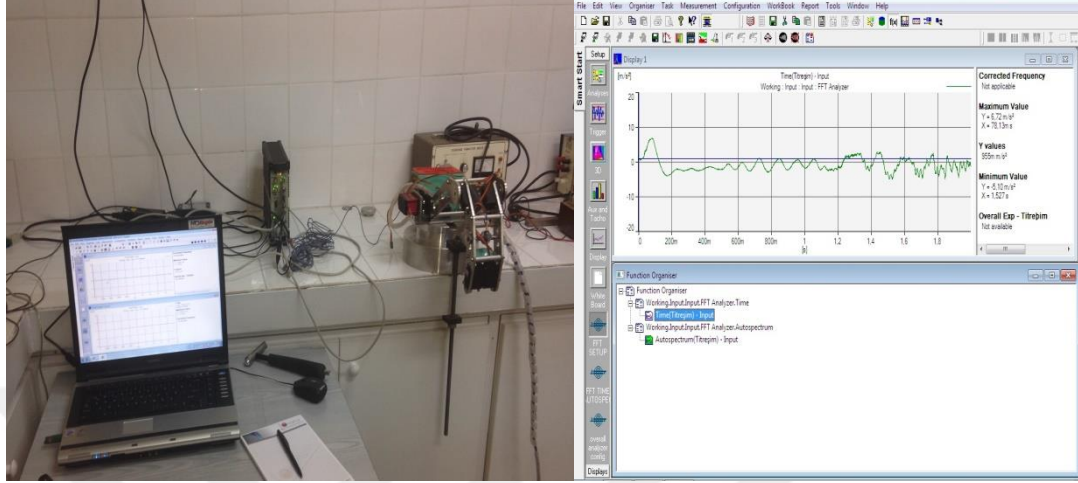
Bir titreşim sinyalinin genlik/zaman/frekans ilişkisi ve üç boyutlu FFT çevrimi aşağıda görülmektedir [28].



Şekil 2.5 FFT çevrimi [29].

2.4 Titreşim Analiz Cihazı

Bu çalışmada deneysel titreşim analizleri Şekil 2.6 da gösterilen titreşim cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.6 Titreşim analiz cihazı ve arayüzü.¹

¹ Deneysel çalışmalar Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Titreşim Laboratuvarı'nda bulunan Brüel & Kjaer firmasının ürettiği pulse titreşim analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır.

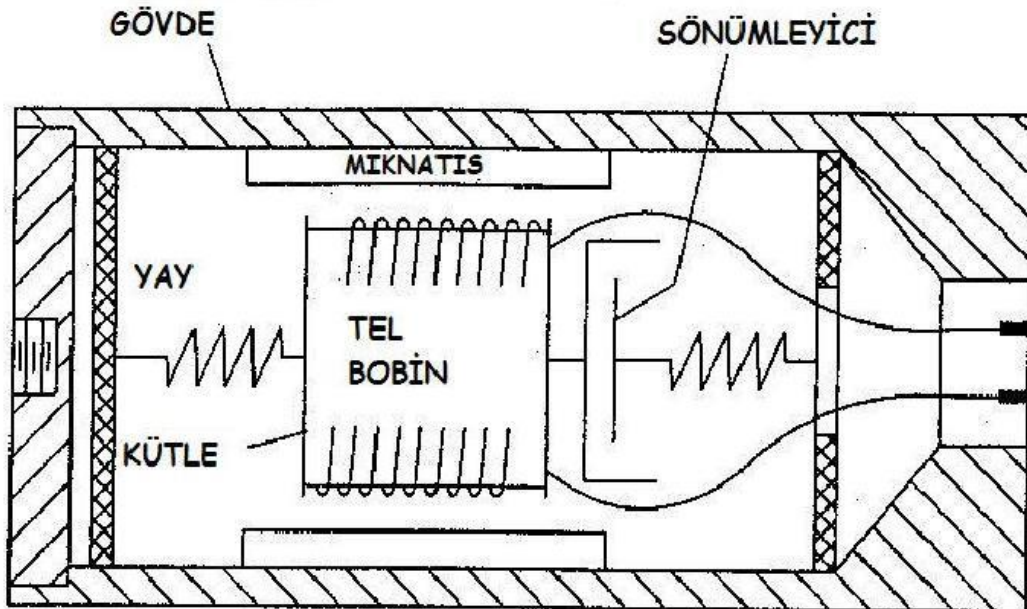
2.4.1 Titreşim Ölçerler

Titreşim, ölçümü yapılacak olan makinenin gövdesi üzerinden ve yataklarına en yakın yerden alınacak olan titreşimler algılayıcılar aracılığıyla ölçülür. Bu algılayıcılar makinenin gövdesinden aldığı titreşim enerjisini elektrik enerjisine ya da voltaja çevirmeyi sağlar [30].

Bunlar; hız ölçerler (Velocity Transducers), ivme Ölçerler (Accelerometers) ve deplasman ölçerler olarak adlandırılırlar. Her bir algılayıcı tipinin belirli uygulamalar için farklı avantajları ve sınırları bulunmaktadır. Tek bir algılayıcı tüm ölçüm ihtiyaçlarını karşılaması beklenemez. Herhangi bir uygulama için göz önünde bulundurulması gereken en önemli maddelerden birisi ise uygulama için en uygun algılayıcı seçilmesidir.

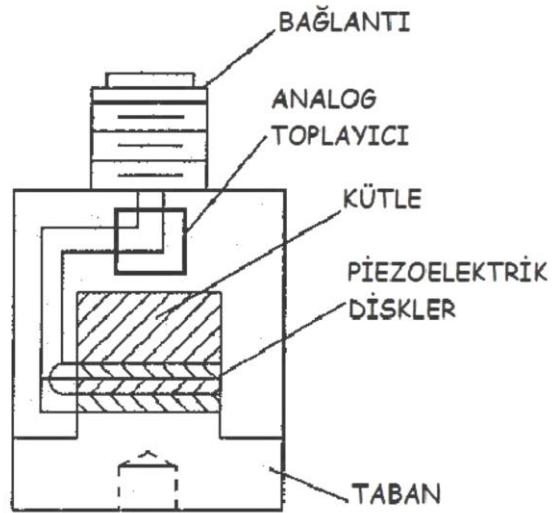
2.4.2 Hız Sensörü

Hız birimli ölçüm alan sensörleridir. Ölçüm, sensörün içinde bulunan yay ve damper ile modellenen mıknatıs kütle, makine gövdesi üzerinde dokundurulduğu yerdeki titreşime bağlı olarak yapılır. Bobin, oluşan manyetik alanın içerisinde hareket ettiğinde bobin uçları arasında gerilim oluşur ve bu gerilim akım cinsinden hareketliliği elektriksel sinyale dönüştürür [30].



Şekil 2.7 Sismik hız sensörü görünümü [31].

Sismik ve piezoelektrik hız sensörleri olmak üzere iki tiptir. Kullanım yerlerine ve ölçüm yapılacak makinenin frekansına göre farklı yerlerde kullanılırlar.

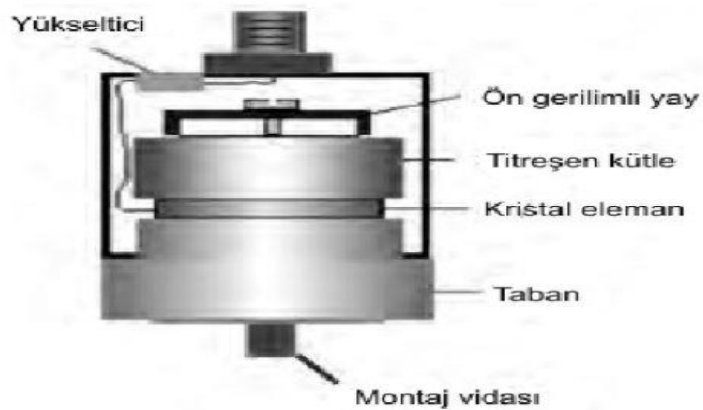


Şekil 2.8 Piezoelektrik hız sensörü görünümü [31].

2.4.3 İvme Sensörü

İvme ölçer algılayıcı titreşim ölçümlerine yaygın olarak kullanılan sensörlerdir.

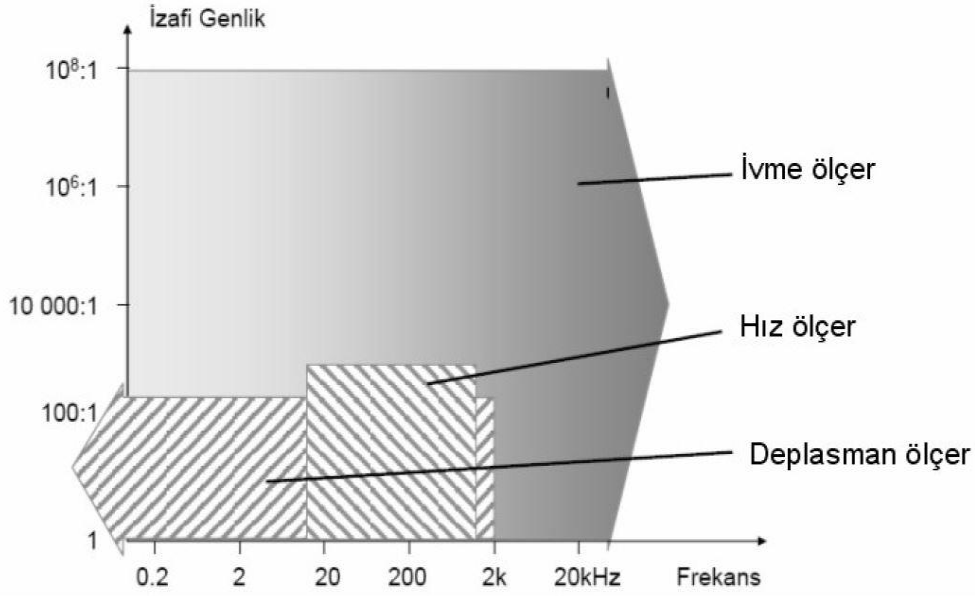
Bakıma gerek duymayan, hafif, geniş aralıklardaki frekanslara cevap verebilen sensörlerdir . Bu sensörlerin çalışmalarını ve hassasiyetlerini etkileyen bazı değerler mevcuttur. Bunlar voltaj hassasiyeti (mV/g), frekans (Hz) ve ağırlıktır. Hız sensörlerine oranla daha ucuz ve daha geniş frekans aralıklarına cevap verebildikleri için sıklıkla tercih edilirler [30].



Şekil 2.9 İvme sensörü [30].

2.4.5 Deplasman Sensörleri

Bu sensörler hız ve ivme sensörleri gibi mutlak olarak titreşim değerini değil, ölçüm noktasına göre şaft titreşimini ölçerler. Özel ucu sayesinde mili görecekte şekilde sabitlenen sensör, ucundaki manyetik alan değişimleri yardımıyla milin titreşim bilgisini verir. Deplasman birimiyle ölçüm alır [30].



Şekil 2.10 Titreşim ölçerlerin çalışma frekans aralıkları [30].

Şekil 2.10 da görüldüğü gibi titreşim ölçerler arasında en geniş ölçüm frekansına sahip olan sensör tipi ivme ölçerdir.

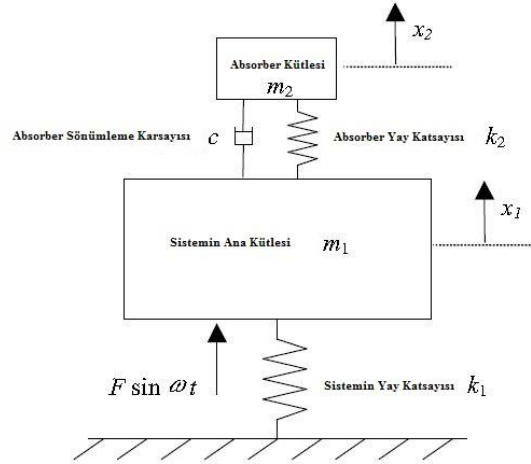
3. DİNAMİK TİTREŞİM ABSORBERİ

Titreşen sistemler, tabii frekansları civarında bir uyarım aldıklarında, rezonans denilen ve dikkate alınmadığında sistemin stabilitesini önemli şekilde etkileyecek bir olguyla karşı karşıya gelirler. Rezonans halinde, sistemin doğal frekansı uyarı frekansı ile çakışır ve titreşimin genliği giderek artar. Bir önlem alınmadığında, genlik düzeyleri sistemin limit değerlerini aşarak bir süre sonra beklenmedik bir şekilde sistem bileşenlerinin yorulma hasarına uğramasına neden olabilir. Bu nedenlerden dolayı titreşime maruz kalacak yapıların tasarımında, rezonans olgusu mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Rezonans halindeki sistem için ilk yaklaşım, sistemin tabii frekansını ya da uyarım frekanslarını değiştirmektir. Sistemin tabii frekanslarını belirleyen temel girdiler, sistemin etkin kütlesi ve esnekliğidir ve eğer mümkünse çeşitli tasarım değişiklikleri ile bu durum giderilebilir. Ancak sistem üzerinde bir değişiklik yapılamadığı durumlarda dinamik absorber denilen, titreşen ek sistemler kullanılır. Dinamik absorberler, birincil bir ana sisteme, titreşen başka bir alt sistem ilave ederek ana sistemin titreşim seviyelerini indirmek amacıyla kullanılan alt sistemlerdir. Dinamik absorber kullanımındaki temel amaç ana sistemin doğal frekansının tahrik frekansına eşit ya da çok yakın olduğu ve bunlardan biri üzerinde değişiklik imkanının da olmadığı durumlarda, rezonans durumunu ortadan kaldırmaktır.

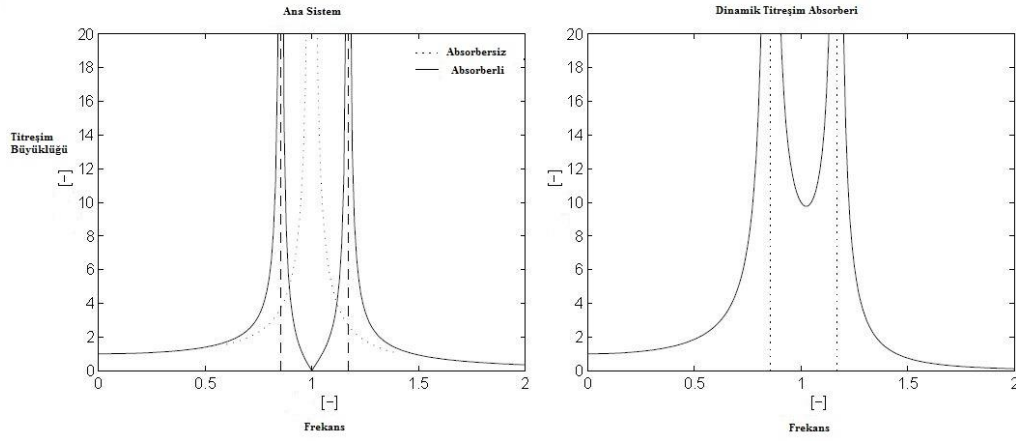
Dinamik titreşim absorberleri sönümlü ve sönümsüz titreşim absorberleri olmak üzere ikiye ayrılır [26].

3.1 Sönümsüz Dinamik Titreşim Absorberi

Titreşen sisteme eklenen bir kütle ve yaydan oluşan, dinamik titreşim absorberinin en basit şeklidir. Bu absorberler periyodik kuvvet altındaki sabit frekanslı sistemler için çok kullanışlıdır. Şekil 3.1 de dinamik titreşim absorberi sönümsüz iken sönümleme katsayısı c sıfırdır [26].



Şekil 3.1 Şematik olarak dinamik titreşim absorberinin sisteme eklenmesi [33].

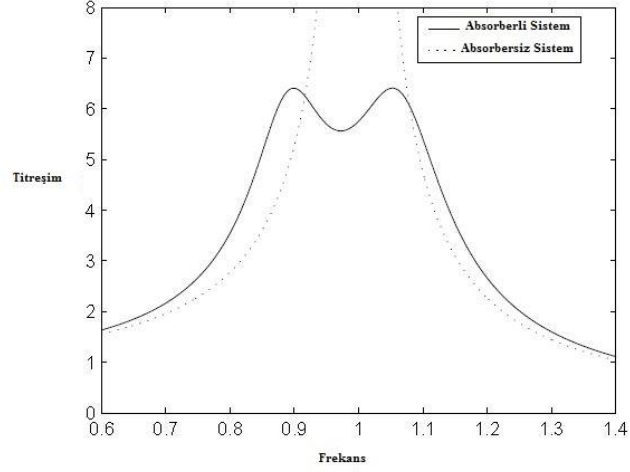


Şekil 3.2 Ana sistem ve dinamik titreşim absorberinde titreşim büyüklüğüne bağlı frekans değişimi [32].

Ana sistemin kütlesi ile dinamik titreşim absorberinin kütleleri oranına bağlı olarak, sistemin rezonans frekansının öncesinde ve sonrasında olmak üzere iki yeni rezonans frekansları oluşmaktadır. Bu oran sisteme eklenecek dinamik titreşim absorberi belirlenirken önem arz etmektedir. Şekil 3.2 de verilen sağ taraftaki şekil, dinamik titreşim absorberinde meydana gelen titreşim büyüklüğünü frekansa bağlı olarak göstermektedir [33].

3.2 Sönümlü Dinamik Titreşim Absorberi

Dinamik titreşim absorberi sönümleme katsayısı sıfırdan büyük bir sönümleyici ile desteklendiğinde oluşan sisteme sönümlü dinamik titreşim absorberi denir. Sönümleyici eklendiğinde frekansa bağlı olarak titreşimde azalma gözlenir [26].



Şekil 3.3 Sönümlü dinamik titreşim absorberinin sistemdeki etkisi [32].

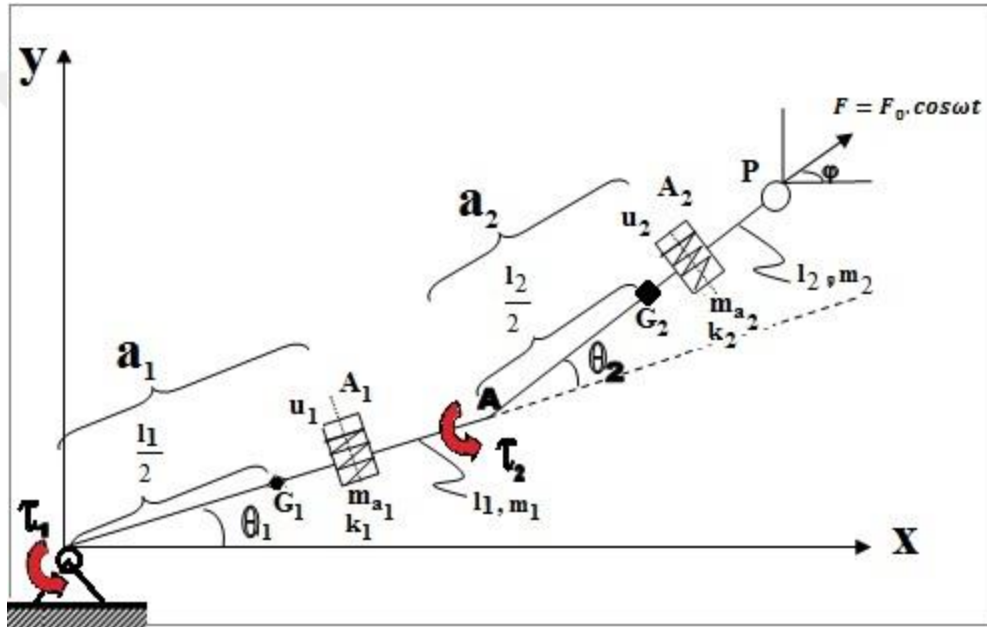
Şekil 3.3 te görüldüğü gibi dinamik titreşim absorberi, sönümleme oranına bağlı olarak titreşen sistemi doğal frekansın altında tutarak sistemin rezonansa girmesini engellemektedir [32].

4. MATEMATİKSEL MODEL

Sistemin bazı parametre ve formülasyonları çeşitli varsayımlar ve kabullerle değerlendirilerek; sistemin kinetik enerjisi, potansiyel enerjisi, genelleştirilmiş kuvvetleri ve hareket denklemleri Lagrange-Euler formülasyonlarıyla elde edilmiştir [23, 24].

4.1 Kinetik ve Potansiyel Enerjiler

Konum vektörleri;



Şekil 4.1 İki serbestlik dereceli robot kol sistemi.

Şekil 4.1’de verilen sistemden faydalanarak verilen sistemin kol, absorber ve kuvvetin uygulama noktalarını gösteren konum vektörleri elde edilmiştir.

$$\vec{r}_{G_1} = \frac{l_1}{2} \cos \theta_1 \vec{i} + \frac{l_1}{2} \sin \theta_1 \vec{j} \quad [4.1]$$

$$\vec{r}_{A_1} = [a_1 \cos \theta_1 + U_1 \cos(\theta_1 + \pi/2)] \vec{i} + \left[a_1 \sin \theta_1 + u_1 \sin \left(\theta_1 + \frac{\pi}{2} \right) \right] \vec{j} \quad [4.2]$$

$$\vec{r}_{G_2} = \left[l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \vec{i} + \left[l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \right] \vec{j} \quad [4.3]$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_{A_2} = & \left[l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + U_2 \cos\left(\theta_1 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \vec{i} \\ & + \left[l_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + u_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \vec{j} \end{aligned} \quad [4.4]$$

$$\vec{r}_p = \left[l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \vec{i} + \left[l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \right] \vec{j} \quad [4.5]$$

[4.6] ve [4.7] denklemleriyle arka koldaki hızın vektörleri ve kinetik enerjisi aşama aşama elde edilmiştir.

$$\vec{V}_{G_1} = -\frac{l_1}{2} \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \vec{i} + \frac{l_1}{2} \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \vec{j} \quad [4.6]$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{A_1} = & \left[-a_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - u_1 \sin\left(\theta_1 + \frac{\pi}{2}\right) \dot{\theta}_1 + \dot{u}_1 \cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \vec{i} \\ & + \left[a_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + u_1 \cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{2}\right) \dot{\theta}_1 + \dot{u}_1 \sin\left(\theta_1 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \vec{j} \end{aligned} \quad [4.7]$$

Sistemde sadece arka kola absorber bağlandığında elde edilecek kinetik enerji ise;

$$T_1 = \frac{1}{2} M_1 V_{G_1}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_{A_1} V_{A_1}^2 \quad [4.8]$$

ifadesi ile bulunur.

[4.6] ve [4.7] denklemlerin kareleri alınarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$T_1 = \frac{1}{8} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_{A_1} \left(a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + u_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \dot{u}_1^2 + 2a_1 \dot{u}_1 \dot{\theta}_1 \right) \quad [4.9]$$

Ön koldaki hızın vektörleri ve kinetik enerjileri aşağıdaki denklemlerle elde edilir;

$$\begin{aligned}\vec{V}_{G_2} = & \left[-l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - \frac{l_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right] \\ & + \left[l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + \frac{l_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right]\end{aligned}\quad [4.10]$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_{A_2} = & \left[-l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - u_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right] \\ & + \dot{u}_2 \cos\left(\theta_1 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) \\ & + \left[l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + u_2 \cos\left(\theta_1 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right] \\ & + \dot{u}_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}\quad [4.11]$$

Sistemde ön kola absorber yerleştirildiğinde elde edilecek kinetik enerji ifadesi;

$$T_2 = \underbrace{\frac{1}{2} m_2 V_{G_2}^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2}_{\text{Ön Kol}} + \underbrace{\frac{1}{2} m_{a_2} V_{A_2}^2}_{\text{Absorber}} \quad [4.12]$$

şeklinde olur.

[4.10] ve [4.11] denklemlerinin kareleri alınarak [4.12] denkleminde kullanılırsa;

$$\begin{aligned}\Rightarrow T_2 = & \frac{1}{2} m_2 \left[l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{l^2}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_1 \right] \\ & + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ & + \frac{1}{2} m_{a_2} \left[l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + a_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + u_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \dot{u}_2^2 + 2l_1 a_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 + 2l_1 u_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right. \\ & \left. + \underbrace{\cos\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)}_{-\sin \theta_2} + 2l_1 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 \underbrace{\sin\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)}_{\cos \theta_2} + 2a_2 \dot{u}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right]\end{aligned}\quad [4.13]$$

ifadesi elde edilir.

Her iki sistemin kinetik enerji ifadeleri ayrı ayrı [4.8], [4.9] ve [4.12] elde edilmiştir.

Toplam kinetik enerji ifadesi aşağıdaki gibi bulunur;

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{8} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_{a_1} a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_{a_1} u_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_{a_1} \dot{u}_1^2 \\
 & + m_{a_1} a_1 \dot{u}_1 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{8} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
 & + \frac{1}{8} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
 & + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_1^2 + I_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_{a_2} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\
 & + \frac{1}{2} m_{a_2} a_2^2 \dot{\theta}_1^2 + m_{a_2} a_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_{a_2} a_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_{a_2} u_2^2 \dot{\theta}_1^2 \\
 & + m_{a_2} u_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_{a_2} u_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_{a_2} \dot{u}_2^2 + m_{a_2} l_1 a_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \\
 & + m_{a_2} l_1 a_2 \cos \theta_2 \left(\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \right) - m_{a_2} l_1 u_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 - m_{a_2} l_1 u_2 \sin \theta_2 \left(\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \right) \\
 & + m_{a_2} l_1 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 + m_{a_2} a_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + m_{a_2} a_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

[4.14] denkleminde verilen kinetik enerji ifadesinin tekrarlanan terimlerinden yola çıkılarak ele alınan katsayıların ifadeleri sırasıyla tanımlanır.

$$M_1 = \frac{1}{8} m_1 l_1^2 + \frac{1}{2} I_1 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 + \frac{1}{2} I_2 + \frac{1}{8} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_{a_1} a_1^2 + \frac{1}{2} m_{a_2} l_1^2 + \frac{1}{2} m_{a_2} a_2^2 \tag{4.15}$$

$$M_2 = \frac{1}{8} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} I_2 + \frac{1}{2} m_{a_2} a_2^2 \tag{4.16}$$

$$M_3 = \frac{1}{2} m_{a_1} \tag{4.17}$$

$$M_4 = m_{a_1} a_1 \tag{4.18}$$

$$M_5 = \frac{1}{2} m_2 L_1 L_2 + m a_2 L_1 a_2 \quad [4.19]$$

$$M_6 = \frac{1}{2} m a_2 \quad [4.20]$$

$$M_7 = -m a_2 L_1 \quad [4.21]$$

$$M_8 = m a_2 a_2 \quad [4.22]$$

Lagrange-Euler formülasyonu uygulanırsa ileride elde edilecek hareket denklemlerinin ifadeleri aşağıdaki şekilde bulunur;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{q}} \right) - \frac{dT}{dq} + \frac{dV}{dq} + \frac{dD}{d\dot{q}} = Q,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\dot{q}} \right) - \frac{dL}{dq} = Q, \quad [4.23]$$

$$L = T - V \quad [4.24]$$

Sistemin potansiyel enerjisi [4.25] denkleminde tanımlanmıştır.

$$V = m_1 g \frac{l_1}{2} \sin \theta_1 + m_2 g \left[l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin (\theta_1 + \theta_2) \right] + \frac{1}{2} k_1 u_1^2 + \frac{1}{2} k_2 u_2^2 \quad [4.25]$$

Robot kol hareketi esnasındaki absorberin mutlak yer değişiminden kaynaklanan potansiyel enerji değişimi ihmal edilir.

Absorber yaylarındaki statik yer değiştirme ağırlık kuvveti ile ortadan kalkacaktır.

4.2 Genelleştirilmiş Kuvvetler (Momentler)

P noktasının virtüel yer değiştirmesi:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\delta r_p} = & \left[-l_1 \sin \theta_1 \delta \theta_1 - l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) (\delta \theta_1 + \delta \theta_2) \right] \vec{i} \\ & + \left[l_1 \cos \theta_1 \delta \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) (\delta \theta_1 + \delta \theta_2) \right] \vec{j}\end{aligned}\quad [4.26]$$

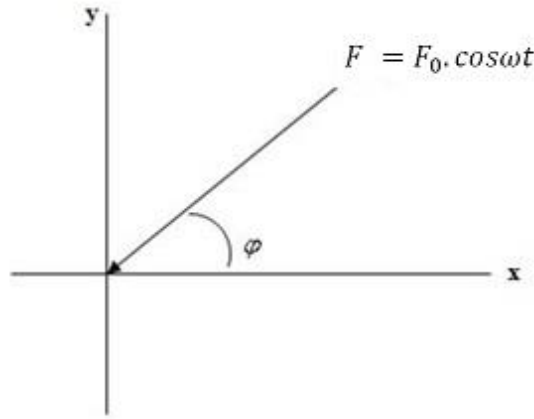
Harmonik kuvvetin Virtüel işi:

$$F_x = (F_0 \cdot \cos \omega t) \cos \varphi$$

$$\varphi = \text{sabit}$$

$$F_y = (F_0 \cdot \cos \omega t) \sin \varphi$$

$$\delta w_F = (F_x \vec{i} + F_y \vec{j}) \overrightarrow{\delta r_p}$$



Şekil 4.2 Genelleştirilmiş kuvvetler için referans sistemi.

$$\begin{aligned}&= F_x \left[-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \right] \delta \theta_1 \\ &\quad + F_y \left[l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \right] \delta \theta_1 \\ &\quad + F_x \left[-l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \right] \delta \theta_2 + F_y \left[l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \right] \delta \theta_2\end{aligned}\quad [4.27]$$

Sürücü Torklarının Virtüel İş

$$\delta w_T = \tau_1 \delta \theta_1 + \tau_2 \delta \theta_2 \quad [4.28]$$

Q_1 için genelleştirilmiş kuvvet;

$$Q_1 = \tau_1 + F_x [-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad [4.29]$$

Q_2 için genelleştirilmiş kuvvet;

$$Q_2 = \tau_2 + F_x [-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad [4.30]$$

Elde edilen kinetik ve potansiyel enerjiler, genelleştirilmiş kuvvetler Lagrange hareket denklemlerinde yerlerine yazılarak, 2R robot kolun çeşitli durumları için hareket denklemlerine ulaşılır.

4.3 Hareket Denklemleri

4.3.1 Absorbersiz sistem için hareket denklemleri

$$u_1 = 0, \quad \dot{u}_1 = 0, \quad \ddot{u}_1 = 0$$

$$u_2 = 0, \quad \dot{u}_2 = 0, \quad \ddot{u}_2 = 0$$

İfadeleri görüldüğü için buna ait hareket denklemi;

$$2M_1 \ddot{\theta}_1 + 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 =$$

$$F_x [-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)]$$

$$F_x = (F_0 \cdot \cos \omega t) \cos \varphi \quad F_y = (F_0 \cdot \cos \omega t) \sin \varphi$$

$$2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_2 \ddot{\theta}_1 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \sin^2 \theta_1 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$= F_x [-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad [4.31]$$

4.3.2 Arka kola absorber bağlandığı zaman hareket denklemleri

$$u_2 = 0, \quad \dot{u}_2 = 0, \quad \ddot{u}_2 = 0$$

İfadeleri görüldüğü için buna ait hareket denklemi;

$$2M_1 \ddot{\theta}_1 + 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_3 u_1^2 \ddot{\theta}_1 + 4M_3 u_1 \dot{u}_1 \dot{\theta}_1 + M_4 \ddot{u}_1$$

$$+ 2M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2$$

$$= F_x [-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)]$$

$$\begin{aligned}
& 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_2 \ddot{\theta}_1 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& = F_x [-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \\
& 2M_3 \ddot{u}_1 + M_4 \ddot{\theta}_1 + -2M_3 u_1 \dot{\theta}_1^2 + k_1 u_1 = 0
\end{aligned} \tag{4.32}$$

4.3.3 Ön kola absorber bağlandığı zaman hareket denklemleri

$$u_1 = 0, \quad \dot{u}_1 = 0, \quad \ddot{u}_1 = 0$$

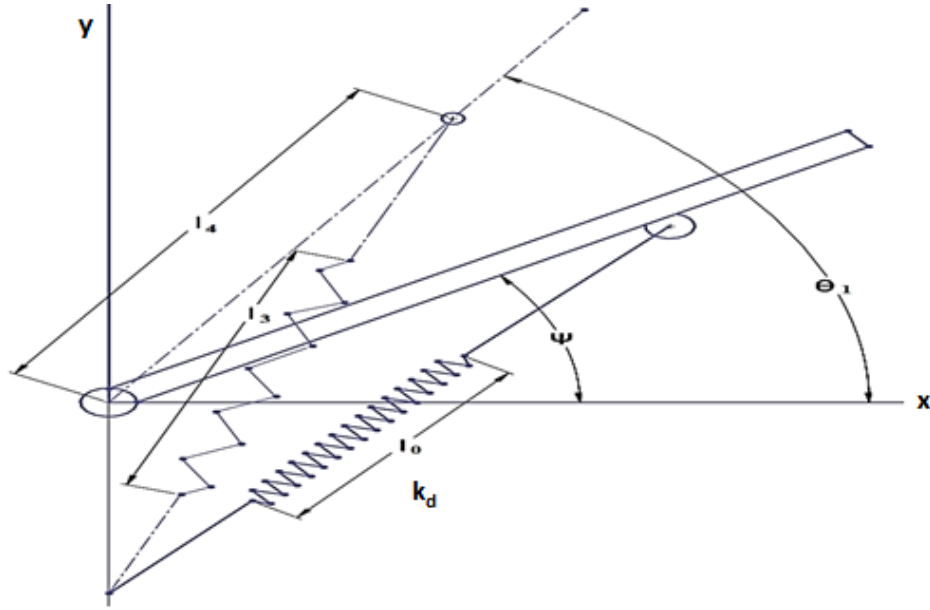
İfadeleri görüldüğü için buna ait hareket denklemleri;

$$\begin{aligned}
& 2M_1 \ddot{\theta}_1 + 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 \\
& - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_1 + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_2 \\
& + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2 + 2M_7 \sin \theta_2 u_2 \ddot{\theta}_1 + 2M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 \\
& + 2M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_7 \sin \theta_2 u_2 \ddot{\theta}_2 + m_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2 \\
& + M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_2^2 + M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2 - M_7 \cos \theta_2 \ddot{u}_2 + M_8 \ddot{u}_2 \\
& = F_x [-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_2 \ddot{\theta}_1 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_1 \\
& + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_2 + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2 + M_7 \sin \theta_2 u_2 \ddot{\theta}_1 \\
& + M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_8 \ddot{u}_2 + \\
& M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1^2 - M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& - M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 \\
& = F_x [-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_y [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 2M_6 \ddot{u}_2 + M_7 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - M_7 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 + M_8 \ddot{\theta}_1 + M_8 \ddot{\theta}_2 + \\
& 2M_6 u_2 \dot{\theta}_1^2 - 4M_6 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2M_6 u_2 \dot{\theta}_2^2 - M_7 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 - M_7 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + k_2 u_2 = 0
\end{aligned} \tag{4.33}$$

4.3.4 Arka kola dengeleme yayı yerleştirilen sistemdeki hareket denklemleri



Şekil 4.3 Dengeleme yaylı sistemin şematik gösterimi.

Yayın serbest boyu:

$$l_0^2 = l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right)$$

Yayın θ_1 açısı için uzama miktarı Δ olsun

$$\Rightarrow \Delta = \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{1/2} - l_0 \quad [4.34]$$

ifadesi elde edilir.

Dengeleme yayının potansiyel enerjisi [4.35] te elde edilmiştir.

$$V_y = \frac{1}{2} k_d \Delta^2$$

$$\Rightarrow V_y = \frac{1}{2} k_d \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]$$

$$- \frac{1}{2} k_d \left[2l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{1/2} \right] + \frac{1}{2} k_d l_0^2$$

$$\Rightarrow V_y = \frac{1}{2} k_d \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right] - k_d l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{1/2} + \frac{1}{2} k_d l_0^2 \quad [4.35]$$

Dengeleme yayından hareket denklemine gelen ek terimler;

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_y}{\partial \theta_1} &= k_d l_3 l_4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) - \frac{1}{2} k_d l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3 l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{-1/2} \cdot \left[2l_3 l_4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right] \\ \Rightarrow \frac{\partial V_y}{\partial \theta_1} &= k_d l_3 l_4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) - k_d l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3 l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{-1/2} \left[l_3 l_4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]\end{aligned}\quad [4.36]$$

4.3.5 Absorbersiz sistemde dengeleme yayı yerleştirildiğinde hareket denklemleri

$$\begin{aligned}2M_1 \ddot{\theta}_1 + 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ - k_d l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3 l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{-1/2} \left[l_3 l_4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right] \\ = F_x \left[-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \right] + F_y \left[l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \\ 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_2 \ddot{\theta}_1 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \sin^2 \theta_1 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ = F_x \left[-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \right] + F_y \left[l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \right]\end{aligned}\quad [4.37]$$

4.3.6 Arka koldaki absorberli sisteme dengeleme yayı yerleştirildiğinde hareket denklemleri

$$\begin{aligned}2M_1 \ddot{\theta}_1 + 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_3 u_1^2 \ddot{\theta}_1 + 4M_3 u_1 \dot{u}_1 \dot{\theta}_1 + M_4 \ddot{u}_1 + 2M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 \\ - 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ - k_d l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3 l_4 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right]^{-1/2} \left[l_3 l_4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \right] \\ = F_x \left[-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \right] + F_y \left[l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \\ 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_2 \ddot{\theta}_1 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ + M_5 \sin^2 \theta_1 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 = \\ F_x \left[-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \right] + F_y \left[l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \\ 2M_3 \ddot{u}_1 + M_4 \ddot{\theta}_1 + -2M_3 u_1 \dot{\theta}_1^2 + k_1 u_1 = 0\end{aligned}\quad [4.38]$$

4.3.7 Ön koldaki absorberli sisteme dengeleme yayı yerleştirildiğinde hareket denklemleri

$$\begin{aligned}
& 2M_1 \ddot{\theta}_1 + 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 \\
& - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_1 + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_2 \\
& + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_7 \sin \theta_2 u_2 \ddot{\theta}_1 + 2M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 \\
& + 2M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_7 \sin \theta_2 u_2 \ddot{\theta}_2 + M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2 \\
& + M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_2^2 + M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_2 - M_7 \cos \theta_2 \ddot{u}_2 + M_8 \ddot{u}_2 \\
& - k_d l_0 \left[l_3^2 + l_4^2 - 2l_3 l_4 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 \right) \right]^{-1/2} \left[l_3 l_4 \sin \left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 \right) \right] \\
& = F_x \left[-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \right] + F_y \left[l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \right] \\
& 2M_2 \ddot{\theta}_2 + 2M_2 \ddot{\theta}_1 + M_5 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 - M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_1 \\
& + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + 2M_6 u_2^2 \ddot{\theta}_2 + 4M_6 u_2 \dot{u}_2 \ddot{\theta}_2 + M_7 \sin \theta_2 u_2 \ddot{\theta}_1 \\
& + M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 + M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_8 \ddot{u}_2 \\
& + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1^2 - M_7 \cos \theta_2 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& - M_7 \sin \theta_2 \dot{u}_2 \dot{\theta}_1 = F_x \left[-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \right] + F_y \left[l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \right] \\
& 2M_6 \ddot{u}_2 + M_7 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - M_7 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 + M_8 \ddot{\theta}_1 + M_8 \ddot{\theta}_2 \\
& + -2M_6 u_2 \dot{\theta}_1^2 - 4M_6 u_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2M_6 u_2 \dot{\theta}_2^2 - M_7 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 - M_7 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& + k_2 u_2 = 0
\end{aligned} \tag{4.39}$$

Bulunan tüm hareket denklemleri mathcad programında çözdürülerek, sisteme ait grafikler ve değerleri elde edilmiştir.

4.4 İkinci Mertebeden Türevlere Bağlı Diferansiyel Denklemleri Birinci Mertebeye İndirgeme

Kullanılan bütün denklemler ikinci dereceden ifadelerdir. Bundan dolayı bütün türevlerin mathcad programında çözdürülmesi amacıyla mertebe indirgemesi yapılarak ikinci dereceden türevler birinci dereceye indirgenmiştir.

Kullanılan f ifadeleri robot kollardaki açıların ve hızların zamana bağlı durumlarıdır.

$$\left. \begin{aligned} a_1 \ddot{\theta}_1 + a_2 \ddot{\theta}_2 &= f_1(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \theta_1, \theta_2, t) \\ b_1 \ddot{\theta}_1 + b_2 \ddot{\theta}_2 &= f_2(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \theta_1, \theta_2, t) \end{aligned} \right\} \quad [4.40]$$

$$a_1 = 2M_1 + 2M_5 \cos \theta_2$$

$$a_2 = 2M_2 + M_5 \cos \theta_2$$

$$b_1 = 2M_2 + M_5 \cos \theta_2$$

$$b_2 = 2M_2$$

$$\begin{aligned} f_1 &= 2M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + Fx(-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \\ &\quad + Fy(l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \end{aligned}$$

$$f_2 = -M_5 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + Fx(-l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) + Fy(l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))$$

$$\theta_1 = y_1$$

$$\theta_2 = y_2$$

$$(a_1 \dot{\theta}_1 + a_2 \dot{\theta}_2) = y_3$$

$$b_1 \dot{\theta}_1 + b_2 \dot{\theta}_2 = y_4$$

[4.41] denkleminde son ikisinden $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ çözülerek;

$$\dot{\theta}_1 = \frac{b_2 y_3 - a_2 y_4}{a_1 b_2 - a_2 b_1}, \quad \dot{\theta}_2 = \frac{a_1 y_4 - b_1 y_3}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \text{ veya}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\theta}_1 &= a_1^* y_3 + a_2^* y_4 \\
\dot{\theta}_2 &= b_1^* y_3 + b_2^* y_4 \\
\left. \begin{aligned}
\dot{\theta}_1 &= \dot{y}_1 = a_1^* y_3 + a_2^* y_4 \\
\dot{\theta}_2 &= \dot{y}_2 = b_1^* y_3 + b_2^* y_4
\end{aligned} \right\} \quad [4.42]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_1^* &= \frac{b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} & a_2^* &= -\frac{a_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \\
b_1^* &= -\frac{b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} & b_2^* &= \frac{a_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{y}_1 &= \dot{\theta}_1 = a_1^* y_3 + a_2^* y_4 \\
\dot{y}_2 &= \dot{\theta}_2 = b_1^* y_3 + b_2^* y_4 \\
\dot{y}_3 &= a_1 \ddot{\theta}_1 + a_2 \ddot{\theta}_2 = f_1(\dots) + \dot{a}_1 \dot{\theta}_1 + \dot{a}_2 \dot{\theta}_2 \\
\dot{y}_4 &= b_1 \ddot{\theta}_1 + b_2 \ddot{\theta}_2 = f_2(\dots) + \dot{b}_1 \dot{\theta}_1 + \dot{b}_2 \dot{\theta}_2 \\
\dot{a}_1 &= -2M_5 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 \\
\dot{a}_2 &= \dot{b}_1 = -M_5 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 \\
\dot{b}_2 &= 0
\end{aligned}$$

5. TEORİK HESAPLAMALAR

2R robot kolun çeşitli durumları için hareket denklemleri Bölüm 4 te elde edildi. Bu hareket denklemleri tasarlanan ve imal edilen robotun değerlerine uygun olarak seçilip, Çizelge 5.1 deki değerler ile Mathcad programında çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Hesaplamalarda dengeleme yayı kütlesi ihmal edilmiş ve titreşim absorberlerinin lineer davrandıkları kabul edilmiştir.

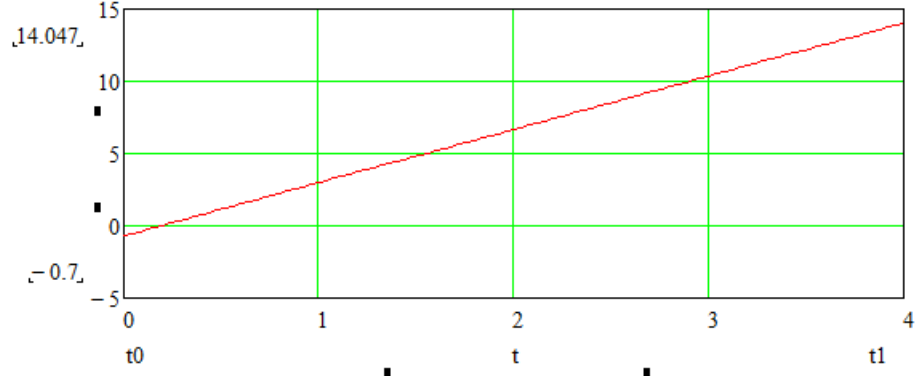
Çizelge 5.1 Teorik hesaplamada kullanılan değerler.

Arka Kol Değerleri		Ön Kol Değerleri	
m_1	0,4 kg	m_2	0,45 kg
L_1	0,24 m	L_2	0,21 m
b_1	0,118 m	b_2	0,071m
h_1	0,04 m	h_2	0,038 m
$F_0=10 \text{ N}$, $\phi =70.\pi/180$, $I_1=0,03860 \text{ kg.m}^2$, $I_2=0,15973 \text{ kg.m}^2$			

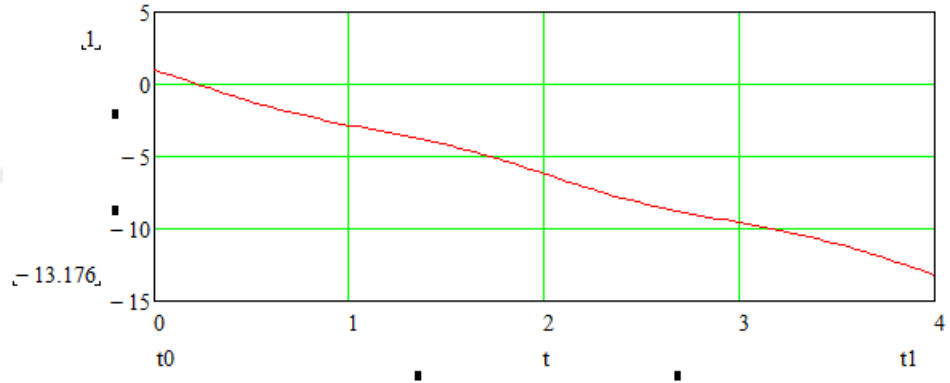
Şekil 5.1 de verilen m_1 ve m_2 arka ve ön kol kütlelerini, L_1 ve L_2 arka ve ön kol uzunluklarını, b_1 ve b_2 arka ve ön kol genişliklerini, h_1 ve h_2 arka ve ön kol yüksekliklerini, F_0 uygulanan ilk kuvvet, ϕ dengeleme yayının yatayla yaptığı açı, I_1 ve I_2 arka ve ön kol kütleli atalet momentlerini ifade etmektedir. Kolların kütleli atalet momentleri katı modelleme yapılan programla hesaplanmıştır.

5.1 Dengeleme Yaysız ve Absorbersiz Sistem İçin Analizler

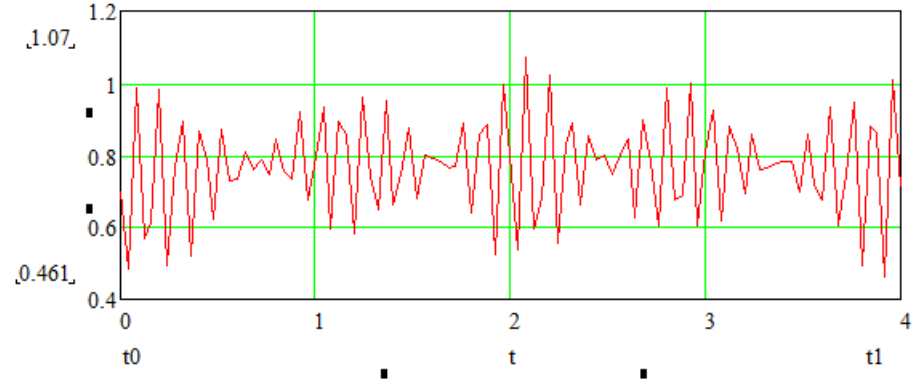
2R robotun dengeleme yayı ve absorber bağlanmadan yapılan analizleridir.



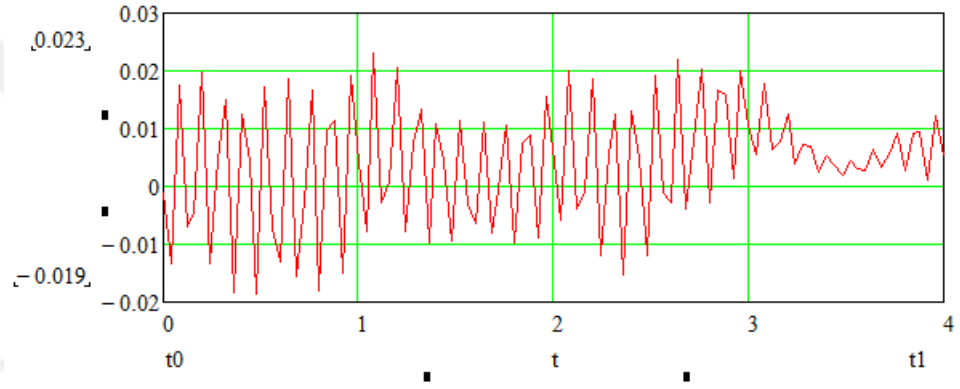
Şekil 5.1 Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.



Şekil 5.2 Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.



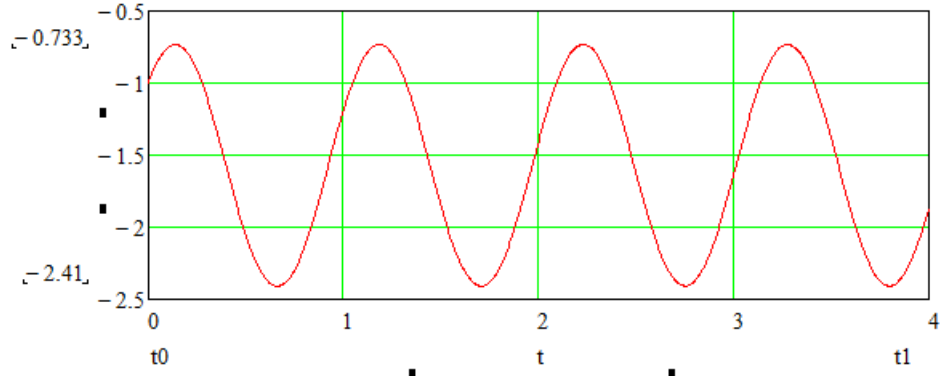
Şekil 5.3 Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.



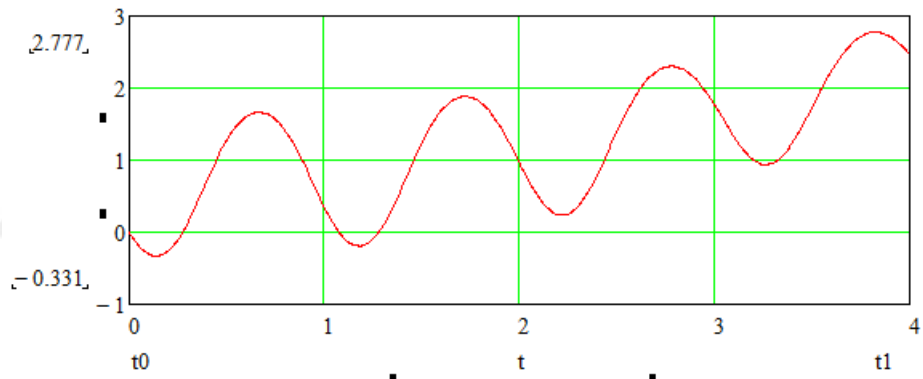
Şekil 5.4 Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.

5.1.2 Dengeleme yaylı ve absorbersız sistem için analizler

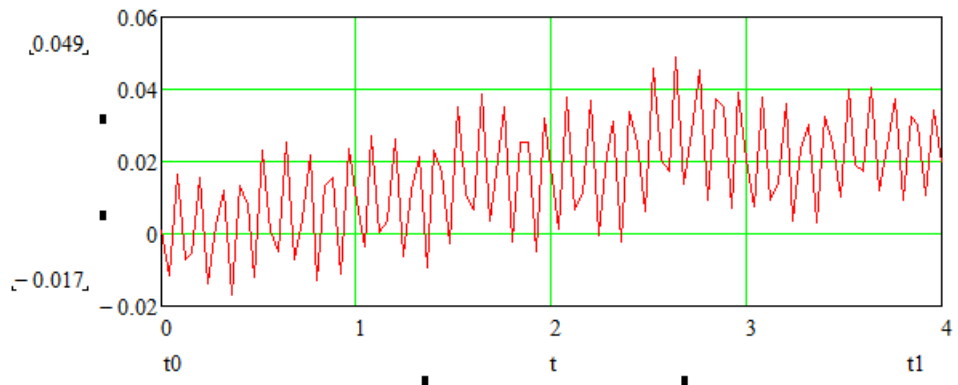
2R robotun arka koluna dengeleme yayı bağlanarak yapılan analizleridir.



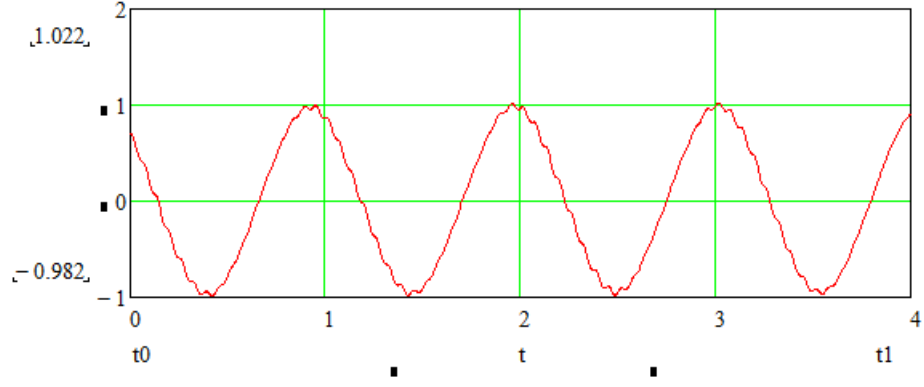
Şekil 5.5 Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.



Şekil 5.6 Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.



Şekil 5.7 Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.



Şekil 5.8 Ön kolün açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.

Çizelge 5.2 Sisteme dengeleme yayı eklenerek elde edilen sonuçlar.

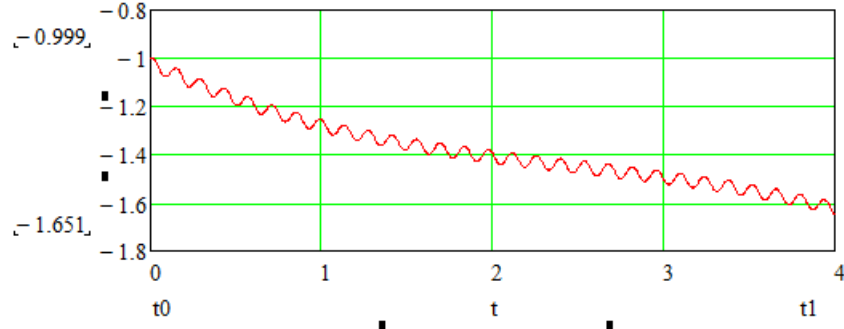
Durum	Açıklama	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	$\dot{\theta}_1$ (rad/s)	$\dot{\theta}_2$ (rad/s)
Dengeleme yaysız absorbersiz sistem (Şekil 5.1-5.4)	Min. Değer	-0,7	-13,76	0,461	-0,019
	Max. Değer	14,047	1	1,07	0,023
Dengeleme yaylı absorbersiz sistem (Şekil 5.5-5.8)	Min. Değer	-2,41	-0,331	-0,017	-0,982
	Max. Değer	-0,733	2,777	0,049	1,022

Sonuçlar Çizelge 5.2 ye göre değerlendirildiğinde, 2R robot kola dengeleme yayı eklendiği zaman robotun her iki kolunun hareketliliğinin azaldığı, ön kol açısal hızının arttığı ve arka kolün açısal hızının düştüğü görülmüştür.

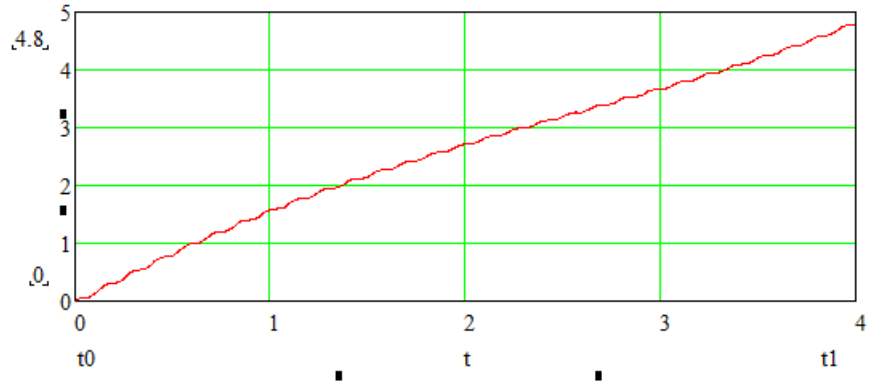
5.2 Arka Kola Absorber Eklendiği Durumda Analizler

5.2.1 Dengeleme yaysız arka kola absorber eklendiği durumdaki analizler

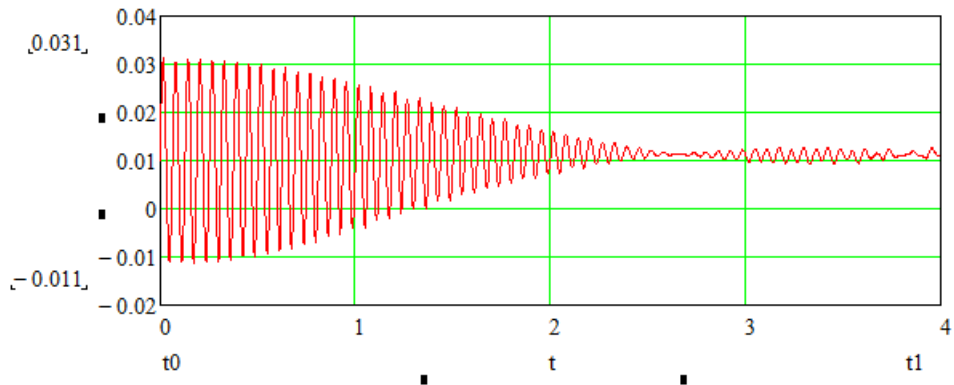
2R robotun arka koluna dengeleme yayı bağlanmadan, sadece absorber bağlanarak yapılan analizleridir.



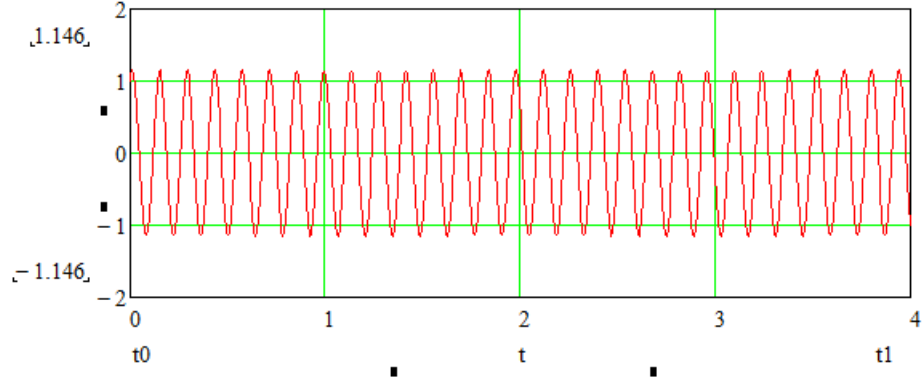
Şekil 5.9 Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.



Şekil 5.10 Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.



Şekil 5.11 Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.



Şekil 5.12 Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.

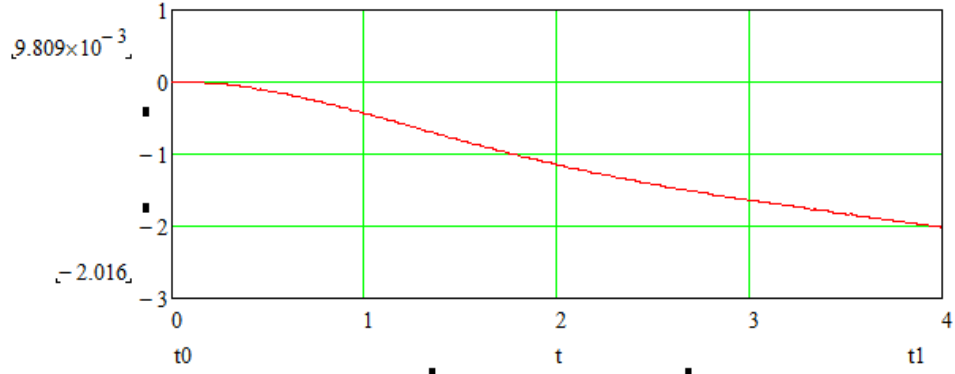
Çizelge 5.3 Dengeleme yaysız sistemin arka koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar.

Durum	Açıklama	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	$\dot{\theta}_1$ (rad/s)	$\dot{\theta}_2$ (rad/s)
Dengeleme yaysız absorbersiz sistem (Şekil 5.1-5.4)	Min. Değer	-0,7	-13,76	0,461	-0,019
	Max. Değer	14,047	1	1,07	0,023
Dengeleme yaysız arka kol absorber (Şekil 5.9-5.12)	Min. Değer	-1,651	0	-0,011	-1,146
	Max. Değer	-0,999	4,8	0,031	1,146

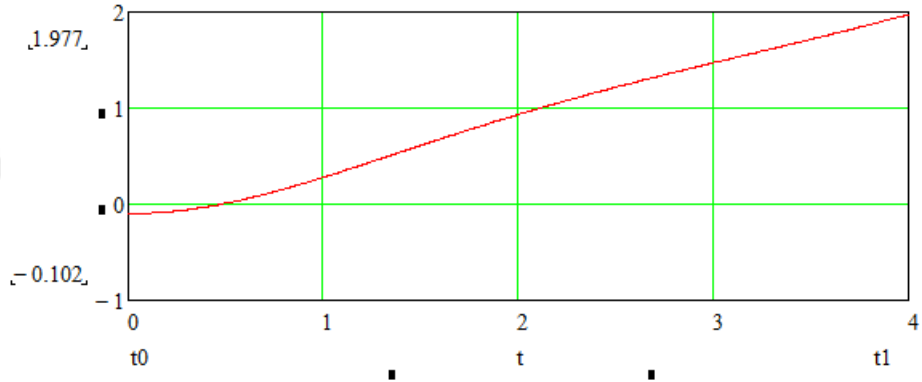
Sonuçlar Çizelge 5.3 e göre değerlendirildiğinde arka kola absorber konulduğu zaman, her iki kolun hareketliliğinde azalma olurken arka kolun hareketliliğinin ön kola göre daha fazla düştüğü görülmektedir. Arka kolun açısal hızının düştüğü, ön kolun açısal hızının ise arttığı görülmektedir.

5.2.2 Dengeleme yaylı arka kola absorber konulduğu durumdaki analizler

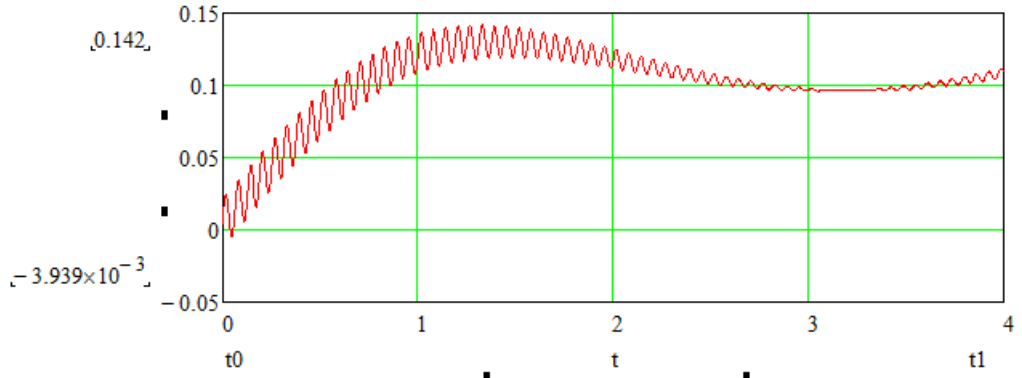
2R robotun arka koluna dengeleme yayı bağlıyken, arka kola absorber bağlanarak yapılan analizleridir.



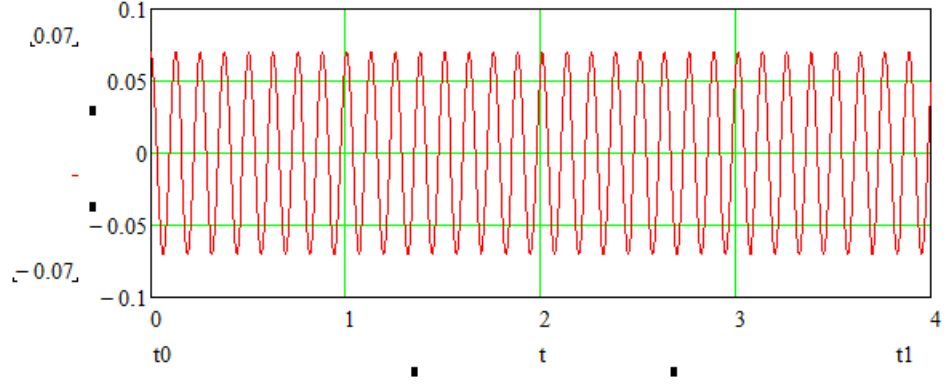
Şekil 5.13 Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.



Şekil 5.14 Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.



Şekil 5.15 Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.



Şekil 5.16 Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.

Çizelge 5.4 Dengeleme yaylı sistemin arka koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar.

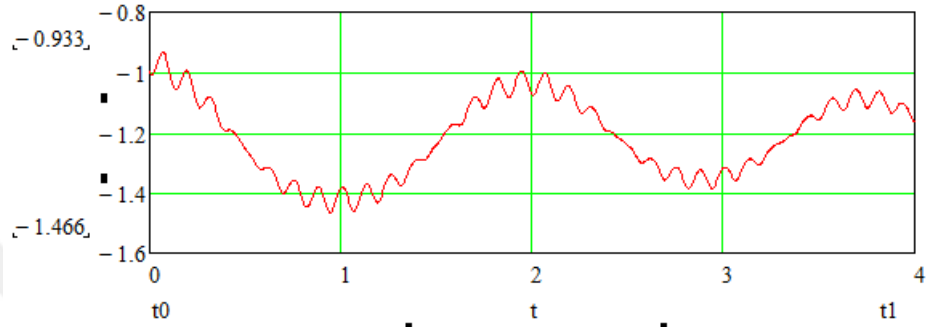
Durum	Açıklama	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	$\dot{\theta}_1$ (rad/s)	$\dot{\theta}_2$ (rad/s)
Dengeleme yaylı absorbersiz sistem (Şekil 5.9-5.12)	Min. Değer	-2,41	-0,331	-0,017	-0,982
	Max. Değer	-0,733	2,777	0,049	1,022
Dengeleme yaylı arka kola absorber (Şekil 5.13-5.16)	Min. Değer	-2,016	-0,002	-0,003	-0,07
	Max. Değer	0,009	1,977	0,142	0,07

Sonuçlar Çizelge 5.4 e göre değerlendirildiğinde arka kola absorber konulduğu zaman, arka kol ile ön kol hareketliliği düşmektedir. Ön kolun açısal hızı düşerken arka kolun açısal hızı bir miktar artmaktadır.

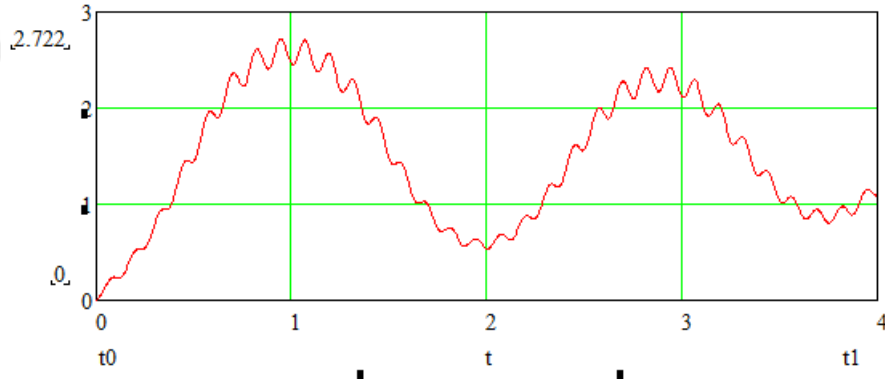
5.3 Ön Kola Absorber Eklendiği Durumda Analiz

5.3.1 Ön kolda absorber eklenip arka kola dengeleme yayı eklenmeden yapılan analizler

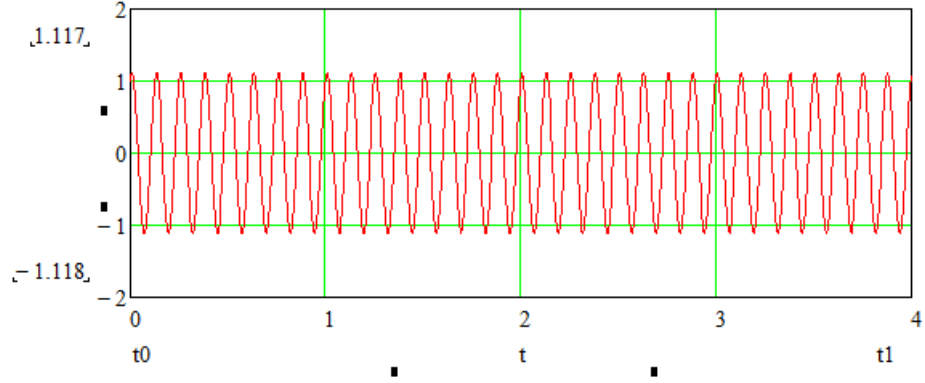
2R robotun arka koluna dengeleme yayı bağlanmadan, sadece ön kola absorber bağlanarak yapılan analizleridir.



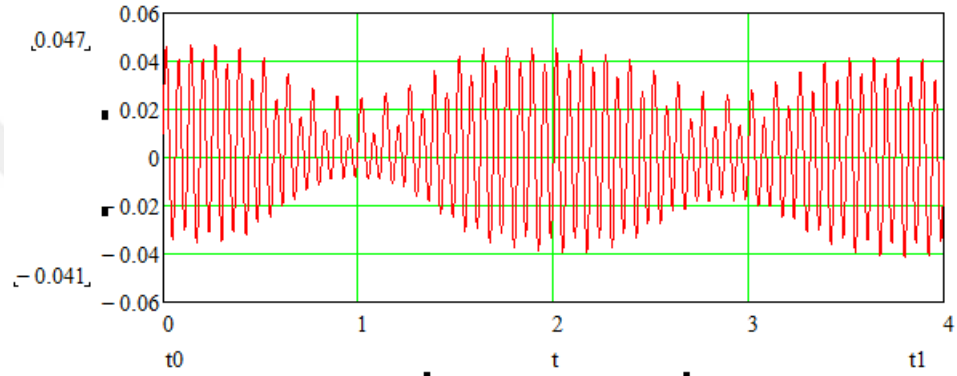
Şekil 5.17 Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.



Şekil 5.18 Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.



Şekil 5.19 Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.



Şekil 5.20 Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.

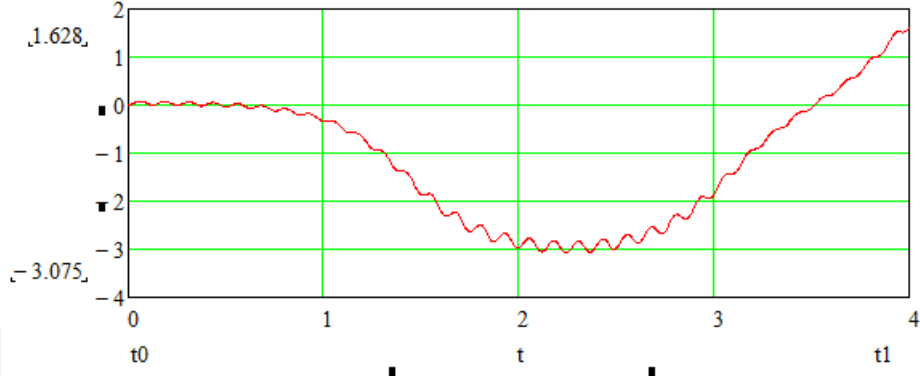
Çizelge 5.5 Dengeleme yaysız sistemin ön koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar.

Durum	Açıklama	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	$\dot{\theta}_1$ (rad/s)	$\dot{\theta}_2$ (rad/s)
Dengeleme yaysız absorbersiz sistem (Şekil 5.1-5.4)	Min. Değer	-0,7	-13,76	0,461	-0,019
	Max. Değer	14,047	1	1,07	0,023
Dengeleme yaysız ön kola absorber (Şekil 5.17-5.20)	Min. Değer	-1,466	0	-1,118	-0,041
	Max. Değer	0,933	2,722	1,117	0,047

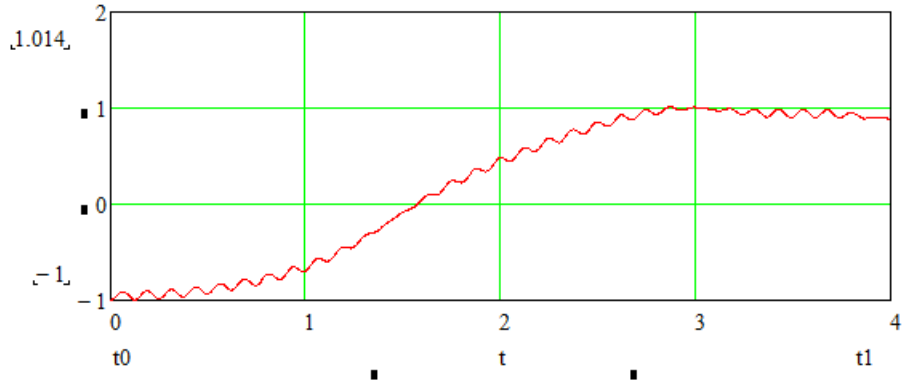
Sonuçlar Çizelge 5.5 e göre değerlendirildiğinde arka kola dengeleme yayı eklenmeden ön kola absorber eklendiğinde, arka kolun ve ön kolun hareketliliklerinin azaldığı, açısal hızlarının ise çok az arttığı görülmektedir.

5.3.2 Ön kolda absorber ve arka kola dengeleme yayı eklenerek yapılan analizler

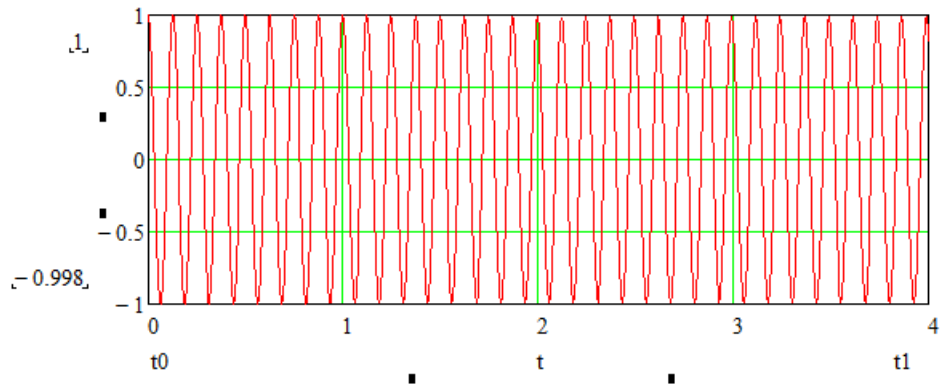
2R robotun arka koluna dengeleme yayı bağılyken, ön kola absorber bağlanarak yapılan analizleridir.



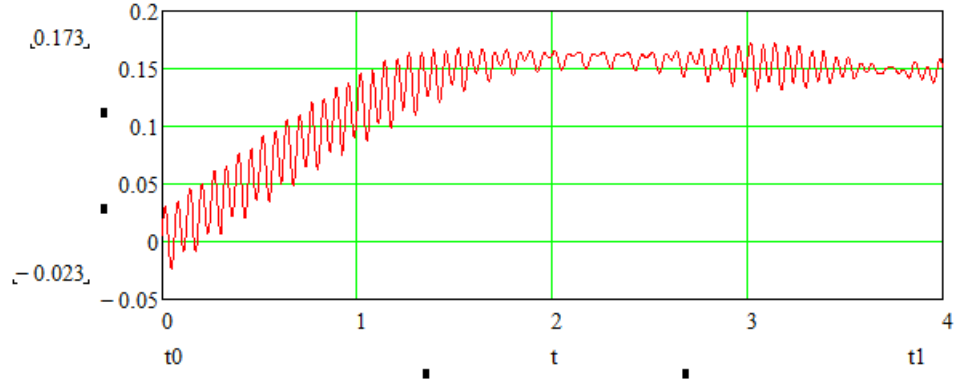
Şekil 5.21 Arka kolun konumunun (θ_1) zamanla değişimi.



Şekil 5.22 Ön kolun konumunun (θ_2) zamanla değişimi.



Şekil 5.23 Arka kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_1$) zamanla değişimi.



Şekil 5.24 Ön kolun açısal hızının ($\dot{\theta}_2$) zamanla değişimi.

Çizelge 5.6 Dengeleme yaylı sistemin ön koluna absorber eklenerek elde edilen sonuçlar.

Durum	Açıklama	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	$\dot{\theta}_1$ (rad/s)	$\dot{\theta}_2$ (rad/s)
Dengeleme yaylı absorbersiz sistem (Şekil 5.9-5.12)	Min. Değer	-2,41	-0,331	-0,017	-0,982
	Max. Değer	-0,733	2,777	0,049	1,022
Dengeleme yaylı ön kola absorber (Şekil 5.21-5.24)	Min. Değer	-3,075	-1	-0,99	-0,023
	Max. Değer	1,628	1,014	1	0,173

Sonuçlar Çizelge 5.6 ya göre değerlendirildiğinde, her iki kolun hareketliliği azalmaktadır. Ön kolun açısal hızı düşerken arka kolun açısal hızı artmaktadır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için Şekil 6.1 de katı modeli gösterilen 3 kollu 6 eksenli bir robot kol tasarlanıp üretilmiştir. Robot üretiminde ısıl işlem görmüş 7075 serisi alüminyum kütük ve plaka kullanıldı. Robotun elektronik alt yapısı hazırlandı ve programı yazılarak çalışmalara hazır hale getirildi.



Şekil 6.1 Robot kol katı model görünümü.

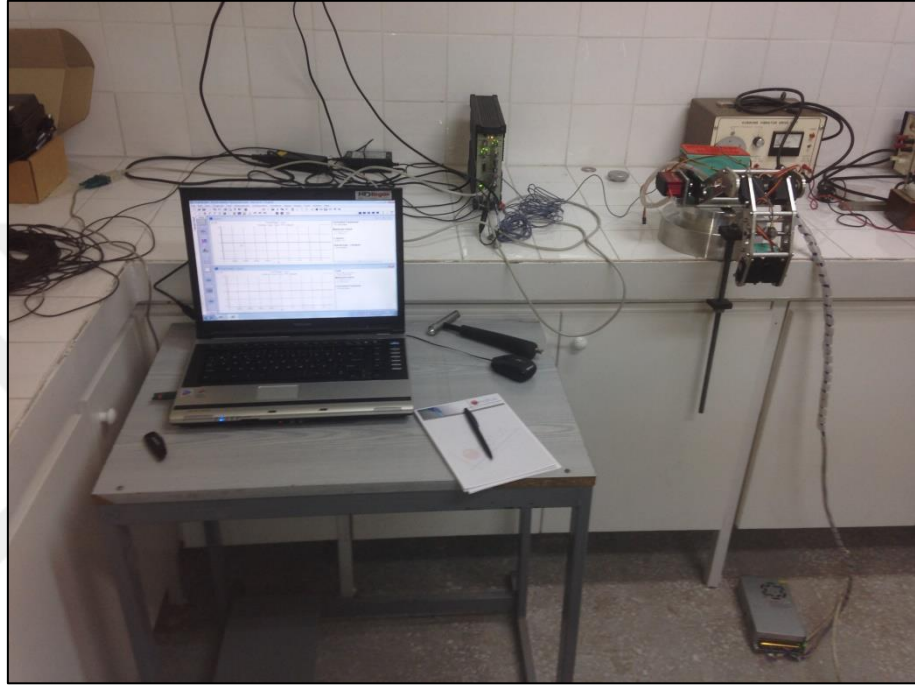
Robot yapımında kullanılan malzemeler Çizelge 6.1 de sıralanmıştır. Mekanik kısmı oluşturan parçalar yukarıdaki tasarıma uygun olarak hazırlanan resimlere göre CNC tezgahlarda işlenmiştir. Robottaki kısıkaç hazır olarak alınmıştır. Mekanik parçalar işlendikten sonra tasarıma uygun bir şekilde montajlanmıştır. Robot kolda tablanın dönme hareketi için bir adet servo motor, arka kol hareketi için senkronize çalışabilen iki adet servo motor, ön kol hareketi için senkronize çalışabilen iki adet servo motor, 3. kol hareketi için senkronize çalışabilen iki adet servo motor, bilek hareketi için bir adet servo motor ve kısıkaç açma-kapama hareketi için bir adet servo motor olmak üzere toplamda dokuz adet servo motor kullanılarak robot hareketleri sağlanmıştır. Servo motorların kontrol kartı ile bağlantıları yapılmıştır. Servo motorların çalışabileceği ortak voltaj aralığı aşağıdaki çizelgeden belirlenerek kontrol kartı aracılığıyla motorlara ve arduino mega kartına enerji verilmiştir.

Çizelge 6.1 Robotta kullanılan malzeme listesi.

Robot Malzemeleri	Malzemenin Özellikleri
Towerpro MG966R Servo	Ağırlık: 55 g Boyutlar: 40,7*19,7*42,9 mm Zorlanma torku: 10 kg/cm Çalışma Hızı: 0,20 san/60° (4,8 volt) Çalışma voltajı: 4,8-7,2 V Sıcaklık aralığı: 0-55 °C Frekans: 50 Hz
Power HD-1235MG Servo	Ağırlık: 165 g Boyutlar: 59,5*29,5*55,5 mm Zorlanma torku: 35 kg.cm (6 V) – 40 kg.cm (7,4 V) Çalışma Hızı: 0,20 san/60° (6 V) – 0,18 san/60° (7,4 V)) Çalışma voltajı: 6 - 7,4 V Sıcaklık aralığı: 10-55 °C Frekans: 330 Hz
DGS S05NF Servo	Ağırlık: 20 g Boyutlar: 28,8*13,8*30,2 mm Zorlanma torku: 2,8 kg.cm (4,8 V) – 3,2 kg.cm (6 V) Çalışma Hızı: 0,20 san/60° (4,8 V) – 0,18 san/60° (6 V)) Çalışma voltajı: 4,8 - 6 V Sıcaklık aralığı: 5-50 °C Frekans: 50 Hz
PLA Filament	Erime sıcaklığı : 150-160 °C Baskı sıcaklığı : 220 °C
7075 T6 Alüminyum	Akma mukavemeti : 460-505 MPa Çekme mukavemeti : 530-570 MPa Sertlik : 140-160 HB Elastisite Modülü : 71,7 GPa
Arduino Mega 2650	Mikrodenetleyici : Atmega2560 Çalışma Gerilimi : 5V Flash Hafıza : 256 KB
Arduino Mega Servo Shield	Arduino Mega 2560 için özel olarak üretilmiş servo motor bağlantı kartıdır.
SMPS Güç Kaynağı	Çıkış Gücü : 6 V 50 A Çalışma voltajı: 220 V – 50 Hz
Bağlantı Kaplinleri	Alüminyum malzemeden servo motorlara özel olarak üretilmiş kaplinler kullanılmıştır.
Bağlantı Civataları	Alyan başlı M3x10 ve M4x20
Robot Kısıkaçı	Max Ağız Açıklığı : 50,8 mm
Tabla Rulmanı	Sabit Bilyalı 688ZZ İç Çap: 50 mm Dış Çap: 90 mm Ağırlık: 480 g

6.1 Deney Düzeneği

Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Titreşim Laboratuvarı'nda bulunan titreşim analiz cihazı kullanılarak deneysel titreşim çalışmaları yapılmıştır. Robot kolun kısıkaç ve 3. kolu sökülerek deneysel çalışmalarda kullanılacak 2R robot haline getirilmiştir.



Şekil 6.2 2R robot kolun titreşim deney düzeneği.

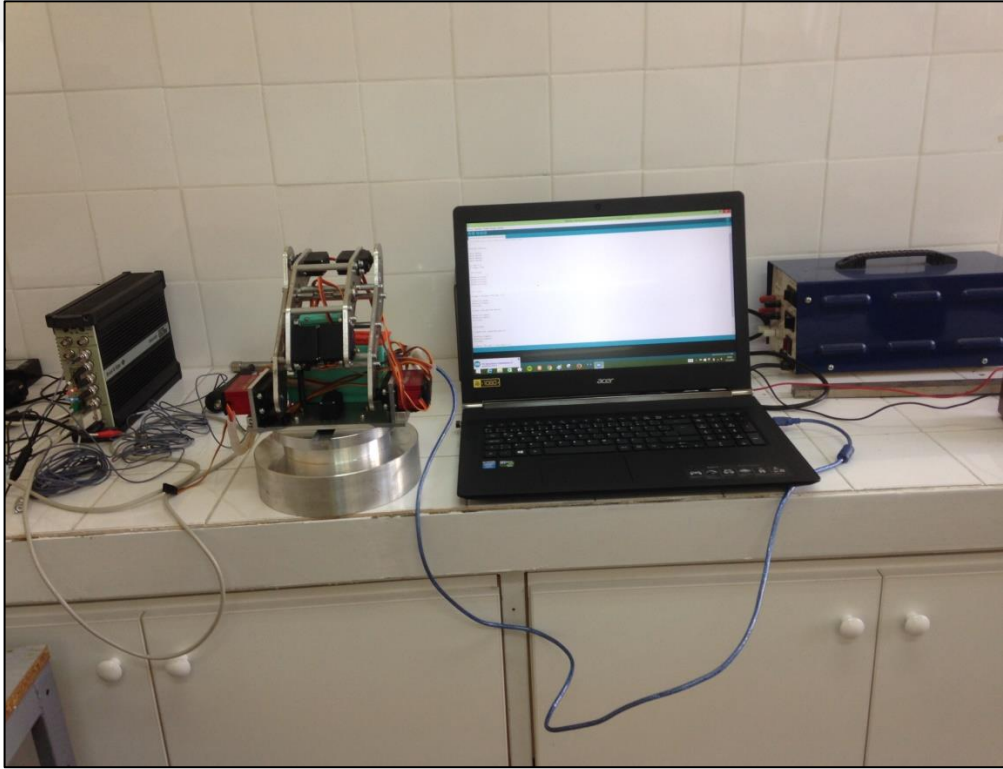
2R robotun deneysel çalışmalarda esnasında arka ve ön kolun hareketlerinden dolayı yer değiştirmemesi için Şekil 6.2 de görüldüğü gibi robot kol tablasından zemine sabitlenmiştir.

Dinamik titreşim absorberlerinin robot kollar üzerinde belirlenen noktalara bağlanmaları için katı modeli hazırlanan bağlantı aparatı 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Rijitliđi sağlamak ve aparatındaki esnemeleri minimize etmek için yazıcıda parçanın içi %100 yoğunlukta bastırılmıştır. Robot kolun kontrol ünitesi de aynı yöntemle 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir.

6.1.1 2R robotun programlanması ve sensör yerleşimi

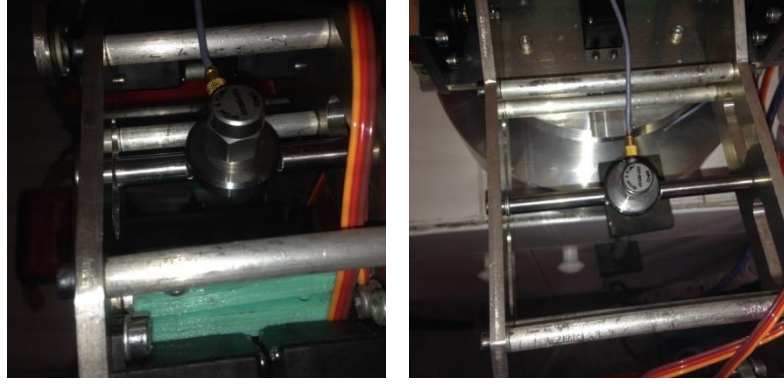
Deneysel çalışmalar yapılırken ön kol ve arka kol analizleri ayrı ayrı yapılmıştır. Robot kol için yazılan program ön ve arka kolu ayrı ayrı hareket ettirecek şekilde oluşturulmuştur. Robot kolların başlangıç ve hareket pozisyonları ölçümler sırasında dinamik titreşim absorberinin herhangi bir tarafa çarpmayacak şekilde ayarlanmıştır. Arka kol 0° başlayarak 70° kadar 70° lik bir açı taramıştır. Ön kol ise 90° başlayarak 20° ye kadar 70° lik bir açı tarayarak hareket ettirilmiştir. Arka ve ön kol yukarı ve aşağı hareketlerini toplamda 140° lik bir açı tarayarak yapmışlardır. Hareket esnasında her iki kol 1° lik açığı 14 milisaniyede tarayarak toplam hareketlerini 1960 milisaniyede tamamlamışlardır.

.



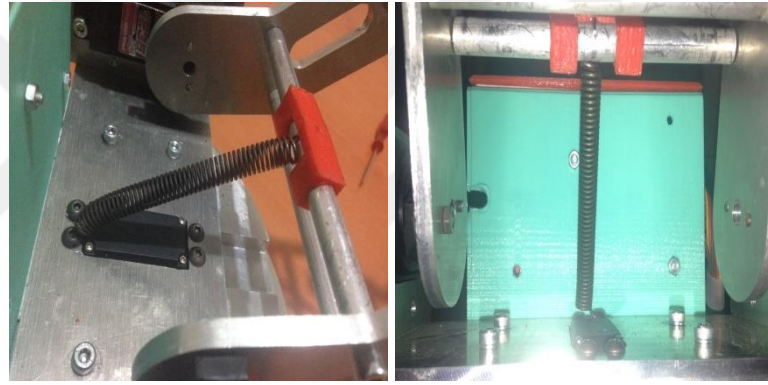
Şekil 6.3 Deneysel çalışmalar için robot kola program kodlarının yüklenmesi.

2R robot kolun deneysel çalışmalarda uzuv hareketleri için yazılan program Şekil 6.3 te görünen mavi usb kablosu ve bilgisayar yardımıyla ile 2R robot kolun kontrol kartına yüklenerek deneysel çalışmalara hazır hale getirildi.

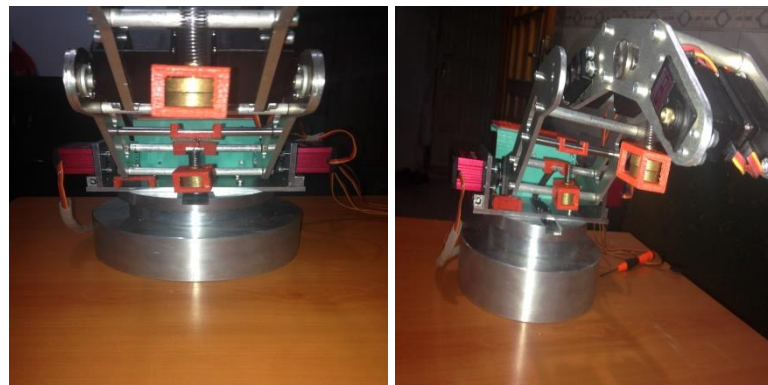


Şekil 6.4 Robotun ön ve arka koluna ivme sensörünün bağlanması.

Deneysel çalışmalarda 2R robot kolun titreşimlerini ölçmek için Şekil 6.4 te görüldüğü gibi ivme sensörü kolların kütle merkezinde ve hareket yönünde olacak şekilde bağlanmıştır.



Şekil 6.5 Robotun arka koluna dengeleme yayının bağlanması.



Şekil 6.6 Robotun arka ve ön koluna dinamik titreşim absorberlerinin bağlanması.

2R robot kolun arka koluna dengeleme yayı Şekil 6.5 teki gibi bağlanmıştır. Dinamik titreşim absorberleri Şekil 6.6 da görüldüğü gibi kolların hareketinde lineerliğini koruyacak şekilde özel bir aparatla robotun arka ve ön koluna bağlanmıştır.

6.1.2 Titreşim analiz cihazının programlanması ve kontrolü

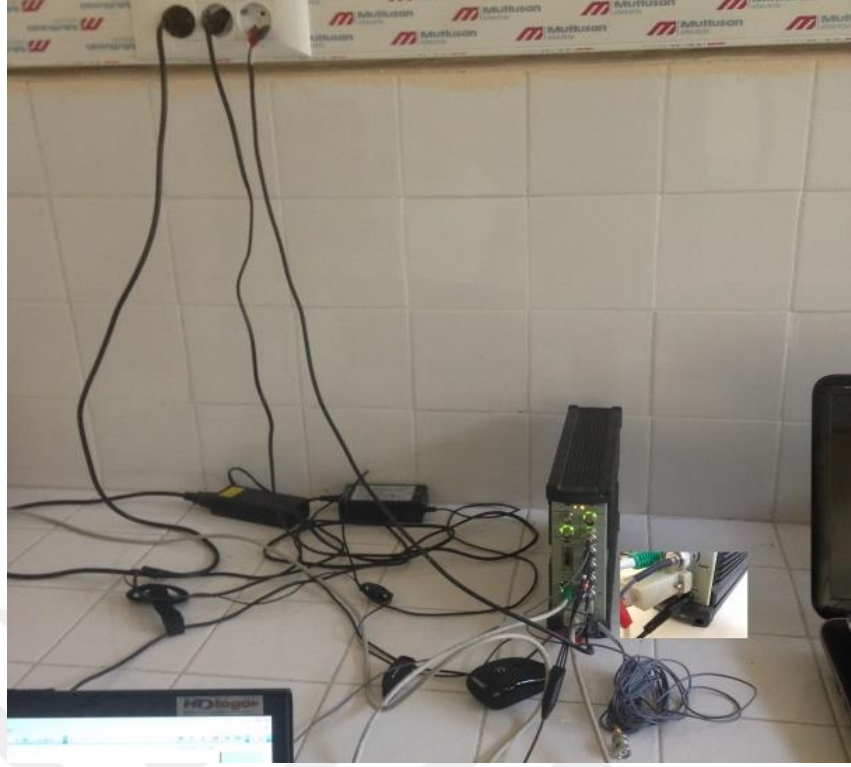
Deneysel çalışmalar FFT Analyzer modülü kullanılarak yapılmıştır. İvme sensörünün bağlandığı kanal cihaza tanıtıldı. Frekans aralığı 400 Hz seçildi ve çözünürlük için 400 Hz 800 çizgiye bölündü. Bu ayarlardan sonra çözünürlük 0,5 Hz, ölçüm süresi 2s olmuştur. Modülde overlap ayarı %0 olarak ayarlanarak sensörün okuduğu verilerin her bir ölçüm için farklı olması sağlandı. Robot kollar her bir hareketi 2s de yapmaktadır. Robot harekete başlamadan 1s önce ölçüm alınmaya başlandı robot kolun 2s süren hareketinden sonra 1s daha ölçümün sürmesi sağlanacak şekilde her bir ölçümün 4s de bir alınması için gerekli ayarlamalar yapıldı.

Titreşim analiz cihazının ve robotun besleneceği priz kontrol edildi. Her iki cihazın elektrik ve topraklama bağlantısı yapıldı.



Şekil 6.7 Laboratuvardaki priz bağlantılarının kontrolü.

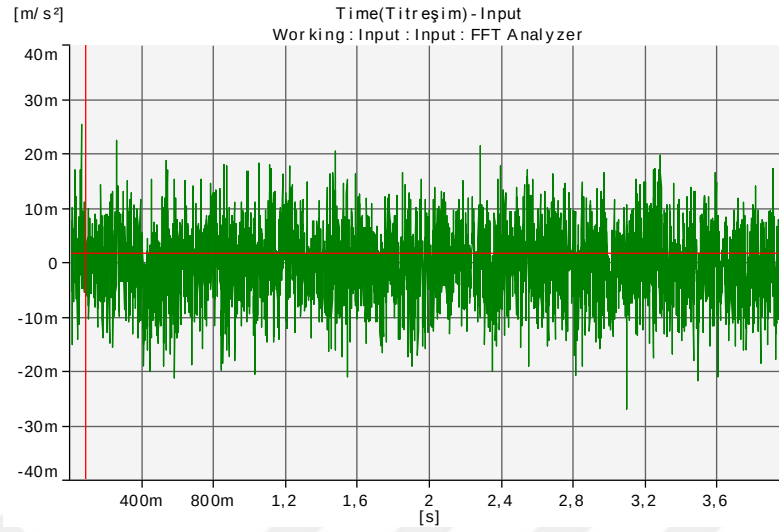
Prize bağlanan üç kabloda multimetre yardımıyla alınan ölçümlerde Şekil 6.7 te görülen sarı kablonun toprak bağlantısı, mavi ve siyah kablonun ise faz ve nötr olduğu tespit edildi.



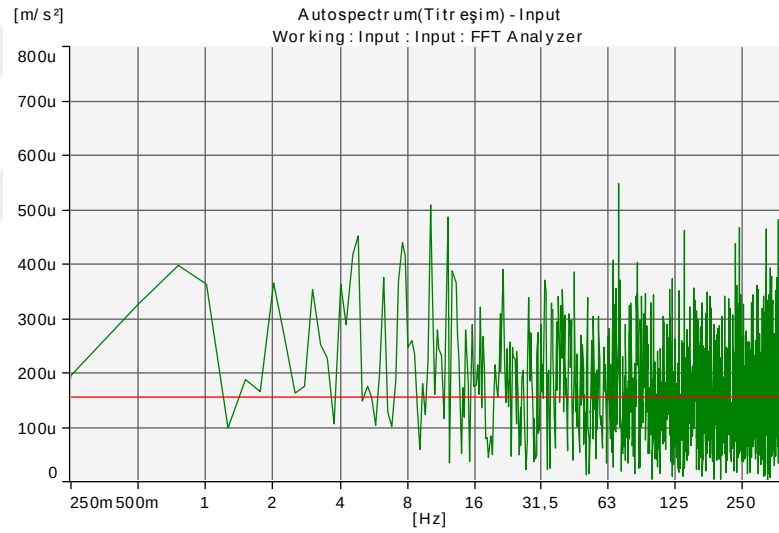
Şekil 6.8 Titreşim analiz cihazının elektrik ve topraklama bağlantısı.

Titreşim analiz cihazının elektrik besleme kablosundan sadece nötür ve faz girişleri sağlandığı için cihazın topraklanma işlemi Şekil 6.8 te görüldüğü gibi prizdeki toprak bağlantısından bir kablo yardımıyla cihazın toprak girişi birleştirilerek yapılmıştır. Deneysel  alışmalar sırasında titreşim analiz cihazı ve 2R robot kolun elektrik ve topraklama bağlantılarının eksiksiz yapılması önem arz etmektedir. Bu bağlantılarda problem olması durumunda yapılan titreşim ölçümlerinde şebeke frekansı olan 50 Hz değerinde parazit olan bir peak oluşmakta ve ölçüm sonuçlarını olumsuz yönde etkilemektedir.

6.1.3 Kontrol ölçümleri



Şekil 6.9 Robot kollar hareketsiz iken ölçülen titreşim değerleri.

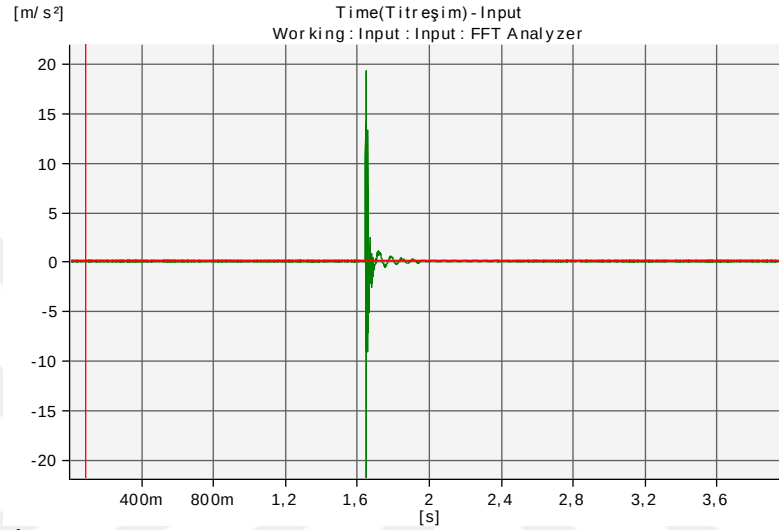


Şekil 6.10 Robot kollar hareketsiz iken ölçülen frekans spektrumu.

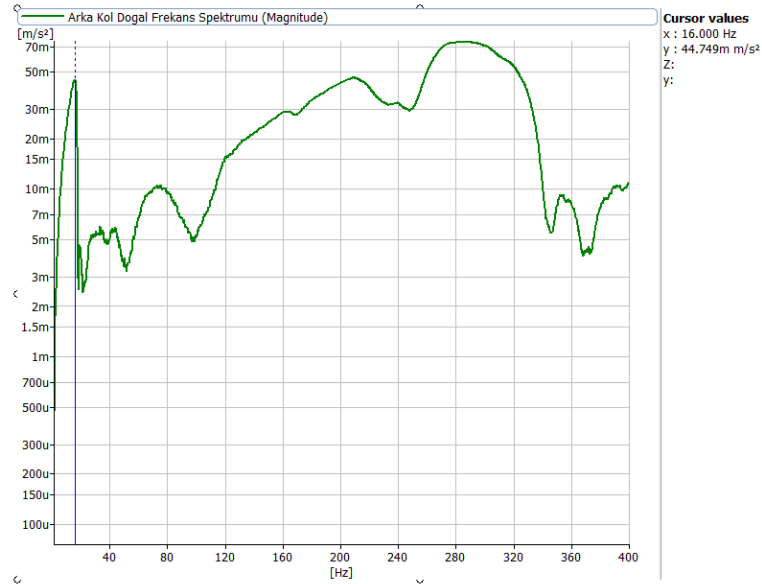
Şekil 6.9 ve şekil 6.10 incelendiğinde, parazit oluşturacak herhangi bir sinyalin olmadığı ve sistem hareketsizken alınan ölçümlerin kabul edilebilir titreşimler olduğu anlaşılmaktadır.

6.2. 2R Robot Kolda Doğal Frekans Tayini

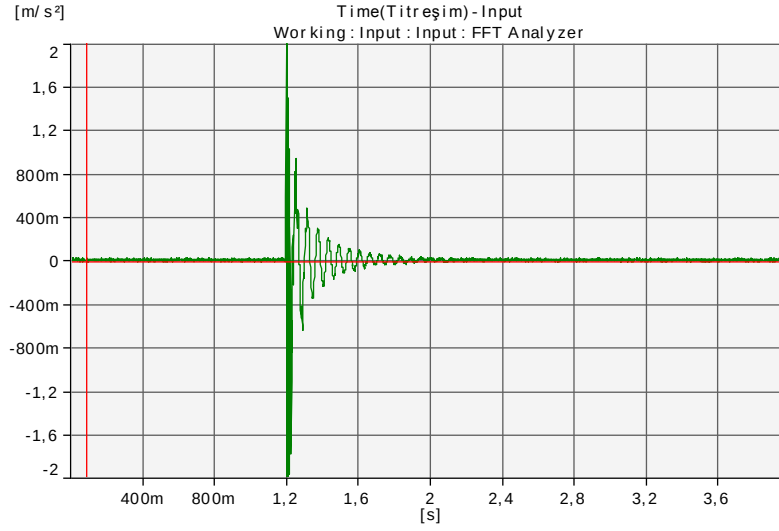
2R robot kola enerji verilmeden titreşim ölçme sensörü (ivme sensörü) önce arka kol kütle merkezine daha sonra ön kol kütle merkezine yerleştirilerek sisteme bir anahtarla vurulmuştur. Sisteme uygulanan bu darbe ile sensörden alınan veriler titreşim analiz cihazında titreşim değeri ve frekans spektrumlarına dönüşmüştür. Frekans spektrumundaki ilk pik değerinin olduğu değer sistemin doğal frekansıdır.



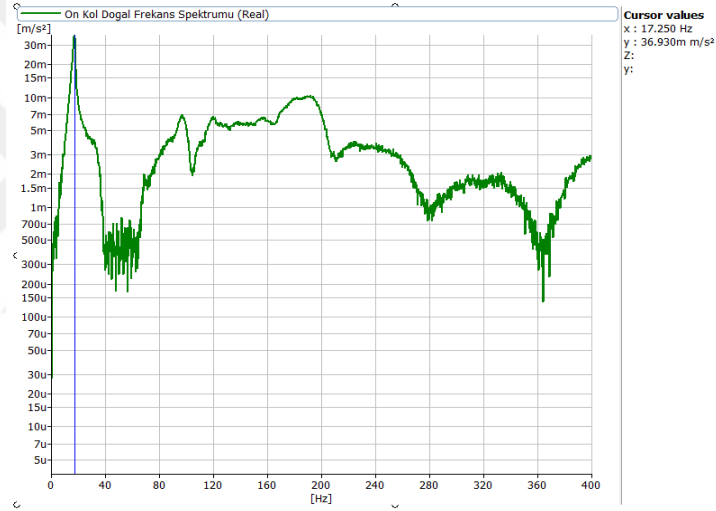
Şekil 6.11 İvme sensörü arka kol kütle merkezinde iken ölçülen titreşim değerleri.



Şekil 6.12 İvme sensörü arka kol kütle merkezinde iken ölçülen frekans spektrumu.



Şekil 6.13 İvme sensörü ön kol kütle merkezinde iken ölçülen titreşim değerleri.

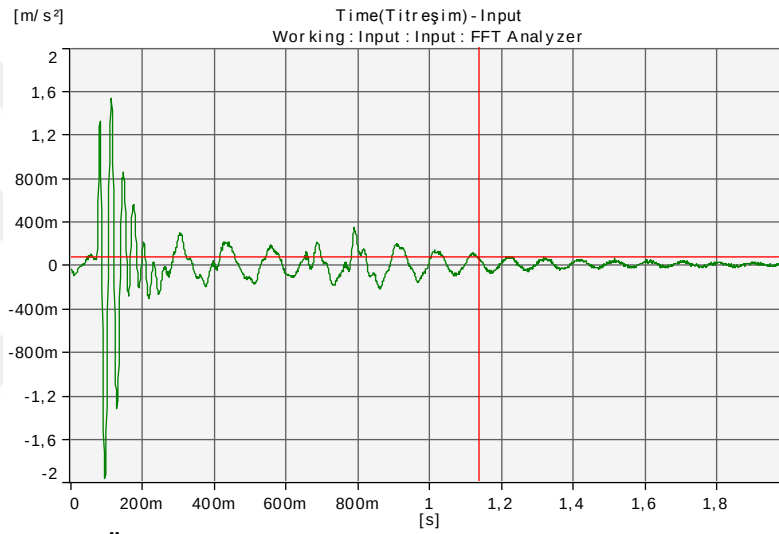


Şekil 6.14 İvme sensörü ön kol kütle merkezinde iken ölçülen frekans spektrumu.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.14 incelendiğinde, ivme sensörü sırasıyla arka ve ön kolda iken sistemin doğal frekansı 16 Hz ve 17.25 Hz olarak görülmektedir. Daha yüksek frekanslarda da sistemin doğal frekansları bulunmaktadır. Ancak robot çalışması esnasında bu yüksek hızlara erişememektedir.

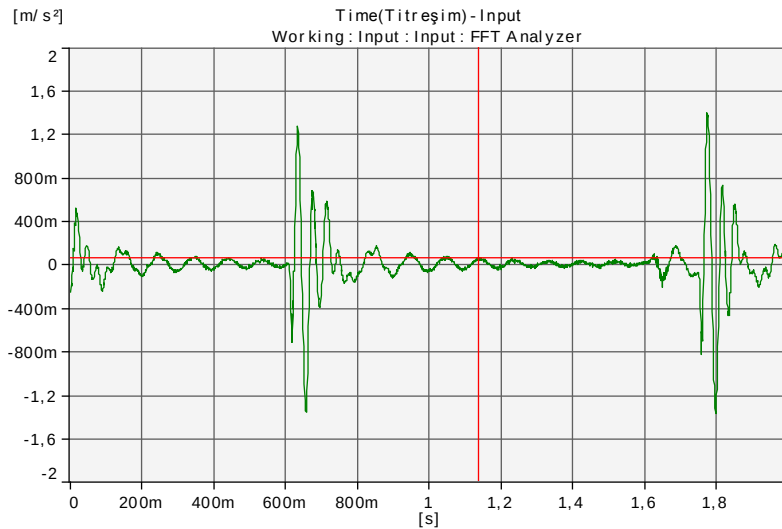
6.3 Deneysel çalışmalar

Robot kolların farklı durumlar altında titreşim analiz cihazına bağlanan ivme sensörü yardımıyla titreşim değerleri incelendi. Robotun hareketleri yazılan program yardımıyla kontrol edildi. Deneysel ölçümler sırasında robotun ön ve arka koluna bağlanan absorberin herhangi bir yere çarpmaması gerekir. Bu nedenle, 2R robot kolun ön kolu bekleme konumundayken arka kolun, arka kol bekleme konumundayken ön kolun hareket etmesi sağlandı. Titreşim ölçümleri sırasında kolların bekleme konumlarındaki titreşim değerleri aşağıdaki gibi ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda 2R robot kol sistem olarak adlandırılmıştır.



Şekil 6.15 Ön kolun bekleme konumunda ölçülen titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri : $1,96 \text{ m/s}^2$



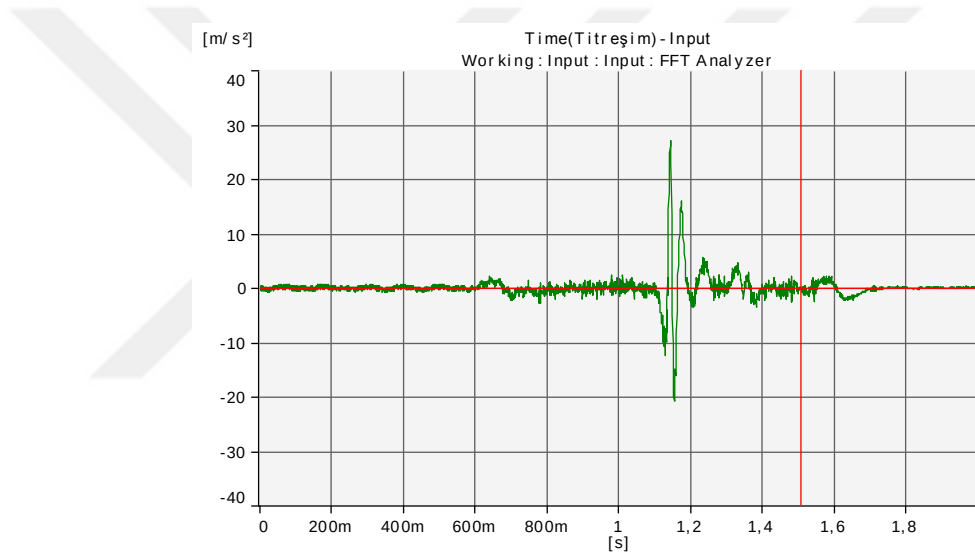
Şekil 6.16 Arka kolun bekleme konumunda ölçülen titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri : $1,39 \text{ m/s}^2$

2R robot kolun ön ve arka kolu birbiriyle eş çalışan ikişer adet servo motor ile hareket ettirilmektedir. Robot kollarda herhangi bir mekanik fren bulunmamaktadır. Robot kollar pozisyonlarını koruyabilmek için harekete zorlandığı yönün tersine hareket etmekte ve bekleme konumlarında Şekil 6.15 ile Şekil 6.16 te görüldüğü gibi titremektedirler.

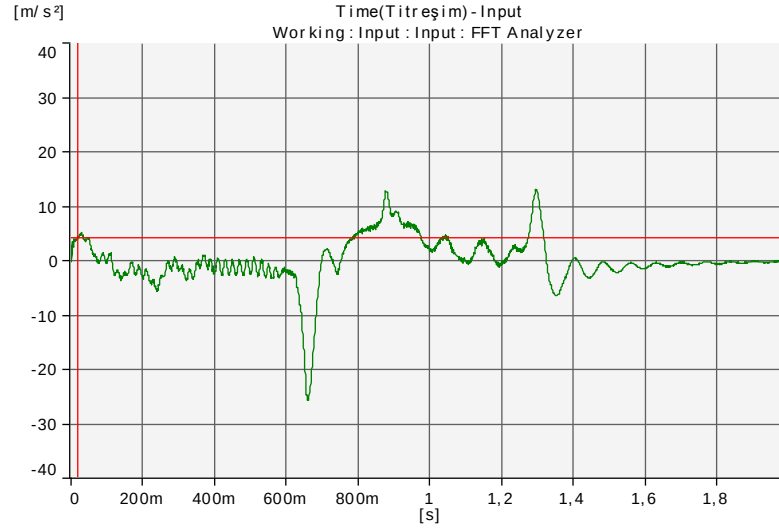
6.3.1 Robot kollara absorber ve dengeleme yayı bağlanmadan yapılan deneysel titreşim ölçümleri

Robotun arka kol ve ön kola dengeleme yayı ve absorber bağlanmadan sistemin yalın halinde yapılan deneysel titreşim ölçümleridir.



Şekil 6.17 Dengeleme yaysız ve absorbersiz sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

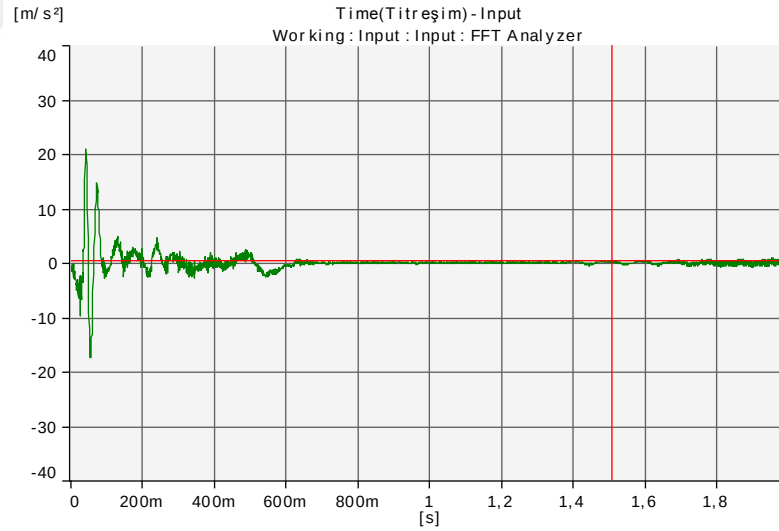
Maksimum titreşim değeri 27 m/s^2 dir.



Şekil 6.18 Dengeleme yaysız ve absorbersız sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

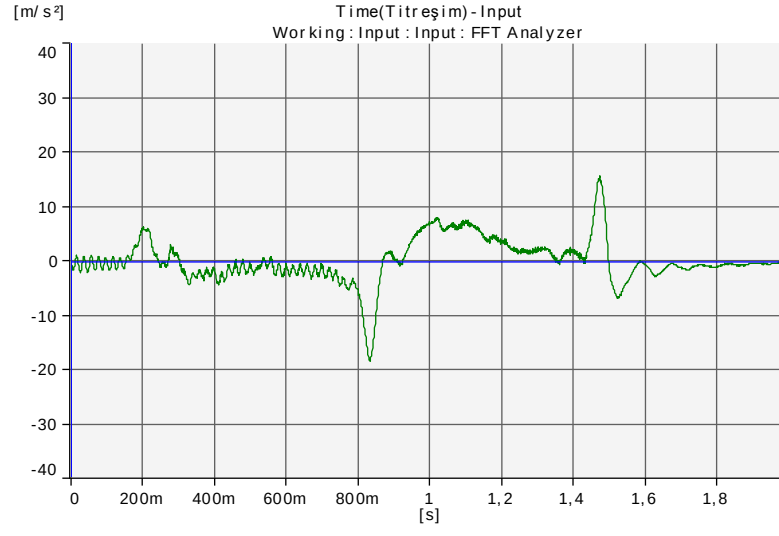
Maksimum titreşim değeri $25,8 \text{ m/s}^2$ dir.

6.3.2 Sistemin arka koluna dengeleme yayı eklenmesi durumunda yapılan deneysel titreşim ölçümleri



Şekil 6.19 Dengeleme yaylı sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $20,8 \text{ m/s}^2$ dir.

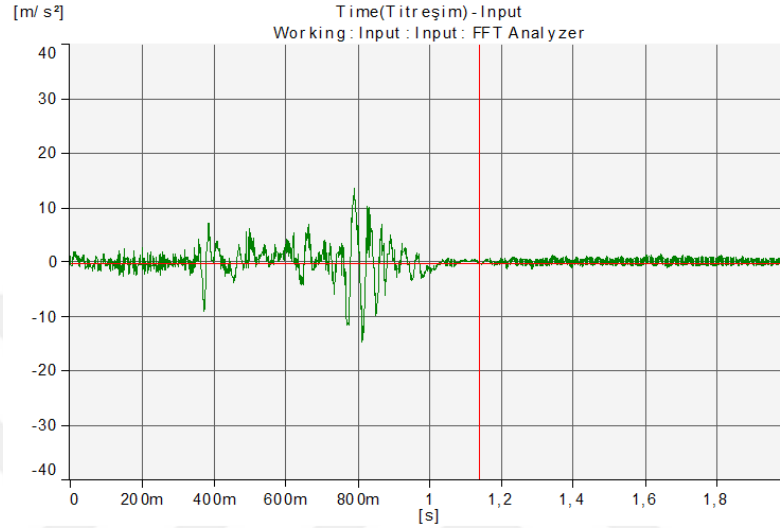


Şekil 6.20 Dengeleme yaylı sistemin ön kolunun lineer ölçekli, ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $18,50 \text{ m/s}^2$ dir.

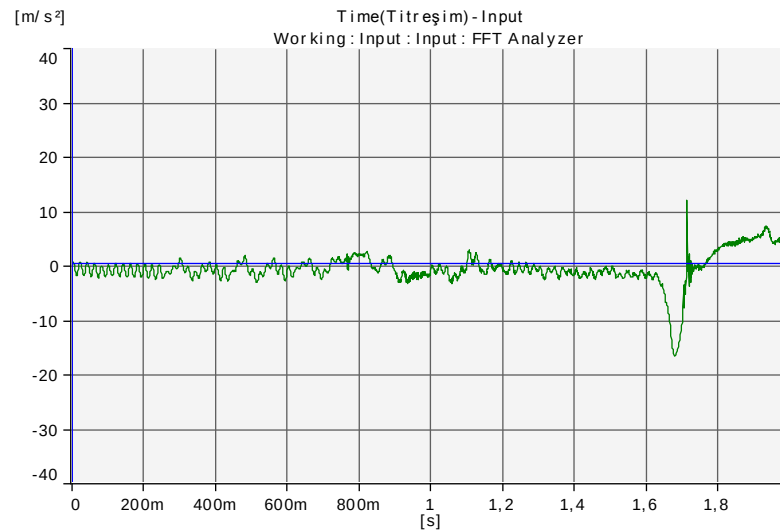
6.3.3 Arka kolda absorber kullanımı durumunda yapılan deneysel titreşim ölçümleri

Arka kolu dengeleme yaysız sistemin, arka kolunun orta ve üst konumuna absorber bağlanarak yapılan deneysel titreşim ölçümleridir.



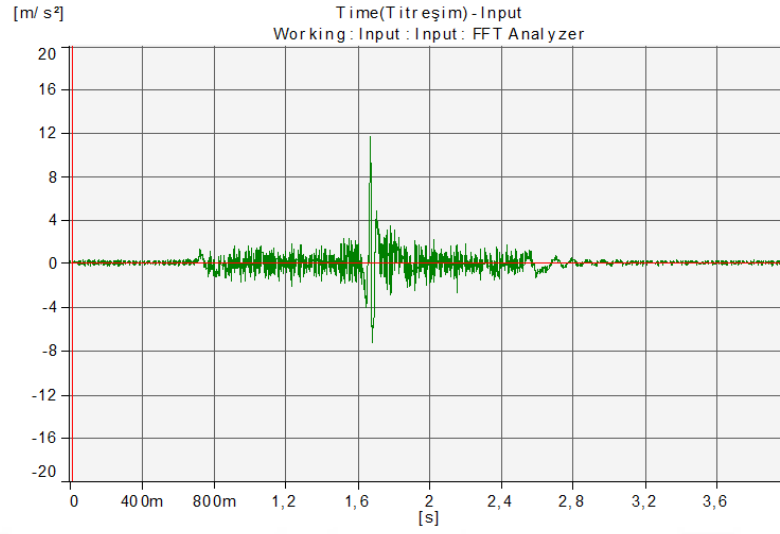
Şekil 6.21 Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $13,40 m/s^2$ dir.



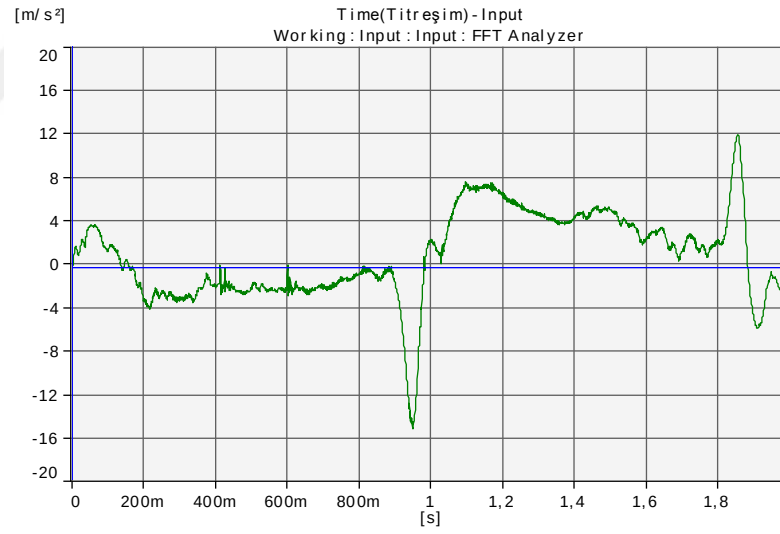
Şekil 6.22 Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $16,80 m/s^2$ dir.



Şekil 6.23 Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli, ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $11,50 \text{ m/s}^2$ dir.

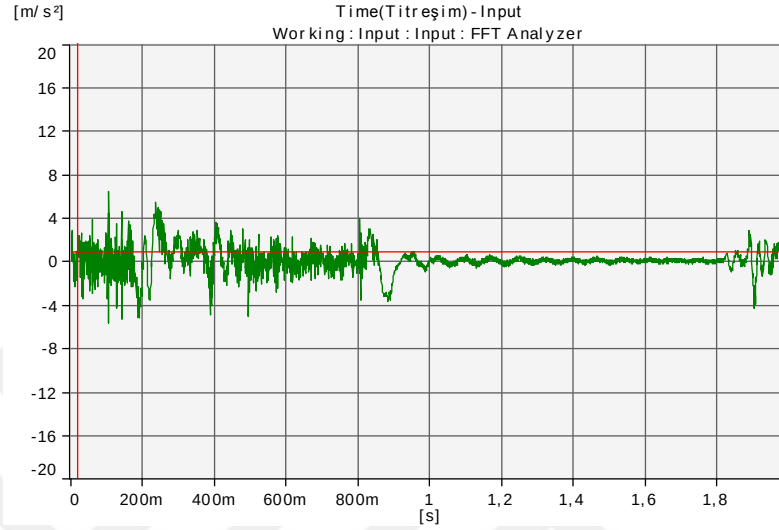


Şekil 6.24 Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $15,20 \text{ m/s}^2$ dir.

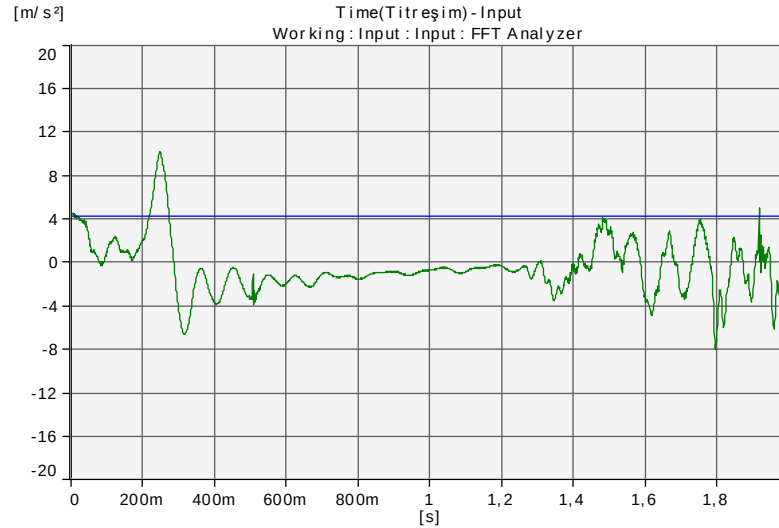
6.3.4 Robotun arka koluna absorber ve dengeleme yayı bağılyken yapılan deneysel titreşim ölçümleri

Sistemin arka koluna dengeleme yayı bağılyken, absorberin arka kol orta ve üst konumları için yapılan titreşim ölçümleridir.



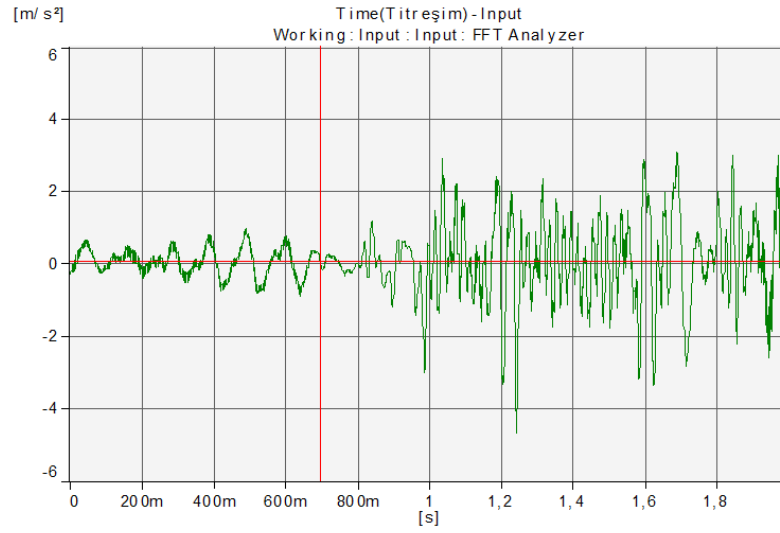
Şekil 6.25 Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 6,34 m/s^2 dir.



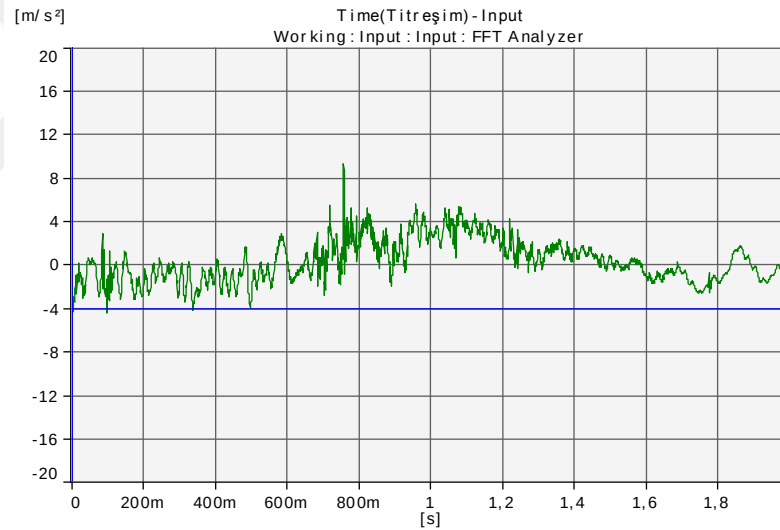
Şekil 6.26 Arka kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 10,00 m/s^2 dir.



Şekil 6.27 Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 4,68 m/s² dir.

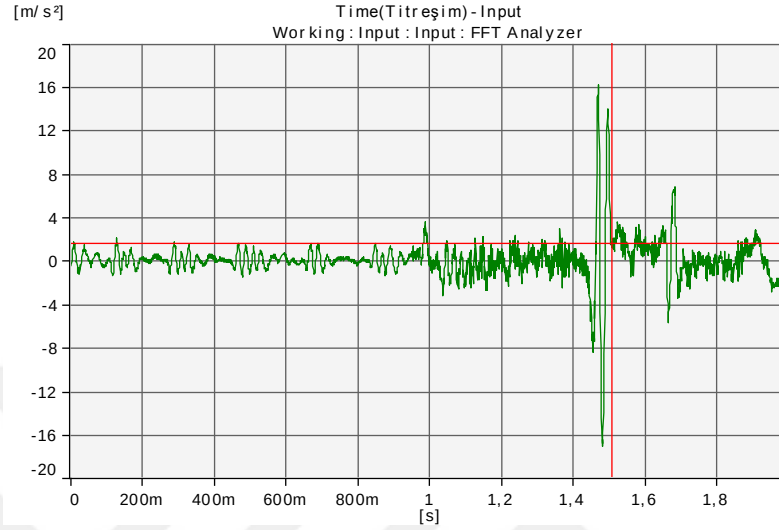


Şekil 6.28 Arka kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli, ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 9,25 m/s² dir.

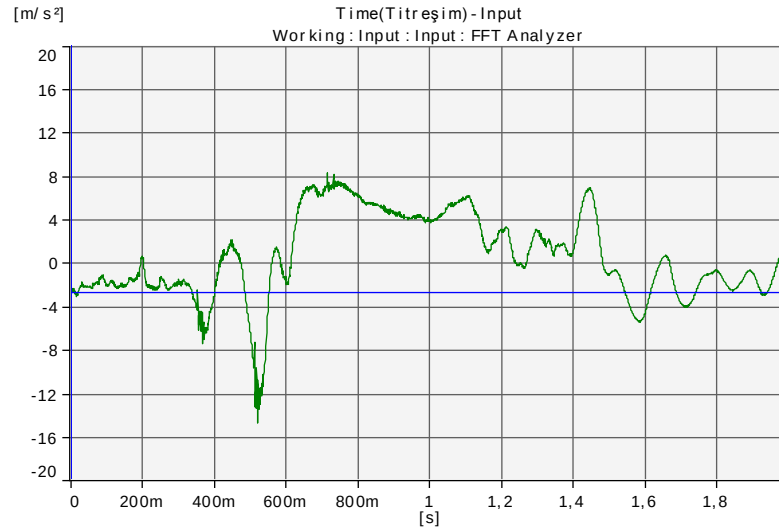
6.3.5 Robotun ön kolunda absorber kullanımı durumunda yapılan deneysel titreşim ölçümleri

Robotun ön kolunun orta ve üst konumuna absorber bağlanıp arka kola dengeleme yayı bağlanmadan yapılan titreşim ölçümleridir.



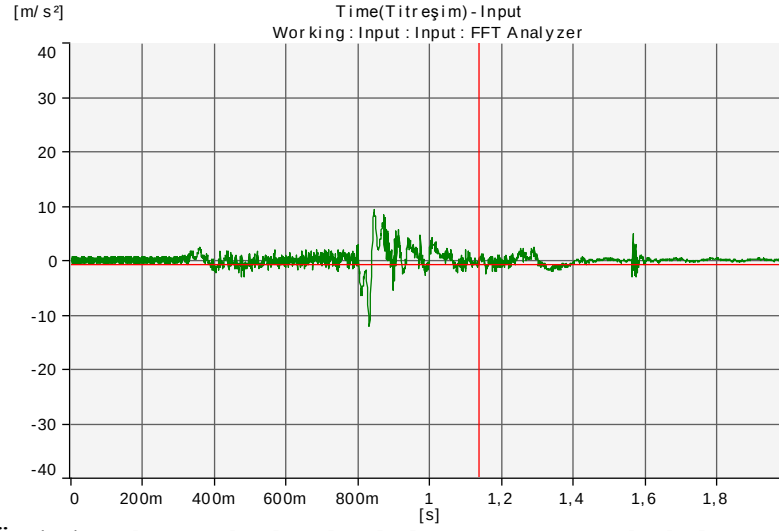
Şekil 6.29 Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli, ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 16,86 m/s^2 dir.



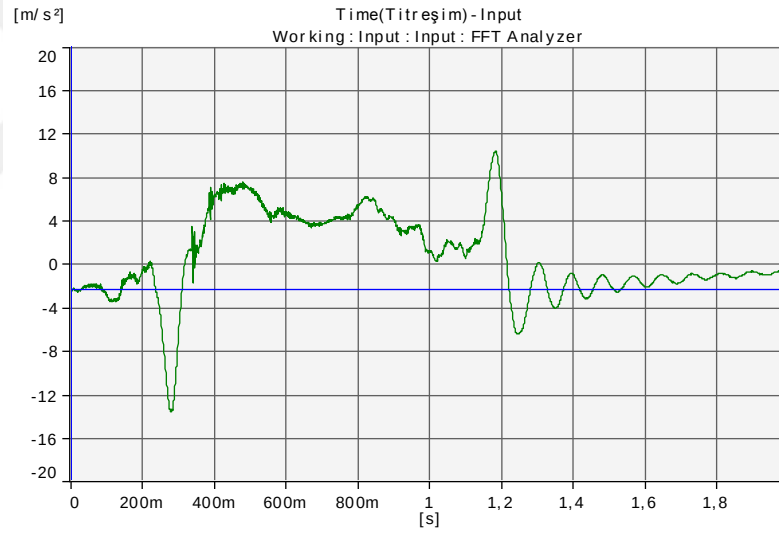
Şekil 6.30 Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 14,8 m/s^2 dir.



Şekil 6.31 Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 12,12 m/s² dir.

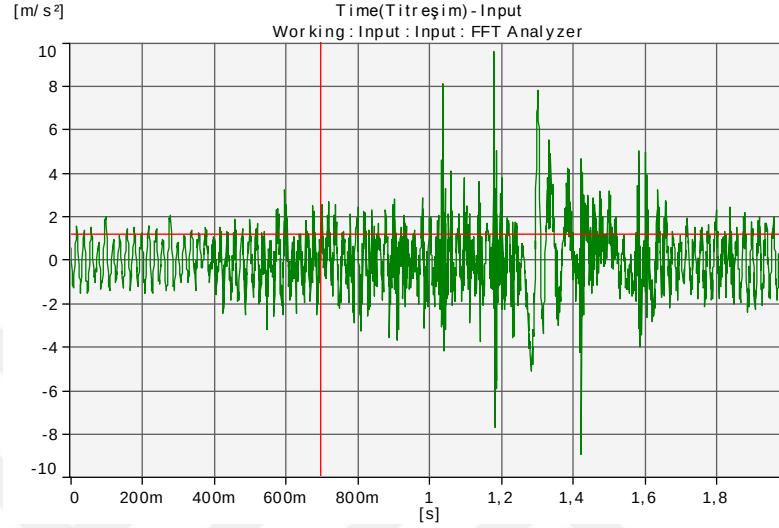


Şekil 6.32 Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 12,40 m/s² dir.

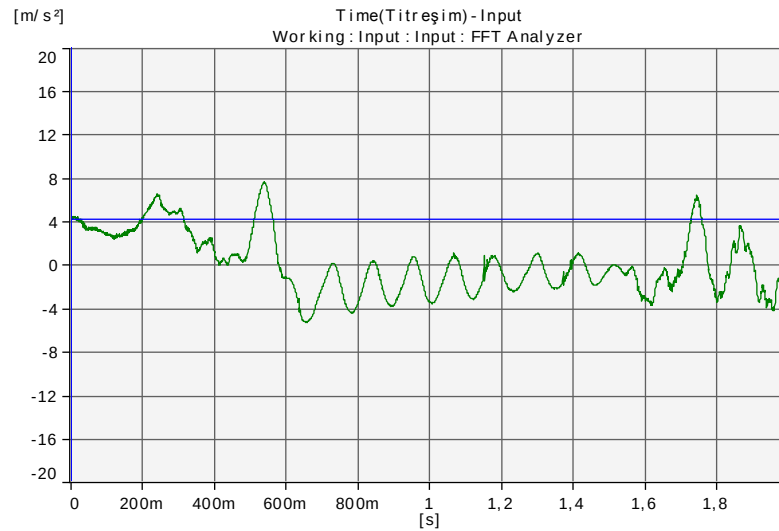
6.3.6 Robotun arka kolunda dengeleme yayı ve ön kolunda absorber bağılyken yapılan titreşim ölçümleri

Robotun ön kolunun orta ve üst konumuna absorber bağlanıp arka kola dengeleme yayı bağlanarak yapılan titreşim ölçümleridir.



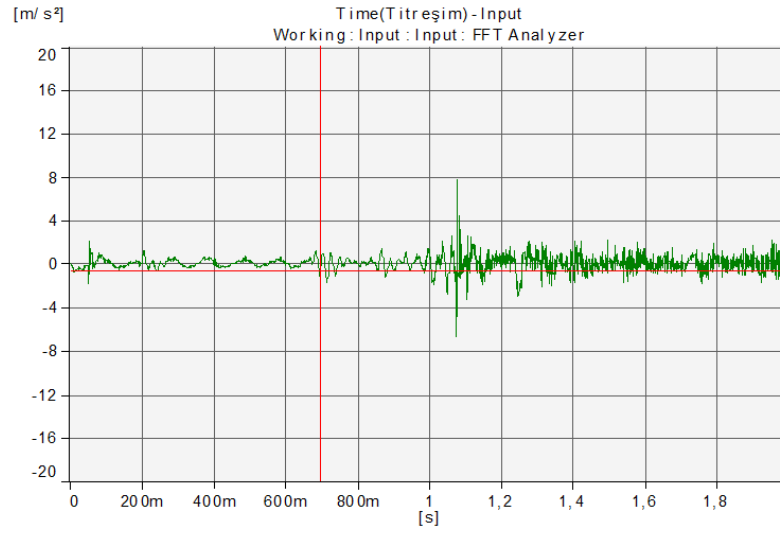
Şekil 6.33 Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 9,54 m/s² dir.



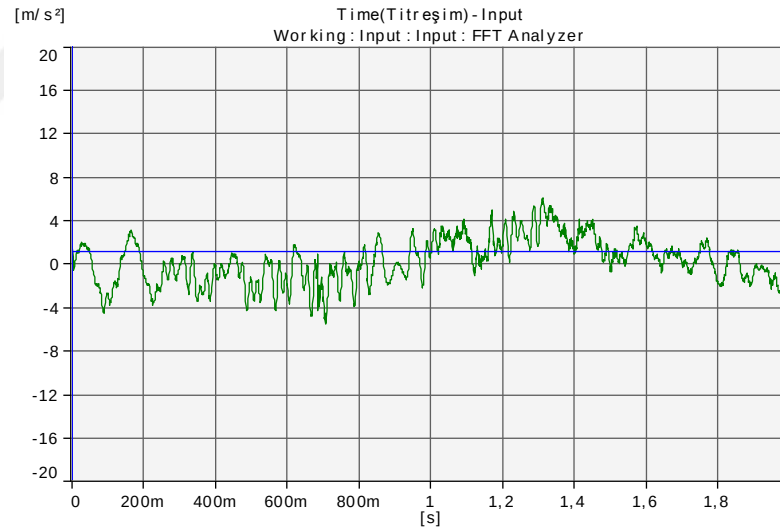
Şekil 6.34 Ön kol orta konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri 7,53 m/s² dir.



Şekil 6.35 Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $7,72 \text{ m/s}^2$ dir.



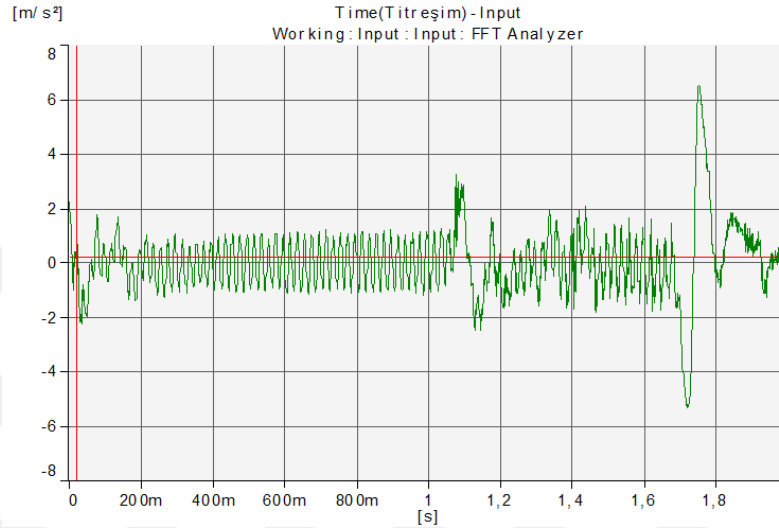
Şekil 6.36 Ön kol üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli, ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $5,93 \text{ m/s}^2$ dir.

6.3.7 Robot kolda çift absorber kullanımı durumunda yapılan analizler

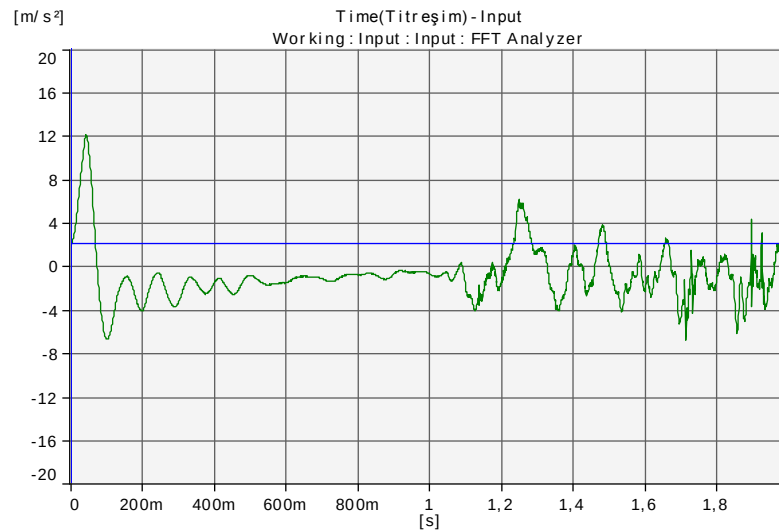
Robotun hem ön kol hem de arka koluna üst konumlarda absorber bağliken ve dengeleme yaysız ve dengeleme yaylı yapılan titreşim ölçümleridir.

Dengeleme yayı bağlanmadan yapılan titreşim ölçümleri;



Şekil 6.37 Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

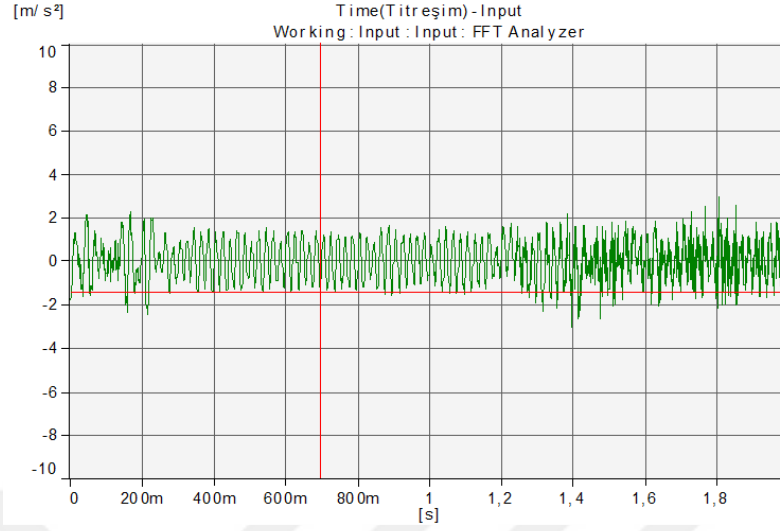
Maksimum titreşim değeri 6,50 m/s² dir.



Şekil 6.38 Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

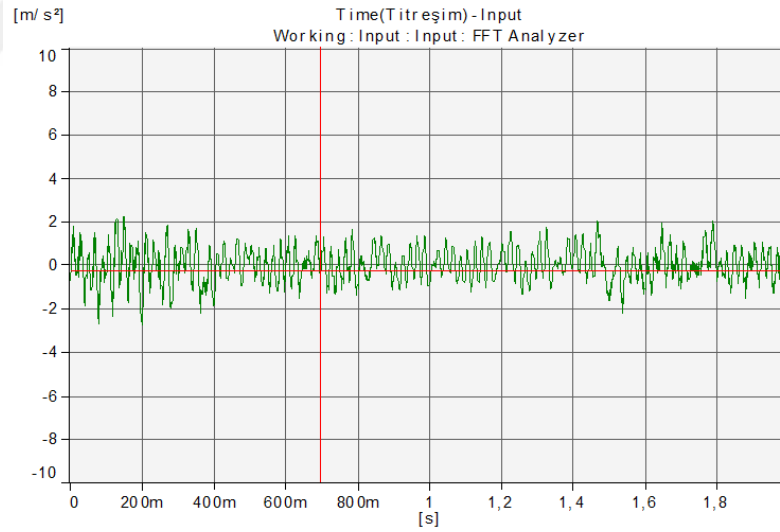
Maksimum titreşim değeri 12,10 m/s² dir.

Sistemin arka koluna dengeleme yayı bağlanması durumunda yapılan ölçümler;



Şekil 6.39 Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin arka kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $2,95 m/s^2$ dir.



Şekil 6.40 Her iki kolunun üst konumunda absorber bulunan sistemin ön kolunun lineer ölçekli ivme genlikli titreşim değerleri.

Maksimum titreşim değeri $2,66 m/s^2$ dir.

7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER

Deneysel titreşim ölçümleri, dengeleme yayı ve absorberin kullanılmasına bağlı olarak birkaç durum için sonuçlandırılmıştır. Çizelge 7.1, Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3 de 2R robot kolun deneysel ölçüm sayısal titreşim sonuçlarını dengeleme yayı ve dinamik titreşim absorberinin kullanımına bağlı olarak ön ve arka kol titreşim değerlerini göstermektedir.



7.1 Robot Kolda Absorber Kullanımı

Çizelge 7.1 2R robot kola absorber eklenerek elde edilen titreşim değerleri.

Durumlar	Arka Kol Max.Titreşim Değeri	Ön Kol Max.Titreşim Değeri
Absorbersiz ve dengeleme yaysız sistem	27,00 m/s ²	25,80 m/s ²
Arka kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı yok)	13,40 m/s ²	16,80 m/s ²
Arka kolun üst konumuna absorber bağlanması halinde (Dengeleme yayı yok)	11,50 m/s ²	15,20 m/s ²
Arka kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı var)	6,34 m/s ²	10,00 m/s ²
Arka kolun üst konumuna absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı var)	4,68 m/s ²	9,25 m/s ²
Ön kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı yok)	16,86 m/s ²	14,80 m/s ²
Ön kolun üst konumuna absorber bağlanması halinde (Dengeleme yayı yok)	12,12 m/s ²	13,60 m/s ²
Ön kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı var)	9,54 m/s ²	7,55 m/s ²
Ön kolun üst konumuna absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı var)	7,72 m/s ²	5,93 m/s ²
Ön kol ve arka kola absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı yok)	6,50 m/s ²	12,10 m/s ²
Ön kol ve arka kola absorber eklenmesi halinde (Dengeleme yayı var)	2,95 m/s ²	2,66 m/s ²

Çizelge 7.1 e göre dengeleme yaysız sistemde absorber kullanımı absorberin kollara bağlanma konumlarına göre değerlendirildiğinde; arka kol ve ön kolun üst konumlarında iken titreşim değerlerini daha çok düşürmüştür.

7.2 Robot Kolda Dengeleme Yayı Kullanımı

Çizelge 7.2 Dengeleme yaylı deneysel ölçüm sayısal titreşim sonuçları.

Durumlar		Arka Kol Max.Titreşim Değeri	Ön Kol Max.Titreşim Değeri
Dengeleme yayı yok	Absorbersiz ve dengeleme yaysız sistem	27,00 m/s ²	25,80 m/s ²
	Arka kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde	13,40 m/s ²	16,80 m/s ²
	Arka kolun üst konumuna absorber bağlanması halinde	11,50 m/s ²	15,20 m/s ²
	Ön kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde	16,86 m/s ²	14,80 m/s ²
	Ön kolun üst konumuna absorber bağlanması halinde	12,12 m/s ²	13,60 m/s ²
	Ön kol ve arka kola absorber eklenmesi halinde	6,50 m/s ²	12,10 m/s ²
Dengeleme yayı var	Arka kola dengeleme yayı eklenmesi halinde	20,8 m/s ²	18,50 m/s ²
	Arka kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde	6,34 m/s ²	10,00 m/s ²
	Arka kolun üst konumuna absorber eklenmesi halinde	4,68 m/s ²	9,25 m/s ²
	Ön kolun orta konumuna absorber eklenmesi halinde	9,54 m/s ²	7,55 m/s ²
	Ön kolun üst konumuna absorber eklenmesi halinde	7,72 m/s ²	5,93 m/s ²
	Ön kol ve arka kola absorber eklenmesi halinde	2,95 m/s ²	2,66 m/s ²

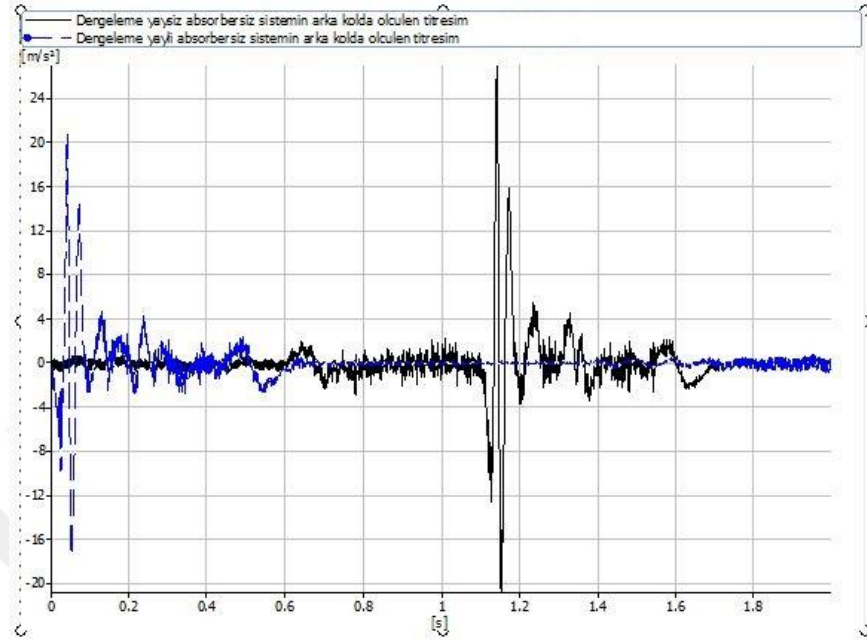
Sonuçlar Çizelge 7.2 e göre değerlendirildiğinde robot kola absorber bağlamadan dengeleme yayı eklenmesi robotun ön ve arka kolundaki titreşim değerlerini düşürmüştür. Dengeleme yayı arka kolun rijitliğini arttırıp hareket kabiliyetini sınırladığı titreşim değerlerinin düşmesinde etkili olmuştur.

Çizelge 7.3 te deneysel çalışmalarda 2R robot kolun titreşim analizi yapılan bütün durumlarının sayısal titreşim sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 7.3 Deneysel ölçüm sayısal titreşim sonuçları.

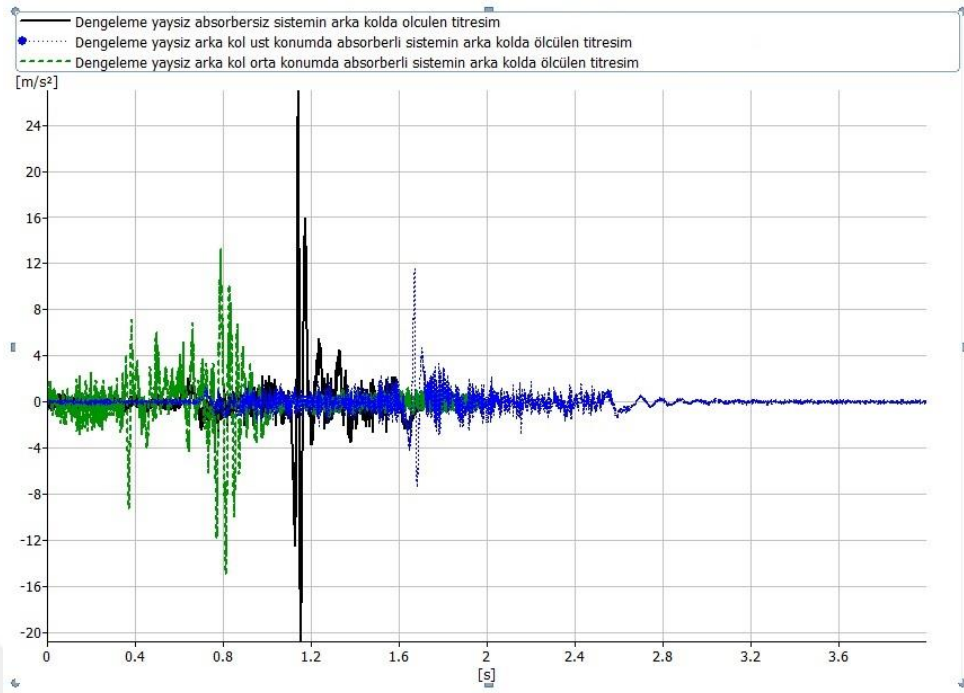
Durumlar			Arka Kol Max.Titreşim Değeri	Ön Kol Max.Titreşim Değeri
2R Robot Kol Sistemi	Dengeleme Yaysız		27,00 m/s ²	25,80 m/s ²
	Dengeleme Yaylı		20,80 m/s ²	18,50 m/s ²
Absorber Arka Kolda	Dengeleme Yaysız	Absorber Orta Konumda	13,40 m/s ²	16,80 m/s ²
		Absorber Üst Konumda	11,50 m/s ²	15,20 m/s ²
	Dengeleme Yaylı	Absorber Orta Konumda	6,34 m/s ²	10,00 m/s ²
		Absorber Üst Konumda	4,68 m/s ²	9,25 m/s ²
	Dengeleme Yaysız	Absorber Orta Konumda	16,86 m/s ²	14,80 m/s ²
		Absorber Üst Konumda	12,12 m/s ²	13,60 m/s ²
Absorber Ön Kolda	Dengeleme Yaylı	Absorber Orta Konumda	9,54 m/s ²	7,53 m/s ²
		Absorber Üst Konumda	7,72 m/s ²	5,93 m/s ²
	Dengeleme Yaysız		6,50 m/s ²	12,10 m/s ²
	Dengeleme Yaylı		2,95 m/s ²	2,66 m/s ²

7.3 Sistemin Arka Kolunun Farklı Durumlara Göre Titreşim Karşılaştırma Grafikleri



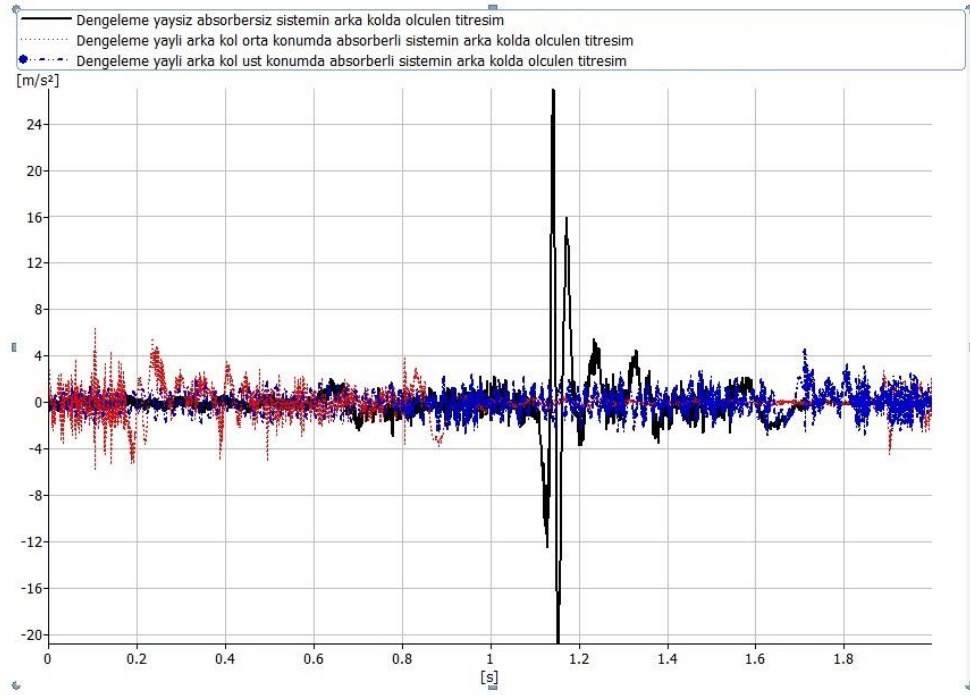
Şekil 7.1 Arka kolun dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.1 değerlendirildiğinde arka kolda absorbersiz dengeleme yayı kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerini % 22.96 düşürmüştür.



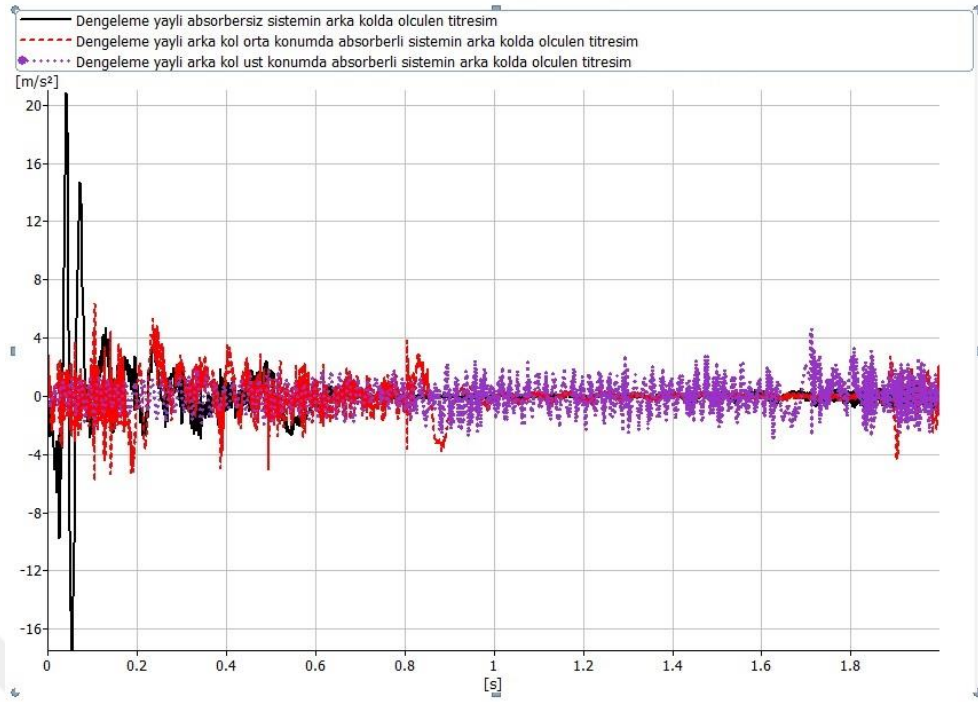
Şekil 7.2 Dengeleme yaysız arka kolda absorber bulunan sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.2 değerlendirildiğinde arka kolda dengeleme yaysız absorber kullanımı arka kolun titreşim değerlerini, absorber arka kolda orta konumda iken maksimum titreşim değerini % 50.37, absorber arka kolda üst konumda iken maksimum titreşim değerini % 57.41 oranında düşürmüştür. Dengeleme yaysız sistemde arka kolda üst konumda absorber kullanımı maksimum titreşim değerlerinin daha büyük bir oranda düşmesini sağlamıştır.



Şekil 7.3 Dengeleme yaylı arka kolda absorber bulunan sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

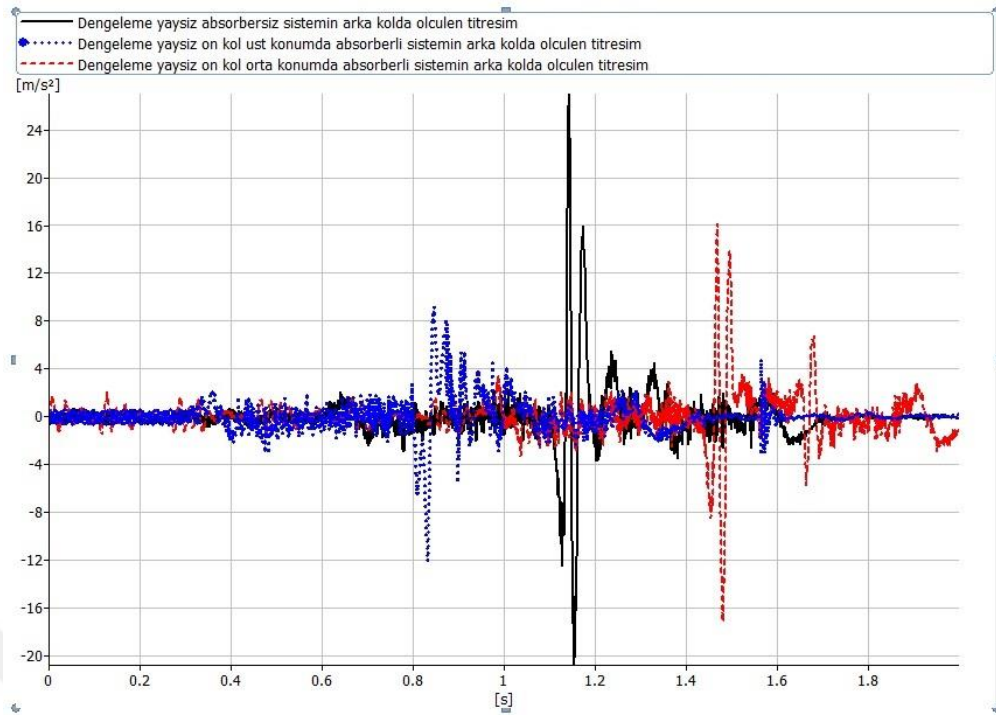
Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.3 değerlendirildiğinde dengeleme yaylı sistemde arka kolda absorber kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerlerini; absorber arka kolda orta konumda iken % 76.52, absorber arka kolda üst konumda iken % 82.67 oranında düşürmüştür. Dengeleme yaylı sistemin arka kolunun üst konumunda absorber kullanımı titreşim değerlerinin düşme oranlarını artırmıştır.



Şekil 7.4 Dengeleme yaylı arka kolda absorber bulunan sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

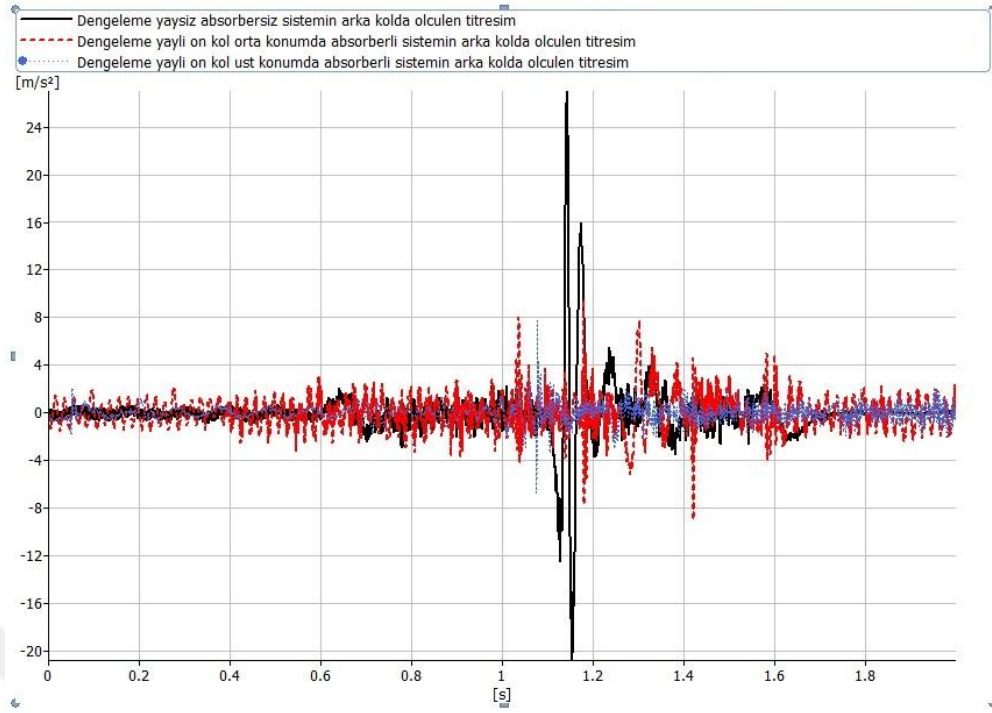
Şekil 7.4 te dengeleme yaylı absorbersiz sistemdeki arka kol titreşim değeri dengeleme yaylı arka kolda orta ve üst konumda absorber kullanılan sistemdeki arka kol titreşim değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.4 değerlendirildiğinde, dengeleme yaylı sistemde arka kolda absorber kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerlerini, absorber arka kolda orta konumda iken % 69.52, absorber arka kolda üst konumda iken % 77.50 oranında düşürmüştür.



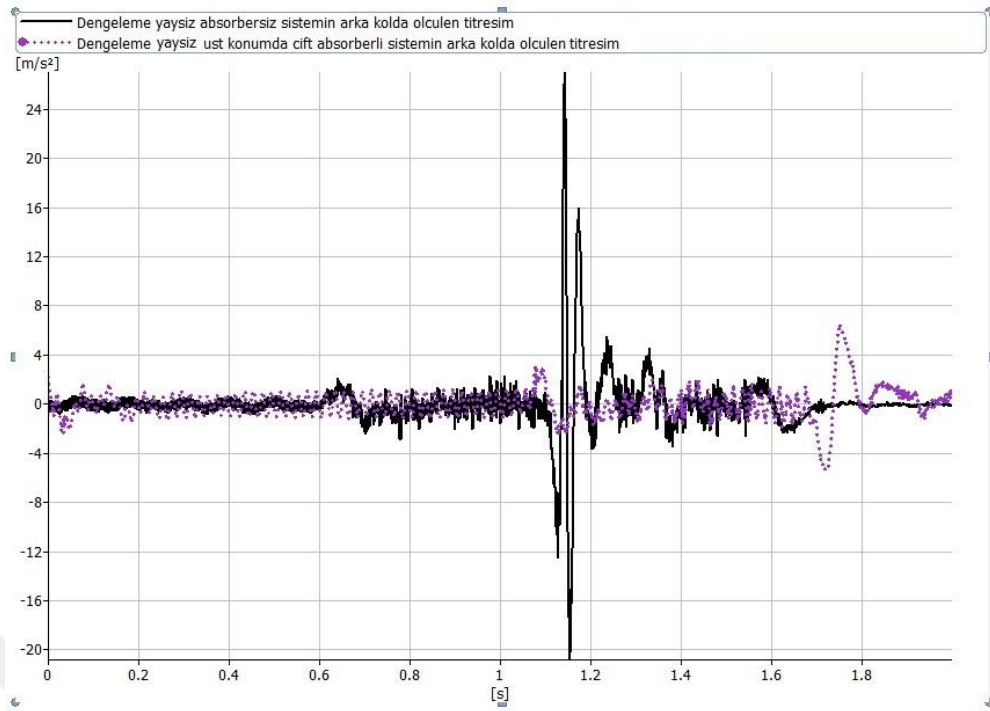
Şekil 7.5 Dengeleme yaysız ön kolda absorber bulunan sistemin arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.5 değerlendirildiğinde dengeleme yaysız sistemde ön kolda absorber kullanımı arka koldaki titreşim değerlerini, , absorber ön kolda orta konumda iken % 37.56, absorber ön kolda üst konumda iken % 55.11 oranında düşürmüştür. Sistemin ön kol üst konumda absorber kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerini daha büyük bir oranda düşürmüştür.



Şekil 7.6 Dengeleme yaylı ön kolda absorber bulunan sistemin arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

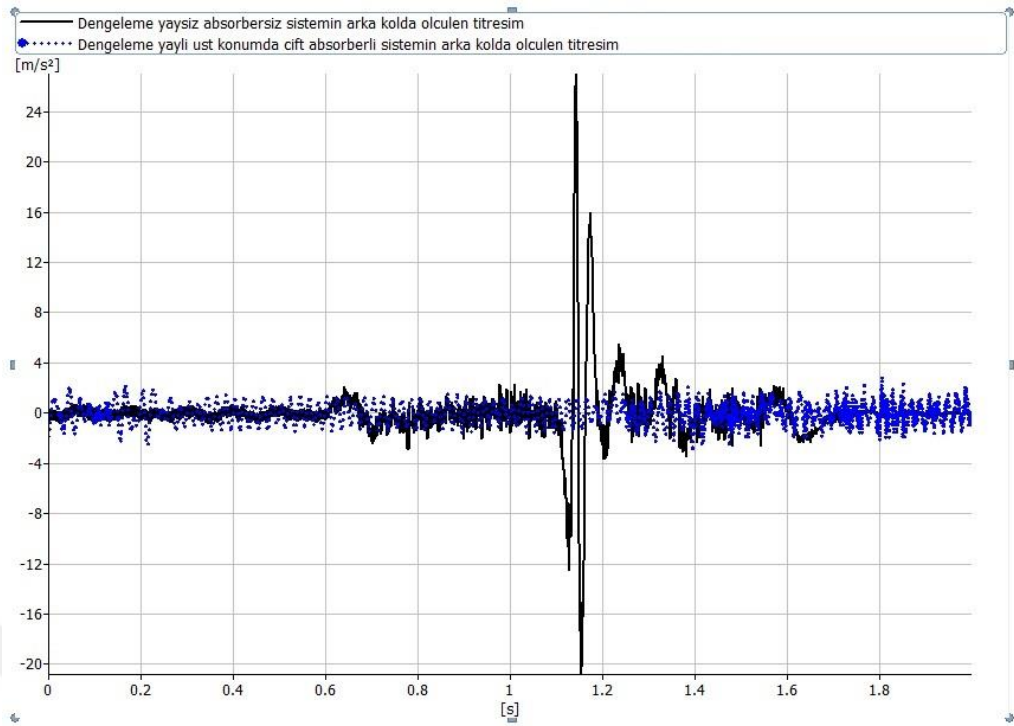
Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.6 değerlendirildiğinde dengeleme yaylı sistemde ön kolda absorber kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerlerini; absorber ön kolda orta konumda iken % 64.67, absorber ön kolda üst konumda iken % 71.41 oranında düşürdüğü görülmüştür. Dengeleme yaylı sistemde ön kol üst konumda absorber kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerlerini daha büyük bir oranda düşürmüştür.



Şekil 7.7 Dengeleme yaysız çift absorberli sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Dengeleme yaysız ve çift absorber kullanılan sistemde arka kol titreşim değerleri ile dengeleme yaysız absorbersiz sistemdeki arka kol titreşim değerleri Şekil 7.7 de karşılaştırılmıştır.

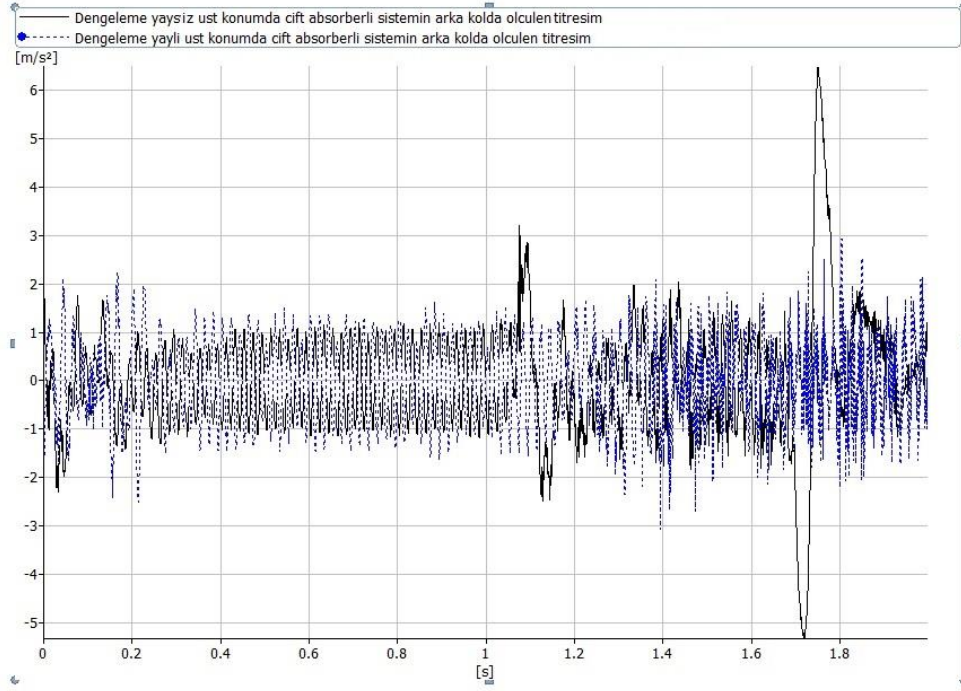
Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.7 değerlendirildiğinde, dengeleme yaysız çift absorberli sistemde arka kol maksimum titreşim değerlerini % 75.93 oranında düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 7.8 Dengeleme yaylı çift absorberli sistemde arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Dengeleme yaylı çift absorber kullanılan sistemde arka kol titreşim değerleri ile dengeleme yaysız absorbersiz sistemdeki arka kol titreşim değerleri Şekil 7.8 de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.8 değerlendirildiğinde, dengeleme yaylı çift absorberli sistemde arka kol maksimum titreşim değerini % 89.07 oranında düşürdüğü görülmektedir. Dengeleme yaylı sistemin ön ve arka kollarının üst konumlarında absorber kullanımı arka koldaki maksimum titreşim değerlerini en büyük oranda düşürmüştür.

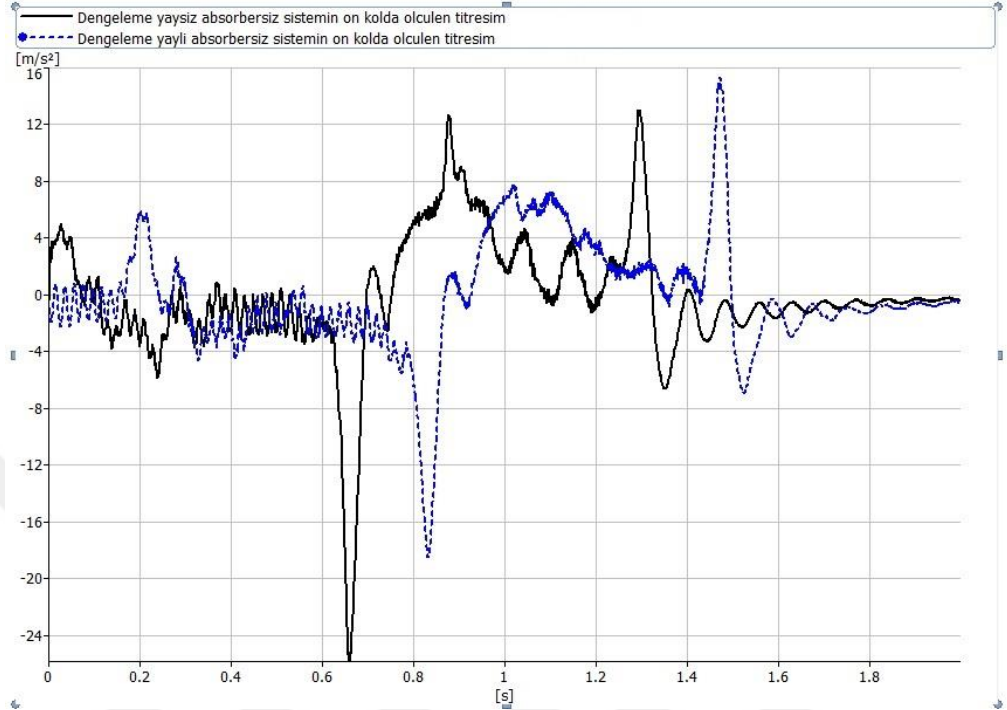


Şekil 7.9 Dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız çift absorberli sistemin arka kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Dengeleme yaylı çift absorber kullanılan sistemde arka kol titreşim değerleri ile dengeleme yaysız çift absorber kullanılan sistemdeki arka kol titreşim değerleri Şekil 7.9 de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.9 değerlendirildiğinde, dengeleme yaylı çift absorberli sistemde arka kol maksimum titreşim değerini % 54.62 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir. Dengeleme yaylı sistemde ön ve arka kolların üst konumlarında absorber kullanımı dengeleme yaysız çift absorberli sisteme göre arka koldaki maksimum titreşim değerlerinin düşmesinde belirgin bir etki göstermiştir.

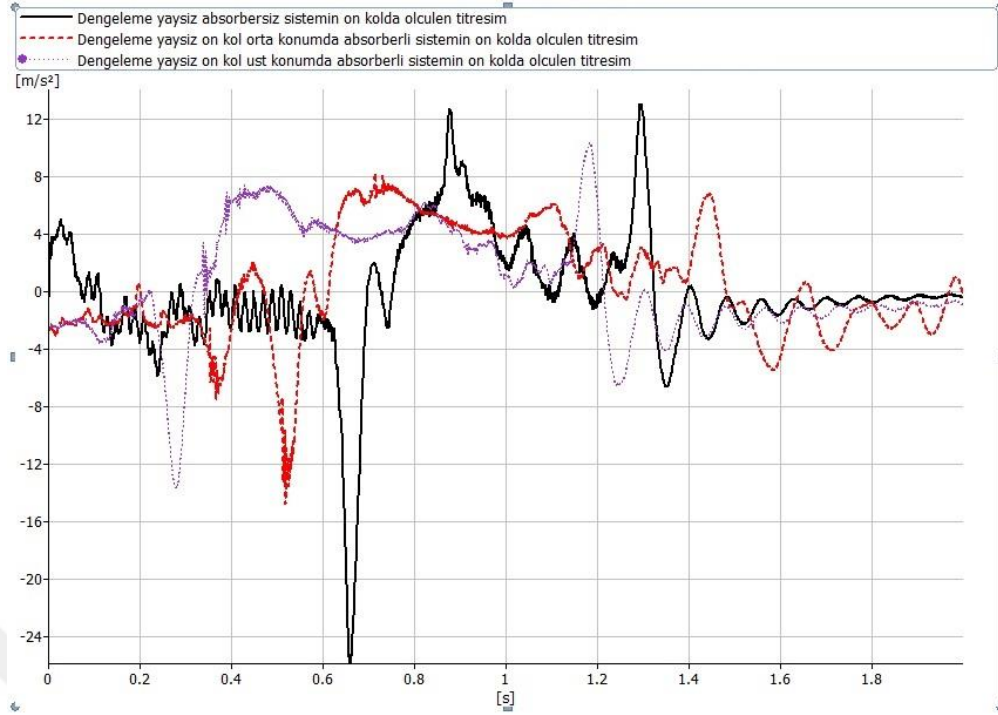
7.4 Sistemin Ön Kolunun Farklı Durumlara Göre Titreşim Karşılaştırma Grafikleri



Şekil 7.10 Arka kolu dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız sistemin ön kolunun titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.10 da sistemin arka koluna dengeleme yayı bağlı olduğu ve bağlı olmadığı durumlar için ön koldaki titreşimler karşılaştırılmıştır.

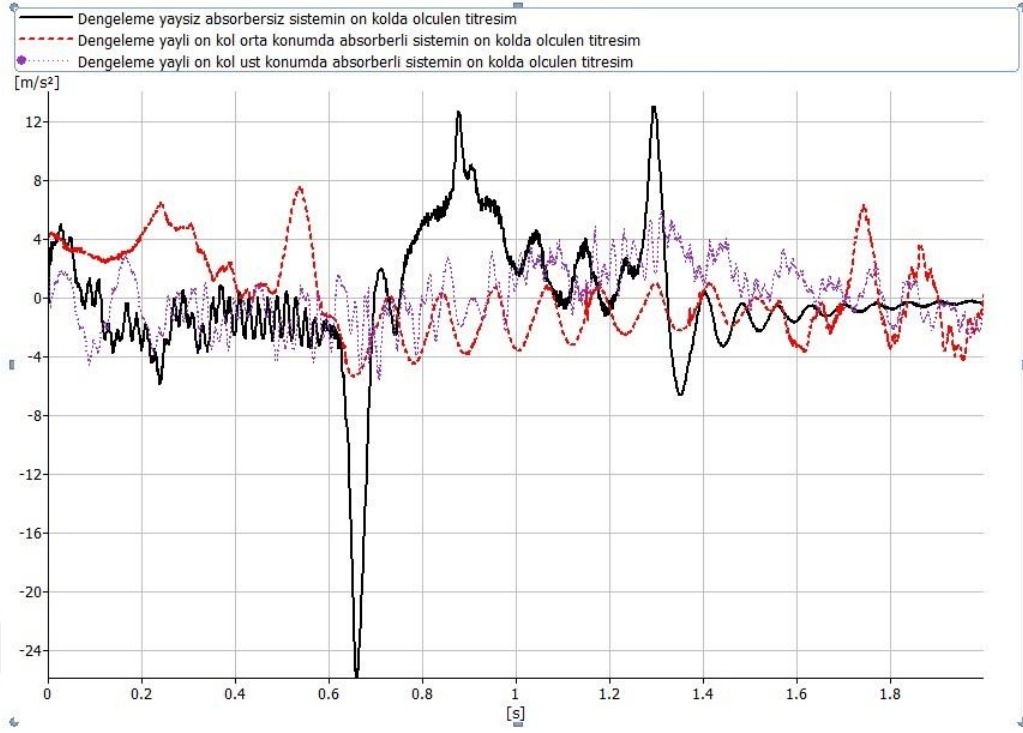
Çizelge 7.2 e göre Şekil 7.10 değerlendirildiğinde, ön koldaki maksimum titreşim değerleri % 28.29 oranında düşmüştür. Dengeleme yayı arka kolun hareketliliğini sınırlandırıp rijitliğini arttırdığı için ön kolun maksimum titreşim değerinin düşmesini sağlamıştır.



Şekil 7.11 Arka kolu dengeleme yaysız ön kolu absorberli sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.11 de arka kola dengeleme yayı bağlanmadan ön kola orta ve üst konumlarda absorber bağlanarak ön kolda oluşan titreşimler karşılaştırılmıştır.

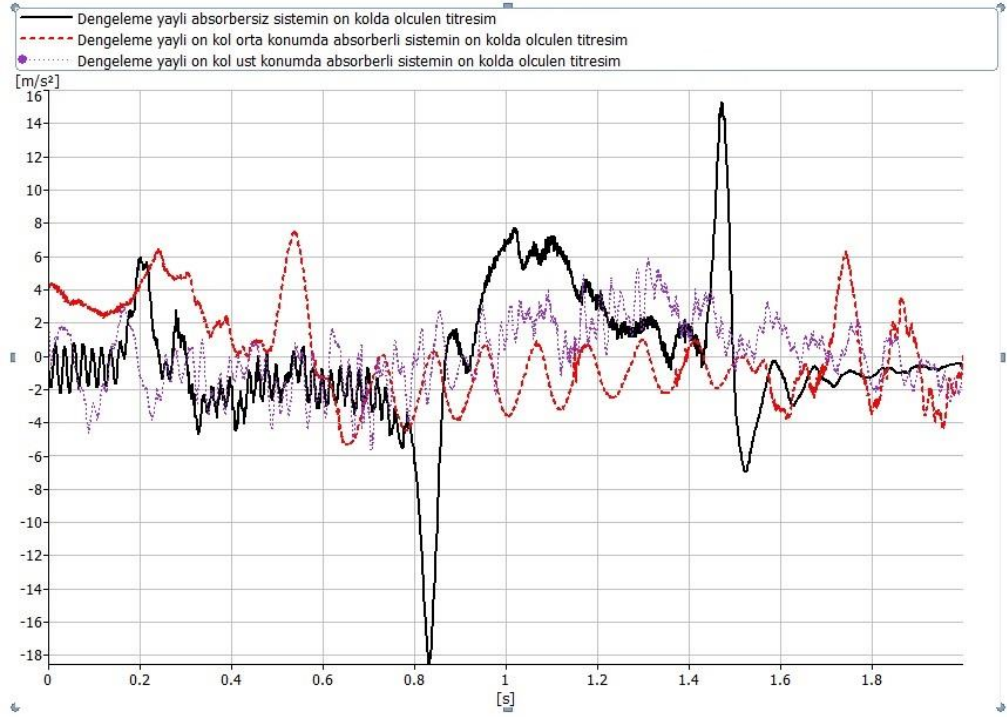
Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.11 değerlendirildiğinde ön kolda dengeleme yaysız absorber kullanımı ön kolun maksimum titreşim değerlerini, absorber ön kolda orta konumda iken % 42.64, absorber ön kolda üst konumda iken % 47.29 oranında düşmüştür. Ön kol üst konumda absorber kullanımı, ön kol orta konumda absorber kullanımına göre maksimum titreşim değerlerinin düşmesinde daha etkili olmuştur.



Şekil 7.12 Dengeleme yaylı ön kolda absorber bulunan sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.12 de arka kola dengeleme yayı bağlanan sistemde ön kola orta ve üst konumlarda absorber bağlanarak sistemin dengeleme yaysız absorbersiz ön kolundaki titreşim değerleri karşılaştırılmıştır.

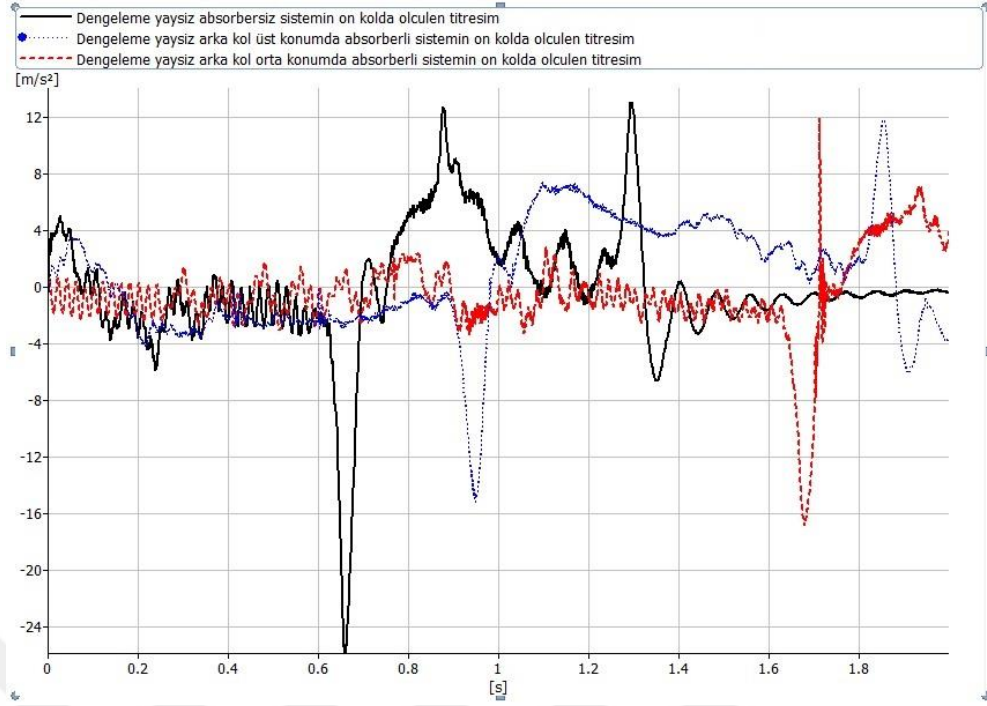
Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.12 değerlendirildiğinde ön kolda dengeleme yaylı absorber kullanımı ön kolun maksimum titreşim değerlerini, absorber ön kolda orta konumda iken % 70.81, absorber ön kolda üst konumda iken % 77.02 oranında düşmüştür. Sistemin arka koluna dengeleme yayı bağlıyken ön kol üst konumda absorber kullanımı ön kolun maksimum titreşim değerlerinin daha büyük bir oranda düşmesini sağlamıştır.



Şekil 7.13 Dengeleme yaylı ön kolda absorber bulunan sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.13 de arka kola dengeleme yayı bağlanan sistemde ön kola orta ve üst konumlarda absorber bağlanarak, dengeleme yaylı sistemdeki ön kol titreşim değerleri karşılaştırılmıştır.

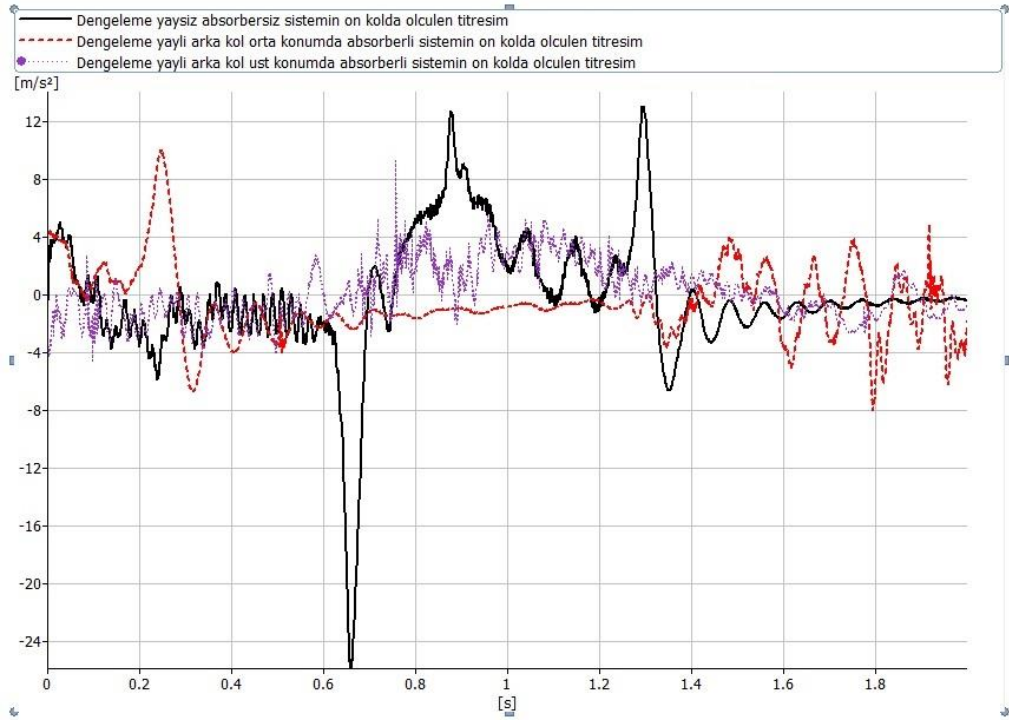
Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.13 değerlendirildiğinde ön kolda dengeleme yaylı absorber kullanımı dengeleme yaylı absorbersız sistemdeki ön kolun maksimum titreşim değerlerini, absorber ön kolda orta konumda iken % 59.30, absorber ön kolda üst konuma iken % 67.95 oranında düşürmüştür.



Şekil 7.14 Dengeleme yaysız arka kolda absorber bulunan sistemin ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.14 te dengeleme yaysız arka kolda orta ve üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolundaki titreşim değerleri dengeleme yaysız absorbersiz sistemdeki ön kol titreşim değeri ile karşılaştırılmıştır.

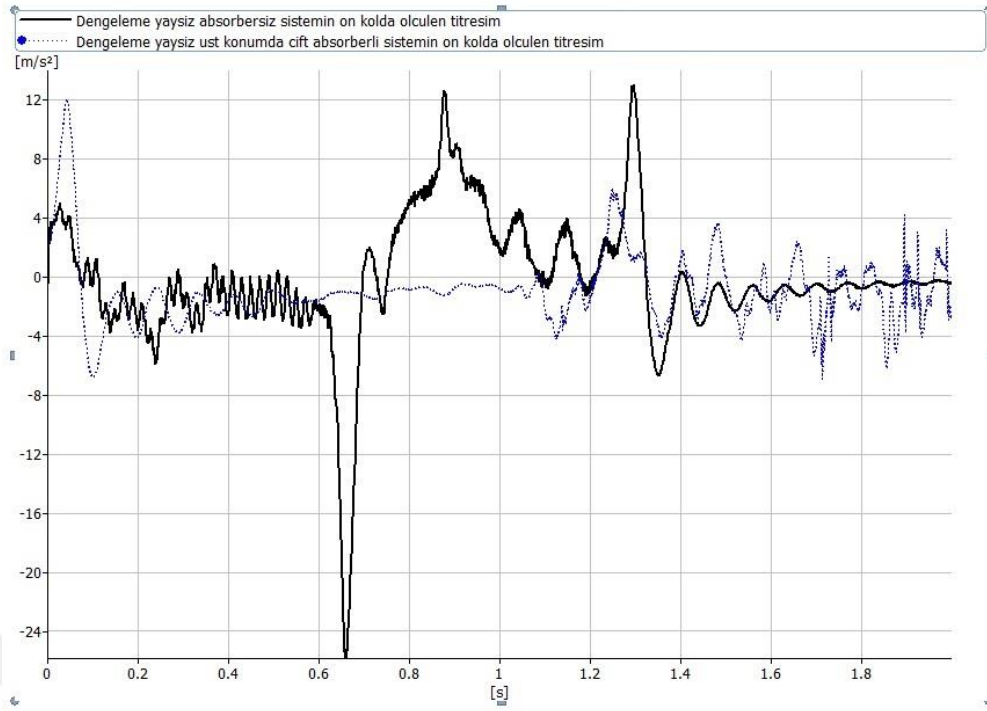
Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.14 değerlendirildiğinde ön koldaki maksimum titreşim değerleri dengeleme yaysız absorber arka kol orta konumda iken % 34.88, dengeleme yaysız absorber arka kol üst konumda iken % 41.09 oranında düşmüştür.



Şekil 7.15 Dengeleme yaylı arka kolda absorber bulunan sistemin ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.15 te dengeleme yaylı arka kolda orta ve üst konumda absorber bulunan sistemin ön kolundaki titreşim değerleri, dengeleme yaysız absorbersız sistemdeki ön kol titreşim değeri ile karşılaştırılmıştır.

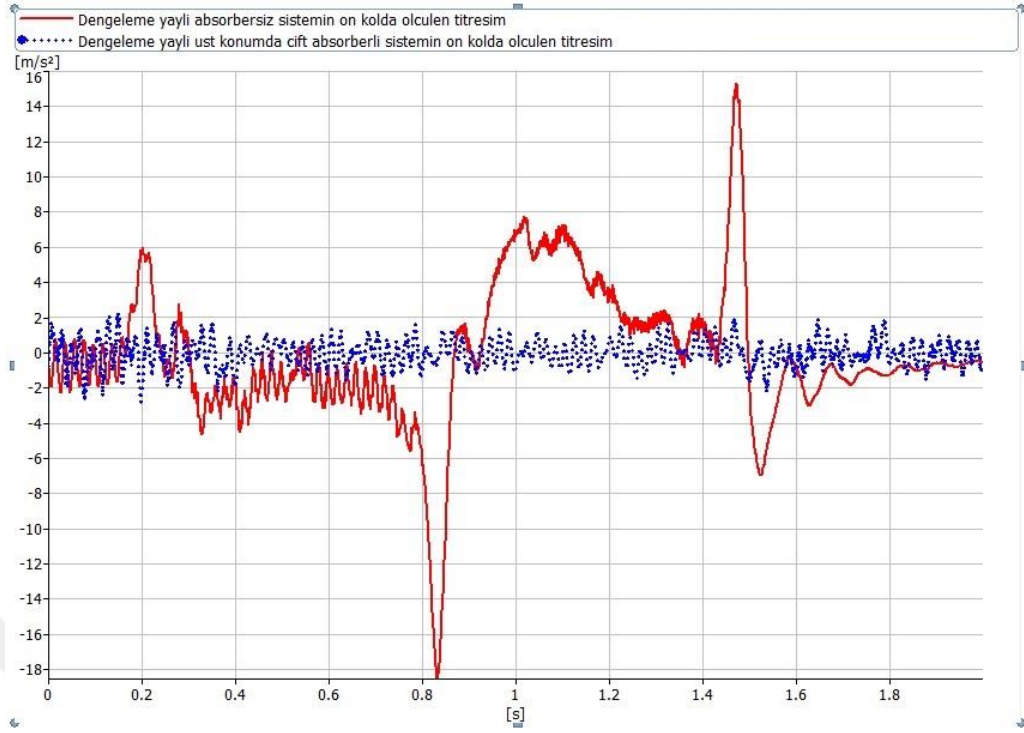
Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.15 değerlendirildiğinde ön koldaki maksimum titreşim değerleri dengeleme yaylı sistemde absorber arka kol orta konumda iken % 61.24, dengeleme yaylı sistemde absorber arka kol üst konumda iken % 64.15 oranında düşmüştür. Dengeleme yaylı arka kolda absorber kullanılan sistemin, dengeleme yaysız absorbersız sisteme göre ön kol maksimum titreşim değerlerini belirgin bir şekilde düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 7.16 Dengeleme yaysız çift absorberli sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Dengeleme yaysız ve çift absorber kullanılan sistemde ön kol titreşim değerleri ile dengeleme yaysız absorbersiz sistemdeki ön kol titreşim değerleri Şekil 7.16 de karşılaştırılmıştır.

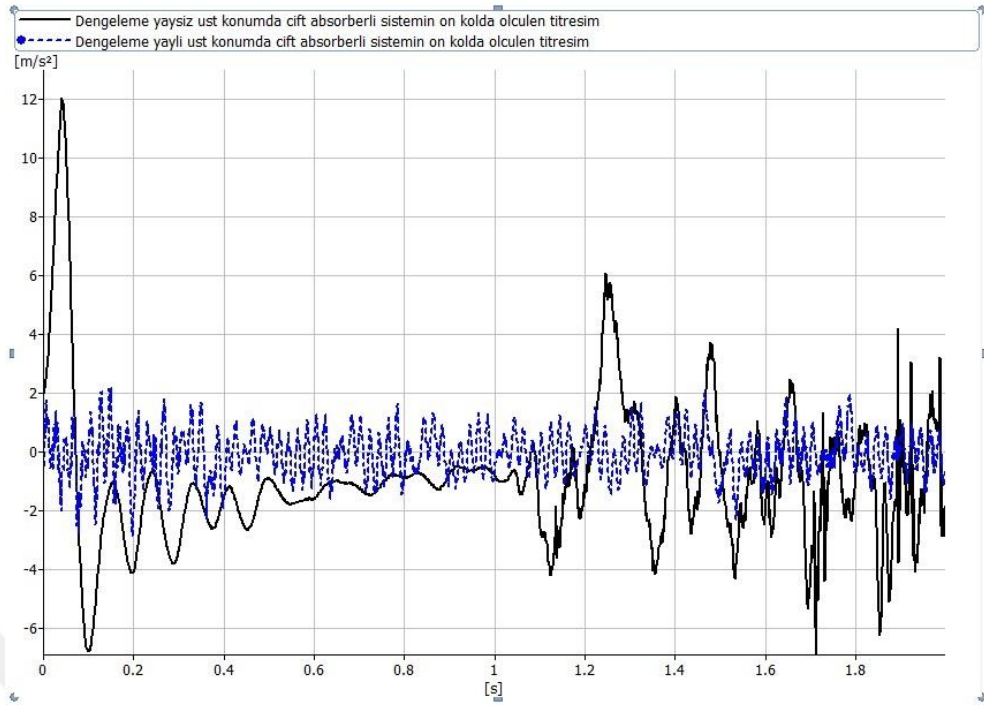
Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.15 değerlendirildiğinde, dengeleme yaysız çift absorberli sistemde ön kol maksimum titreşim değerini % 53.10 oranında düşmüştür.



Şekil 7.17 Dengeleme yaylı çift absorberli sistemde ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Dengeleme yaylı ve çift absorber kullanılan sistemde ön kol titreşim değerleri ile dengeleme yaylı absorbersiz sistemdeki ön kol titreşim değerleri Şekil 7.17 de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.17 değerlendirildiğinde, dengeleme yaylı çift absorberli sistemde ön kol maksimum titreşim değeri % 85.62 oranında düşmüştür.



Şekil 7.18 Dengeleme yaylı ve dengeleme yaysız çift absorberli sistemin ön kol titreşim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.18 dengeleme yaylı çift absorberli sistemdeki ön kol titreşim değerleri dengeleme yaysız çift absorberli sistemdeki ön kol titreşim değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.3 e göre Şekil 7.18 değerlendirildiğinde, dengeleme yaysız çift absorberli sistemde ön kol maksimum titreşim değeri dengeleme yaylı çift absorberli sistemdeki ön kol maksimum titreşim değerini % 78.02 oranında düşmüştür.

Deneysel çalışmalarda kullanılan motorların robot kolların belirli bir konumda bekletilmesi sırasında pozisyonlarını koruyabilmek için zorlayıcı harekete ters yönde dönmeye çalışmaktadırlar. Bu durum motorların daha çok akım çekerek ısınmalarına ve sistemin bekleme konumlarında titremesine sebep olmaktadır. Ayrıca bu motorlar uzun süreli çalışmalarda kullanılmaya uygun değildir. Tasarımı ve üretimi yapılan robot kolun montaj, programlama ve deneysel çalışmalarda toplam 12 adet motor bozulmuş ve yenisi ile değiştirilmiştir. Zaman ve para kaybına sebebiyet vermemek için tutma torkları daha iyi, manyetik pozisyonlu enkodere sahip hibrit motorların kullanılması robotların çalışma süreleri ve performanslarını iyileştirecektir.

7.5 Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

Boyutları, ağırlıkları ve kütle atalet momentleri aynı olmasına rağmen, sayısal analiz ile robot kolun konum ve açısal hız değişimi, deneysel analiz ile robot kolun titreşim değerleri incelenmiştir. Her ikisinde de dengeleme yayı ve/veya dinamik titreşim absorberi kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Bu nedenle sayısal ve deneysel analiz sonuçları aşağıda ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

7.5.1 Sayısal sonuçların değerlendirilmesi

Periyodik yük altındaki 2R robot kolun Lagrange-Euler formülasyonları ile elde edilen hareket denklemlerinin Mathcad programı yardımıyla teorik olarak sonuçları alınmıştır. Bu sonuçlara göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- ❖ Sistemin arka koluna dengeleme yayı eklendiğinde, dengeleme yaysız ve absorbersiz sisteme göre; ön ve arka kolun hareketliliğinin azaldığı, arka kolun açısal hızının düştüğü ön kolun ise açısal hızının arttığı görülmüştür.
- ❖ Dengeleme yaysız sistemin arka koluna absorber eklendiğinde, dengeleme yaysız ve absorbersiz sisteme göre; her iki kolun hareketliliğinde azalma olurken arka kolun hareketliliğinin ön kola göre daha fazla düştüğü görülmektedir. Arka kolun açısal hızının düştüğü, ön kolun açısal hızının ise arttığı görülmektedir.
- ❖ Arka kolunda dengeleme yayı eklenen sistemin arka koluna absorber eklendiğinde, dengeleme yaylı absorbersiz sisteme göre, arka kol ile ön kol hareketliliği düşmektedir. Ön kolun açısal hızı düşerken arka kolun açısal hızında bir miktar artma olduğu görülmektedir.
- ❖ Dengeleme yaysız sistemin ön koluna absorber eklendiğinde, dengeleme yaysız ve absorbersiz sisteme göre; arka kolun ve ön kolun hareketliliklerinin azaldığı, açısal hızlarının ise çok az arttığı görülmektedir.
- ❖ Arka kolunda dengeleme yayı eklenen sistemin ön koluna absorber eklendiğinde, dengeleme yaylı absorbersiz sisteme göre, her iki kolun hareketliliği azalmaktadır. Ön kolun açısal hızı düşerken arka kolun açısal hızı artmaktadır.

7.5.2 Deneyisel sonuçların değerlendirilmesi

Tasarımı ve üretimi yapılan robot kolun titreşim analiz cihazı ile deneysel titreşim ölçümleri yapılmıştır. Deneyisel çalışmalar neticesinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- ❖ 2R robot kolda dengeleme yayı kullanımı, arka kolun rijitliğini arttırdığı için robotun arka ve ön kolda meydana gelen titreşimleri düşürmede olumlu bir etkiye sahiptir.
- ❖ 2R robotun arka koluna dengeleme yayı bağlanmadan ön ve arka kollarda absorber kullanımı her iki kolda meydana gelen titreşim değerlerini düşürmüştür. Absorberin robot kolların üst noktalarına bağlanması titreşim değerlerinin daha çok düşmesinde etkili olmuştur.
- ❖ 2R robotun arka kolunda dengeleme yayı kullanımı, sistemde arka kolda orta ve üst konumda absorber kullanımı ön kol ve arka koldaki titreşim değerlerini düşürmüştür.
- ❖ Dengeleme yaysız 2R robot kolda ön kolda absorber kullanımı; ön kolun orta ve üst konumlarına bağlanan absorber titreşim değerlerini düşüren bir etki göstermiştir. Absorberin ön kol üst konumda bağlanması titreşim değerlerini daha çok düşürmüştür.
- ❖ Dengeleme yaylı 2R robot kolda ön kolda absorber kullanımı; dengeleme yaylı sistemde ön kolda üst konumda absorber kullanımı ön koldaki titreşim değerini düşürmüştür. Ön kolda absorber kullanımı arka kolun titreşim değerlerinin de düşmesini sağlamıştır.
- ❖ 2R robot kolda dengeleme yaysız çift absorber kullanımı robotun arka ve ön kolunda titreşim değerlerini düşürmüştür.
- ❖ 2R robot kolda dengeleme yaylı çift absorber kullanımı, dengeleme yayının kolların rijitliğine olumlu yönde etkisi ile her iki kolun üst noktalarına konumlandırılan dinamik titreşim absorberleri sayesinde titreşim değerleri en düşük seviyeye inmiştir.
- ❖ Dinamik titreşim absorberi yalın sistemde var olan ön ve arka kolda ölçülen titreşim değerlerindeki pik noktalarını da ortadan kaldırmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/robotik/kilometre1.html>
- [2] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/robotik/kilometre8.html>
- [3] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/robotik/kilometre10.html>
- [4] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/robotik/kilometre11.html>
- [5] <http://www.sony-aibo.com/wp-content/uploads/2013/01/ERS110-header.jpg>
- [6] http://corporate.honda.com/images/assets/asimo_12_2011.jpg
- [7] <http://www.otterfx.com/pics/Kellrob.gif>
- [8] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/robotik/meatronik11.html>
- [9] **Bisu C., Cherif M., Gerard A., K'Nevez J.Y.,**(2011). "Dynamic behavior analysis for a six axis industrial machining robot": Bucharest, Romania. CASAAM.
- [10] **Frederick F.,**(2006). "Fundamentals of Robotic Mechanical Systems" McGill University Press Third Edition 544p., Montreal, Quebec, Canada.
- [11] **Şahin İ., Yalvaç M.,** (2011). "Kablosuz Kontrol Edilebilen Mobil Araştırma Robotu" (ICITS-2011) 5. *Uluslararası Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Sempozyumu*, Elazığ.
- [12] **Kandemir G.,** (2013). EMG sinyali ile robot kol kullanımı sağlayan cihaz tasarımı ve üretimi. *ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği* (Yüksek Lisans Tezi), 85s., Ankara.
- [13] **ALP O.,** (2012). Genel amaçlı robot kolu tasarımı. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 112s., İzmir.
- [14] **Savaş Y.,** (2006). Bir robot kolu mekanizmasında adım motorları vasıtasıyla verilen koordinatlara hareketin gerçekleştirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Elektronik - Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 142s., Sakarya
- [15] **Namlı C.,** (2005) Eğri uzuvlara sahip robot kolunun kinematik ve dinamik analizi. *Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 116s., Marmara.
- [16] **Caner O.,** (2002) İki serbestlik dereceli robot kolunun dinamik analiz ve kontrol simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 74s., Ankara.
- [17] **Çelik S.,** (1992) Bilgisayar robot kolu. *Erciyes Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı* (Doktora Tezi), 81s., Kayseri.
- [18] **Kojima H., Hayakawa T., Tanaka T., Kamiyama A.,** (2013) Robot-assisted assessment of vibration perception and localization on the hand. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 33 (2010) 1431–1439. Kiryu Gunma, Japan.
- [19] **Gattringer, H., Kilian F. J., Höbarth, W., Bremer H.,** (2010). Modeling and Vibration Suppression for Fast Moving Linear Robots. *AIP Conference Proceedings*. 9/30/2010, Vol. 1281 Issue 1, p374-377. Linz, Austria.
- [20] **Xu, F., Jiang, G., Wang, L., Wang, X.,** (2012). Dynamic performance of a cable with an inspection robot - analysis, simulation, and experiments. *College of Mechanical Engineering, Southeast University, Journal of Mechanical Science and Technology*, May 2013, 27(5):1479-1492. Nanjing, China.

- [21] **Hiroyuki K., Akihiro M., Katsuhiko K., Toshio K.,** (2004). Residual vibration reduction control after catching a falling steel sphere by a two-link catching flexible robot arm. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*. 2004, Vol. 19 Issue 1-4, p361-366. Gunma, Japan.
- [22] **Toz, M.,** (2008) “Endüstriyel Robotların Dinamik Analizi İçin Robot Araç Kutusunun Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Ana Bilim Dalı*, 231s Kocaeli.
- [23] **Kucuk, S., Bingul, Z.,** (2006) “Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics, , Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control, *Sam Cubero* ISBN: 3-86611-285-8 33p.
- [24] **Herman, H.,** (2011) “Dynamic Modeling and Simulation of Robot Manipulators” *Norwegian University of Science and Technology Department of Engineering Cybernetics* 124p.
- [25] **Toprak, T.,** Mekanik Titreşimler, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [26] **PASİN, F.,** Mekanik Titreşimler, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2000.
- [27] http://kisi.deu.edu.tr/zeki.kiral/Mekanik_Titresimler_Ders_Notlar%C4%B1_Zeki_K%C4%B1ral.pdf
- [28] CSI, Titreşim Ölçme ve Titreşim Grafiği Analiz Teknikleri, Seminer Notları, Denizli, 15-17 Temmuz 1998.
- [29] **KÖSE, K.,** ”Makine Arızalarının Belirlenmesinde Titreşim Analizi”, *Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi*, Denizli, 16-19 Ekim 2003.
- [30] **Baykara, V.İ. ,** (2009) “Titreşim analizi ile şanzımanlarda arıza teşhisi ve kestirimci bakım”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Zonguldak.
- [31] **KÖSE, K.R.,** (2003) Makine Arızalarının Belirlenmesinde Titresim Analizi. *Mühendis ve Makine*, Cilt:45 Sayı:538
- [32] **Hunt, J.B.,** Dynamic Vibration Absorbers, *Mechanical Engineering Publications Ltd.*, 1979.
- [33] **Bonsel, J.,** (2003) Application of a dynamic vibration absorber to a piecewise linear beam system. *Eindhoven University of Technology (TU/e) Department of Mechanical Engineering* Master thesis, 76p.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Özer YÜCEL
Doğum Yeri ve Tarihi	Hatay, 20.03.1985
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce, Arapça
İletişim Adresi	Halil Rıfat Paşa Mahallesi Kurtcebe Noyan Caddesi Özkoçak Apartmanı A Blok No:5 B.D.:1 58030 Merkez Sivas
E-posta Adresi	ozер.yucel@hotmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Antakya Anadolu Lisesi, 2000-2003
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2008-2012
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2013-2016

İş Tecrübesi

ESTAŞ Eksantrik	
Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Araştırmacı Kalite Mühendisi, 2012-2016