



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN FARKLI
TAHRİKLERDE OLUŞAN TİTREŞİMLERİN
ÖLÇÜLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS

İdris ŞANİ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Savaş KOÇ

Ağustos, 2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İdris ŞANİ tarafından hazırlanan “Endüstriyel Bir Robotun Farklı Tahriklerde Oluşan Titreşimlerin Ölçülmesi ve karşılaştırılması” adlı tez çalışması 26/08/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Savaş KOÇ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şehmus BADAY

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

İdris ŞANİ

Tarih: 02.08.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ENDÜSTRİYEL BİR ROBOTUN FARKLI TAHRİKLERDE OLUŞAN TİTREŞİMLERİN ÖLÇÜLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

İdris ŞANİ

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Savaş KOÇ

2021, 48 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Savaş KOÇ
Dr. Öğr. Üyesi Şehmus BADAY
Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

Bu çalışmada, katı modellemesi tasarlanmış üç serbestlik derecesine sahip bir endüstriyel robot koldan iki katı modelleme oluşturularak (tahrikler kayış kasnağı yardımıyla iletilen model ve tahrikler vidalı mil yardımıyla iletilen model) farklı bölgelerden tahrik verilmiştir. Bu modeller Ansys workbench arayüzü yardımıyla her model için ayrı ayrı rijit dinamik analiz (hareket analizi) gerçekleştirilmiştir. Bu modal analize bağlı olarak her iki modelleme için zorlanmış harmonik analiz yapılmıştır. Harmonik analizde, her iki yöntem için bir adet modal analiz uygulanmıştır. Bu iki modelleme için toplam olarak beş ayrı analiz incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Rijit dinamik analizinde, robot kolun hareketi esnasında motorlar üzerine gelen kuvvetler ve ivme değerleri elde edilerek iki ayrı modelin verileri kıyaslanmıştır. Rijit dinamik analizi ile iki model üzerinde güç tasarrufu konusu incelenmiştir. Modal analizde sistemin ilk 6 modunda deformasyon safhaları elde edilerek oluşan frekans değerlerine göre sistemin deformasyon genlikleri, doğal frekanslara bağlı serbest titreşim oranları ve yapının en küçük doğal frekansı elde edilmiştir. Her iki modelleme için ayrı ayrı gerçekleştirilen zorlanmış harmonik analizlerde ise farklı dış kuvvetlere maruz bırakılan sistemin rezonans durumu incelenerek belli kritik frekanslardaki genliğe bağlı deformasyon ile stress değerleri elde edilmiştir. İki modelin eşit şartlarda ve hareket analizinde oluşan yükler altında kol ucunda meydana gelecek titreşim oranlarını karşılaştırılmıştır. Böylece malzeme yapısı, serbestlik derecesi, kol ağırlıkları ve benzer tüm şartları eşit olan, sadece tahrik noktaları bakımından farklı olan iki robot kol modeli üzerinde oluşan titreşim, deformasyon ve stress oranları araştırılmış ve bu oranların sistem üzerindeki etkileri kıyaslandırılmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktüatör, Endüstriyel robot kol, Hareket analizi, Titreşim analizi ve Vidalı mil

ABSTRACT

MS THESIS

MEASURING AND COMPARISON OF VIBRATIONS AT DIFFERENT DRIVEN OF AN INDUSTRIAL ROBOT

İdris ŞANİ

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Savaş KOÇ

2021, 48 Pages

Jury

**Asst. Prof. Savaş KOÇ
Asst. Prof. Şehmus BADAY
Asst. Prof. Gurbet ÖRÇEN**

In this study, two solid models were created from an industrial robot arm with three degrees of freedom designed to be solid modeled (the model with the drives transmitted with the help of belt pulley and the model with the drive with the help of a screw shaft) from different regions. Rigid dynamic analysis (motion analysis) for each model was performed separately for these models with the help of Ansys workbench interface. Based on this modal analysis, forced harmonic analysis was performed for both models. In harmonic analysis, one modal analysis was applied for both methods. For these two models, a total of five different analyzes were carried out. In the rigid dynamic analysis, the forces and acceleration values on the motors during the movement of the robot arm were obtained and the data of two different models were compared. The issue of power saving on two models with rigid dynamic analysis is examined. In the modal analysis, deformation phases were obtained in the first 6 modes of the system and the deformation amplitudes of the system, free vibration ratios depending on natural frequencies and the smallest natural frequency of the structure were obtained according to the frequency values. In the forced harmonic analyzes performed separately for both models, the resonance state of the system exposed to different external forces was examined and stress values were obtained with the amplitude-dependent deformation at certain critical frequencies. The vibration rates of the two models under equal conditions and under the loads occurring in the motion analysis were compared. Thus, the vibration, deformation and stress rates on two robot arm models, which have the same material structure, degrees of freedom, arm weights and all similar conditions, but differ only in terms of drive points, were investigated and the effects of these rates on the system were compared and interpreted.

Keywords: Actuator, Ball screw, Industrial Robot Arm, Motion Analysis and Vibration Analysis

ÖNSÖZ

Zaman ilerleyişinin insan hayatına kattığı yeni şeyleri keşfetme ve gelişimi isteme arzusu, insanoğlunun kendi hayatında daha rahat ve konforlu bir gelecek isteme eğilimini güncel halde tutmaktadır. Buna bağlı olarak teknolojik gelişmelere akıl yormak ve bu doğrultuda gelişim sağlamak çok değerli görülmekle birlikte insanların içindeki bu geliştirme içgüdüğü gittikçe büyüyen bir araştırma sahası haline gelmektedir. Genel anlamda ilişkili olan teknolojik alanların gelişimi ve zaman içinde ilerleyişi genellikle en zayıf halka konumundaki alanın gelişimi oranında olmaktadır. Baş döndüren teknolojik gelişmeler arasında kendine yer bulma çabası içinde olan alanlar arasında şüphesiz robot sektörü bulunmaktadır. Gelişen bilgisayar ve metalürji teknolojileri ile yakın ilişkisi bulunan bu sektör, enerji verimliliğinin dünya çapında bir ihtiyaç olduğu bir dönemde yükselişini sürdürmeye çalışmaktadır. Bu noktada mekanik alanlarında enerji ihtiyacı artmakla beraber enerji tasarrufu sağlayan araç ve gereçlerin ihtiyacı doğmaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada belirlenmiş olan bir sistemin hem enerji tasarrufu açısından hem de malzeme yapısının kararlılığı açısından bazı deneyler uygulanmıştır. Bütün bu uygulamaları yaparken bu alanda daha önceden gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Bu vesile ile bilimin ilerlemesi adına katkılar sunan ve bilimsel çalışmalarını inceleme fırsatı bulmuş olduğum değerli bilim insanlarına şükranlarımı sunmak isterim. Ayrıca yapmış olduğum tez çalışmamın tüm aşamasında bana her türlü desteği sunmaktan kaçınmayan ve en iyi sonuca ulaşmam için elinden gelen her türlü yardımı sağlayan Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi değerli hocam Sayın Savaş KOÇ ‘a

Hayatım boyunca bana manevi desteğini hiç esirgemeyen ailem; başta babam Mahmut ŞANİ beyefendi ve annem Pakize ŞANİ hanımefendi olmak üzere ablalarım Leyla ÜNER’e, Cihan KALI’ya ve Fatma ŞANİ’ye

En içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

İdris ŞANİ
BATMAN-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE DİZİNİ	ix
ŞEKİL DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Robot Tahrik Sistemleri	4
1.2. Robotlarda Tasarım ve Montaj.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Yakın Tarihte Konu ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	8
3. MATERYAL ve YÖNTEM	11
3.1. Rijit Dinamik Analizi (Rigid Dynamics Analysis)	13
3.2. Zorlanmış Titreşim Analizi (Harmonik Titreşim Analizi)	16
3.3. Modal Analiz Uygulaması	17
3.4. Mesh İşlemi	19
3.5. Harmonik Çizgisel Hareket Analizi.....	21
3.6. Harmonik Açısız Hız Analizi	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	27
4.1. Modal Analizde Toplam Deformasyon Analiz Sonuçları	27
4.2. Harmonik Analiz ile Robotun Uç Kolunda Oluşan Deformasyon ve Stress	31
4.3. Harmonik Analiz ile Robotun 2. Kolunda Oluşan Deformasyon ve Stress	36
4.4. Harmonik Çizgisel Hareket Analiz Eğrisinin ve Harmonik Açısız Hareket Analiz Eğrisinin Deformasyon Açısından Kıyaslanması.....	39
4.5. Harmonik Çizgisel Hareket Analiz ve Harmonik Açısız Hareket Analiz Stress (Normal Stress) Eğrilerinin Karşılaştırılması	40
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	46
5.1 Sonuç	46
5.2 Öneriler	47
6. KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Sabit sayı
f	Frekans
Hz	Hertz
k	Yay sabiti
m	Kütle
Mpa	MegaPascal
T	Periyot
μm	Mikrometre
ω_0	Dairesel doğal frekans
ω	Zorlanmış dairesele frekans

Kısaltmalar

3D	Üç boyut
FFR	Zorlanmış Frekans
PID	Oransal-integral-türevsel denetleyici kontrol döngüsü yöntemi
PSD	Power-spectral-density
TVFB	Burulma açısal hız besleme şeması
VSC	Değişken Sertlik Kontrolü

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1. Model 1 parça adları.....	12
Çizelge 3.2. Model 2 parça adları.....	13
Çizelge 3.3. Çizgisel hareket analiz data girdisi.....	14
Çizelge 3.4. Açısal hareket analiz data girdisi.....	14
Çizelge 3.5. Modal analiz ansys sonuç tablosu	17
Çizelge 3.6. Ansys modal analiz ayarlar tablosu.....	18
Çizelge 3.7. Ansys mesh ayarlar tablosu 1	20
Çizelge 3.8. Ansys mesh ayarlar tablosu 2	21
Çizelge 3.9. Ansys harmonik çizgisel hareket ayarlar tablosu	23
Çizelge 4.1. Modal analiz frekans değerleri	30
Çizelge 4.2. Zorlanmış çizgisel harmonik titreşim analizi sonucunda 100 Hz frekansında X, Y ve Z koordinatlarında oluşan maksimum deformasyon ve stress (mm) oranları ...	36
Çizelge 4.3. Zorlanmış açısal harmonik titreşim analizi sonucunda 100 Hz frekansında X, Y ve Z koordinatlarında oluşan maksimum deformasyon ve stress (mm) oranları ...	36
Çizelge 4.4. Çizgisel hareket için motor mil verileri.....	44

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Yeni nesil robotlar özellikleri.....	2
Şekil 1.2. Seri robot kol	5
Şekil 1.3. Paralel robot kol	5
Şekil 1.4. Hibrit robot kol.....	6
Şekil 3.1. Piston yardımıyla tahrik modeli 1 (çizgisel hız tahrik)	11
Şekil 3.2. Kayış kasnağı yardımı ile tahrik modeli 2 (açısal tahrik modeli)	12
Şekil 3.3. Çizgisel hareket tahriklerinin uygulanma bölgeleri	14
Şekil 3.4. Açısal hareket tahriklerinin uygulanma bölgeleri	15
Şekil 3.5. Modal analiz deneyi robot kol.....	17
Şekil 3.6. Mesh işleminin görünümü	19
Şekil 3.7. Harmonik çizgisel harekette uygulanan kuvvet bölgeleri	22
Şekil 3.8. Harmonik açısal harekette uygulanan kuvvet bölgeleri	25
Şekil 4.1. Modal analiz mod 1	27
Şekil 4.2. Modal analiz mod 2	28
Şekil 4.3. Modal analiz mod 3.....	28
Şekil 4.4. Modal analiz mod 4.....	29
Şekil 4.5. Modal analiz mod 5.....	29
Şekil 4.6. Modal analiz mod 6.....	30
Şekil 4.7. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan toplam deformasyon.....	31
Şekil 4.8. Zorlanmış açısal harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan toplam deformasyon	31
Şekil 4.9. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan stress (von-mises)	33
Şekil 4.10. Zorlanmış açısal harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan stress (von-mises)	33
Şekil 4.11. Zorlanmış çizgisel harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan normal stress (X koordinatı)	34
Şekil 4.12. Zorlanmış açısal harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan normal stress (X koordinatı).....	34
Şekil 4.13. Zorlanmış çizgisel harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan directional deformasyon (X koordinatı).....	35

Şekil 4.14. Zorlanmış açısal harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan directional deformasyon (X koordinatı).....	35
Şekil 4.15. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta 2. kolda oluşan toplam deformasyon.....	37
Şekil 4.16. Zorlanmış açısal harekette 8 Hz frekansta 2. kolda oluşan toplam deformasyon	37
Şekil 4.17. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta 2. kolda oluşan stress (von-mises)	38
Şekil 4.18. Zorlanmış açısal harekette 8 Hz frekansta 2. kolda stress (von-mises) oluşumu	38
Şekil 4.19. Zorlanmış çizgisel hareket directional deformasyon (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1	39
Şekil 4.20. Zorlanmış açısal hareket directional deformasyon (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1	40
Şekil 4.21. Zorlanmış çizgisel hareket stress (normal stress) (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1	41
Şekil 4.22. Zorlanmış açısal hareket stress (normal stress), (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1	41
Şekil 4.23. Çizgisel ve açısal hareket esnasında zamana bağlı 1. motorda tork değişimi	42
Şekil 4.24. a) Açısal ve b) Çizgisel hareket esnasında zamana bağlı 2. motorda tork değişimi.....	42
Şekil 4.25. a) Çizgisel ve b) Açısal hareket esnasında zamana bağlı 3. motorda tork değişimi.....	43

1. GİRİŞ

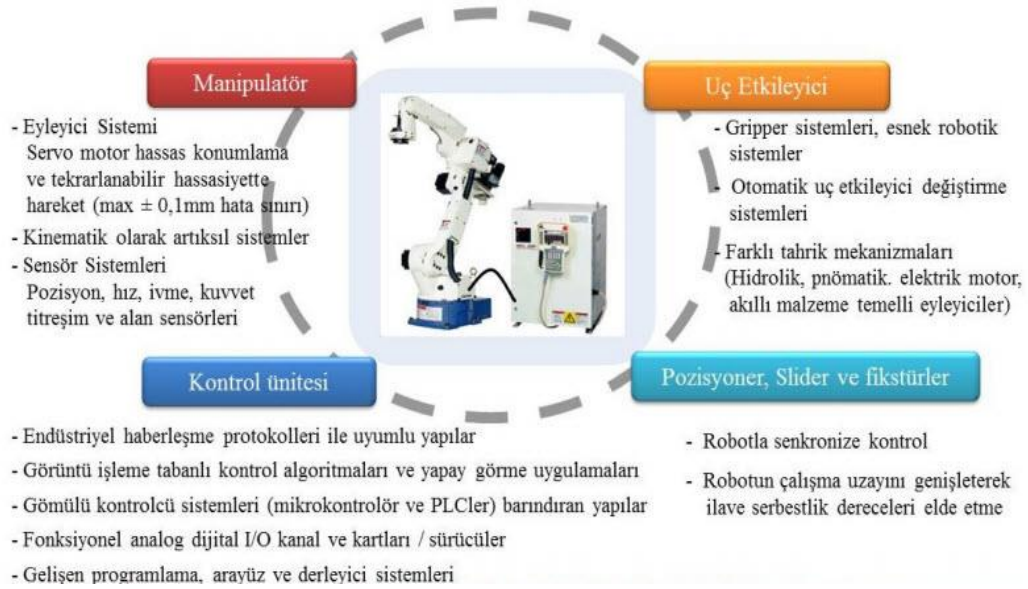
Endüstriyel robotik kollar yaptıkları farklı hareketler esnasında fazla yüke maruz kalırlar. Robotik kollarındaki mafsalların ani yön değiştirmedeki momentleri, kol ağırlığından kaynaklı atalet momentleri ve aniden yük bindirilmesi veya yük azaltılması sonucundaki hareketler robotik kolun çalışması sırasında istenmeyen titreşimlere sebebiyet verebilir. Ayrıca tahrik elemanının kendisi de titreşimlere neden olabilmektedir. Robot kollarda oluşan bu titreşimlerin önlenmesi amacıyla farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların başında esnek uzuvların kullanılması ve titreşim sönümleme işlemlerinin uygulanması gibi yöntemler gelir. Hafif tasarımlı ve esnek uzuvlu robotlar yüksek hızlarda çalışma gerçekleştirdiğinde robotun etrafındaki cisimlerle etkileşime geçerken veya aniden duruş sonrandan belli seviyelerde titreşimlere neden olabilmektedir. Bu titreşimler kontrol edilemediği durumlarda robotun gerçekleştireceği iş ile ilgili istenmeyen durumların oluşmasına veya kolun uç kısmında konumlandırma hatalarına neden olabilmektedir. Bir robot koldan beklenen özellikler içerisinde öngörülen bir zaman diliminde istenilen deplasmanı gerçekleştirmesidir. Bu durum endüstriyel alanda kayda değer bir önem arz etmektedir.

Hareketin oluştuğu her sistemde olduğu gibi robot kollarında da titreşimlerin gerçekleşmesi söz konusu olabilir. Buna rağmen bilimin bu yöndeki çalışmaları robot kollarında oluşan titreşimleri tamamen ortadan kaldırmanın mümkün olmadığı düşünülse bile bu durumu iyileştirme çalışmaları sürekli olarak devam etmektedir. Genellikle titreşim kontrolü yöntemleriyle bu titreşimler olabildiğince minimum seviyeye getirmek istenmektedir.

Dünya teknolojilerinin öncü alanlarından biri olan robot sanayii; Metalürji, Otomotiv, Elektrik-Elektronik, Gıda, Porselen ve Sağlık gibi sektör kollarında oldukça yaygın ve hızlı bir şekilde gelişmeye devam etmektedir. Ayrıca önemli sektörler içerisinde bulunan eğitim ve araştırma gibi alanlarda robotların kullanılmasıyla beraber yapılan araştırmalar neticesinde yüksek motivasyona sahip etkili bir eğitim ortamı yaratıldığı tespit edilmiştir (Çelebi ve ark., 2019).

Esnek robotlar üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde yerde sürünerek ilerleyen, suda yüzebilen, iyileştirici fonksiyona sahip olan (rehabilitasyon) ve endüstriyel alanda kullanılan tutucular olarak çeşitli sınıflarda incelenmektedir (Yetkin ve Koca, 2021). Robotların üç temel görevi olduğunu dile getiren robotik bilimine göre, robotların etrafındaki materyallere hassasiyeti olup farkındalık oluşturabilmeleri, aktarılan bilimsel bilgiyi zamana yayıp değerlendirebilmeleri ve kendi uzuvlarını kendi kararlarıyla hareket ettirebilme kabiliyetleri kullanılarak bazı fonksiyonların (istekleri) yerine getirebilmeleri gibi görevler olarak sıralanabilir (wildhaber, 2016). Robotlar, yakın zamanda gelişen teknoloji ile beraber daha akıllı ve esnek olmakla beraber spesifik görevlerde yer alabilecek seviyeye gelmek için günümüzde uygun ortam şartlarına sahip

hale gelmiştir (Kurt ve Bozoklu, 2019). Robotik ekonomisinin fazla gelişmesi ile beraber bazı insan gücüne dayalı işlerin büyük bölümü ortadan kalkacaktır (Ivanow, 2017). Endüstriyel robotik sistemlerinde kullanılan manipülatör, uç etkileyici, kontrol sistemi, slider ve pozisyoner gibi alt sistemlerdeki gelişmeler sayesinde endüstriyel robotların yeni nesli olarak adlandırılan işbirlikçi robotlar daha yoğunlukla kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 1.1. de yeni nesil robotların yakın zamanda geliştirilen ve robotların gelişimlerine katkı sağlayan kabiliyetler görülmektedir. Yakın gelecekte endüstri 4.0 çağı gereksinimlerinin kaçınılmaz etkileri içerisinde yer alacak esnek robotik mekanizmaların işbirlikçi endüstriyel robotlarda kullanılmasıyla beraber, robotlarla uyumlu insan gücü faktörünün ortaya çıkacağı kaçınılmazdır. Bununla beraber bilgisayar destekli sistemlerin gelişmesine entegre edilmiş robotlar ile beraber dünya genelinde akıllı fabrikaların gelişip çalışmasını doğuracaktır (Dilibal ve Şahin, 2018).



Şekil 1.1. Yeni nesil robotlar özellikleri

İkinci makineleşme çağı olarak karşımıza çıkacak bu süreçte çalışan insan grupları; nitelikli ve niteliksiz gruplar olarak ayrılacaktır. Vasıfsız iş gücüne sahip çalışan kesim, robotlaşmaya bağlı bilgisayar destekli alt yapının getirdiği yenilikler karşısında çeşitli zorluklar çekeceklerdir. Buna bağlı olarak daha düşük ücretle çalışmak zorunda kalacaklardır. Nitelikli olan çalışanlar ise yetenek açısından belli yüksek seviyede bulunacak ve yüksek ücretle çalışabileceklerdir (Brynjolfsson ve McAfee, 2014).

Dünya sanayisinde öncü olan ülkeler artık robotlaşmayı kendi teknolojilerinde itici bir ivme gücü olarak görmektedir. Robotlar çağımızda robotik alanındaki sorunların giderilmesi ve veriminin artırılması teknolojik ilerleme açısından büyük önem arz etmektedir. Bu verimliliğin

daha yüksek bir seviyeye getirilmesi için robotik kolda istenmeyen bazı olumsuzlukların başında görülen titreşim olayının sebep olduğu etkileri azaltmaktır. Bunun en az seviyeye indirgenerek iş kalitesini yükseltmek ve istenilen işin daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Robot manipülatörlerin bir noktadan diğer bir noktaya hareketi ile ani olarak durması sonucunda doğal titreşimler meydana gelmektedir. Doğal frekansı yüksek olması beklenen robot manipülatörlerde rijit yapıya sahip olmaları sebebiyle doğal frekansları düşük seviyede olur (Kant, 2009).

Bu amaçla yapılan çalışmalarda genellikle esnek uzuvların kullanılması tercih edilmektedir. Esnek, ince ve uzun olan uzuvların ağırlıkları azaltıldığında ataletlerinden kaynaklanan titreşimler azaltılırken esnekliğinden kaynaklanan titreşimler ise artmaktadır. Diğer alanlarda olduğu gibi endüstri açısından da bakıldığında zaman robot manipülatörlerin artık titreşimleri istenmeyen durumlardandır. Manipülatörlerin modellemeleri yapıldığında istenilen hareketlerin yapılmasında kullanılacak hareket profilleri seçiminden sonra uygun titreşim kontrolcü tasarlanmalıdır (Malgaca ve ark., 2013). Ayrıca robot kollarındaki istenmeyen titreşimleri düşük seviyelere indirgenme çalışmaları arasında, mafsallara uygun rulman kullanılarak montaj işlemi gerçekleştirilmesi tercih edilmelidir (Alp, 2012). Manipülatörlerde kullanılan motor gücü arttıkça yapıda düşük frekanstaki titreşimlere karşı hassaslaşma eğilimi artmaktadır. Böylece manipülatörün hareketi sırasında yapılması istenen harekette gecikmeye sebebiyet vermektedir. Bundan dolayı uygun akıma sahip motor parametresine ihtiyaç duyulmasının yanı sıra motorun yapı üzerinde uygun konumda yerleştirilmesi de önem arz etmektedir (Caner ve Eroğlu, 2004).

Bu çalışmada, rijit uzuvların ağırlık, ivme ve hareketlerinden kaynaklanan titreşimlerin azaltılması için robot kolun tahrik sisteminin uygulanmasını farklı bir şekilde yaparak ölçümler alınacaktır. Bu ölçümlerin karşılaştırılmasıyla titreşimin etkisi belirlenecektir. Robot kolların tahrik sistemleri genellikle motorların mafsallardan tork uygulayacak şekilde döndürülerek hareket sağlanmaktadır. Bu çalışmada farklı olarak robot kolun uzuvlarına paralel olarak yerleştirilecek vidalı mil sistemi yardımıyla salınım hareketini döndürme hareketine çevirerek robot kolun hareket etmesi sağlanmaktadır. Bu hareketle birlikte robot kolun uzuvları kontrollü bir şekilde ivmeli hareket edeceğinden titreşimlerin azalacağı düşünülmektedir.

1.1. Robot Tahrik Sistemleri

Endüstride bulunan robot kollarda kullanılan tahrik yöntemlerini incelediğimizde üç farklı yöntemin izlendiği görülmektedir.

Bunlar;

- 1) Elektrik motorlar yardımıyla,
- 2) Hidrolik güç yardımıyla,
- 3) Pnömatik güç yardımıyla,

olarak sıralanabilir (Hız, 2019).

Elektrik motorlar yardımıyla yapılan tahrik yöntemlerinde iki elektrik motor tipi olan step ve servo tipi motorlar kullanılmaktadır. Servo motorların geri besleme özelliği olması sebebiyle robot kol tahrikinde servo motorlar yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Step motorlar ise geri beslemeli düzeneğinin bulunmaması nedeniyle servo motorlardan daha ekonomik olup bu durum bu motorun tercih edilme sebebini oluşturmaktadır.

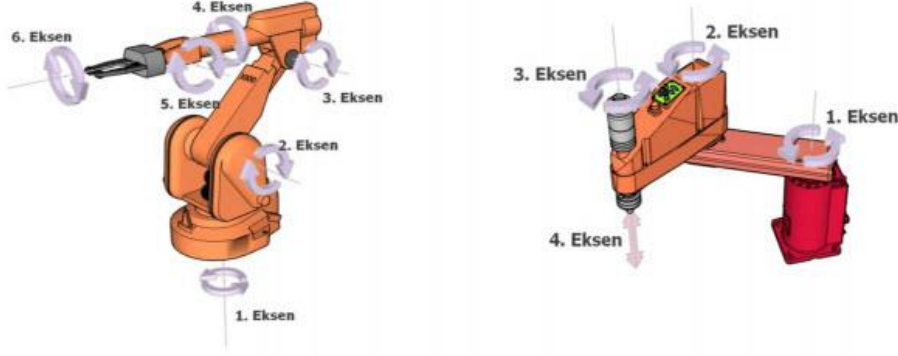
Pnömatik ve hidrolik tahrik yöntemli robot kolların endüstride kullanması belli avantaj ve dezavantajların göz önünde bulundurulması veya sektörlerin gerçekleştirdikleri faaliyetlerine göre bu yöntemlere bağlı tahrik sistemlerin kullanılması tercih edilebilmektedir. Pnömatik tahrikli robot kollar hava basıncı yardımıyla bir tahrik güç oluşturmaktadır. Bu yöntem hidrolik tahrikli bir robot kola göre güç iletiminin daha düşük seviyede olmasının yanında sistemin ekonomik olması ve temiz ortamın daha önemli olduğu sektörler açısından avantajlı olduğu söylenebilir. Hidrolik tahrikli robot kollar ise güç iletimi ihtiyacının yüksek olduğu sektörlerde kullanımı yaygın olarak tercih edilmektedir.

Tüm bu tahrik yöntemleri için üretilen güç yönteminin farklı olması sebebiyle bu yöntemlere bağlı tasarlanan robot kollarda oluşan artık titreşim oranlarında azalış ve artışa bağlı olarak iş kalitesinde de bu oranlar paralelinde değerler görülebilir. Bu tezin asıl amaçlarından biri olan elektrikli motorlar (step motorları) yardımıyla gerçekleştirdiğimiz iki farklı tahrik yöntemi üzerinde çalışmalar analiz edilmiştir.

1.2. Robotlarda Tasarım ve Montaj

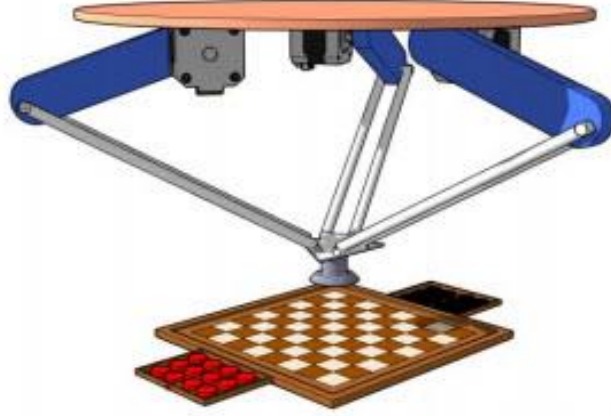
Manipülatör sistemler yani başka bir deyişle robot kol sistemleri tasarım sınıfları açısından hibrit, paralel ve seri olarak ele alınmaktadır (Öztürk, 2019). Bu robot kol sistemleri günlük hayatın sektörel alanlarındaki ihtiyaçlar doğrultusunda gelişimini gerçekleştirmiştir.

Seri robot kollar; kollar arasındaki uç noktalarında oluşturulan bağlantı sayesinde işlevsel hareketi gerçekleştiren sistemi ifade eder. Şekil 1.2. de bir seri robot kolunun uzuv bağlantıları ile dönüş yönelimleri gösterilmiştir.



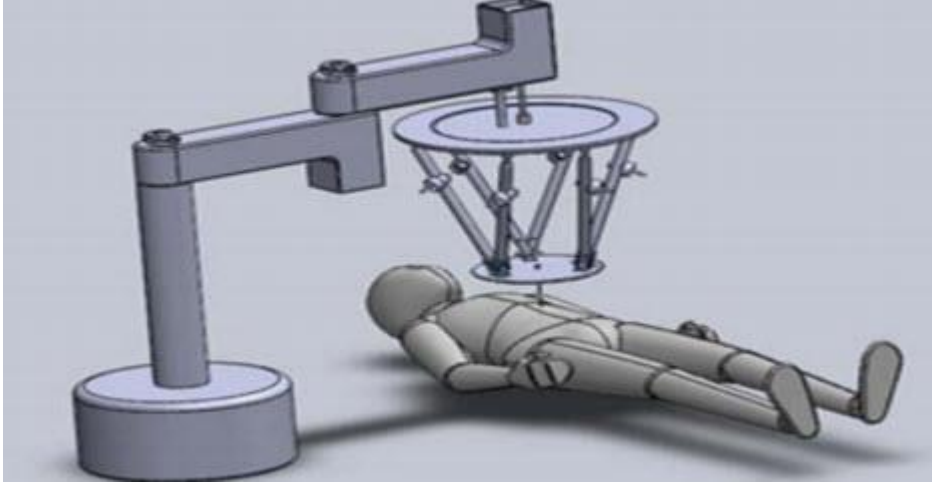
Şekil 1.2. Seri robot kol

Paralel robot kollar; birden fazla seri robot kolu bir arada ve aynı hedef noktasına varmak için paralel bir bağlantı yöntemi ile birbirine entegre edilmiş sistemleri ifade eder. Şekil 1.3. de bir paralel robot kolunun uzuv bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Paralel robot kol

Hibrit robot kollar; bu sistemde hem seri hem de paralel robot kolların bir arada kullanılması sonucunda hedef noktasına varmak için tümünün birbirine entegre şeklinde işlevsellik oluşturduğu sistemi ifade eder. Şekil 1.4. de hibrit bağlantı yapısına sahip bir robot sisteminin uzuv bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Hibrit robot kol

Robot kollardaki bağlantının bulunduğu dönme noktaları; Küresel (RRP), Dönel (RRR), Scara (RRRP), Silindirik (RPP) ve Kartezyen (PPP) (Revolute- R dönme hareketi, Prismatic- P ise doğrusal itme hareketi) hareketlerini yapmaktadır (Bingül ve Küçük, 2015).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Telli ve Kopmaz (2000) çalışmasında tek esnek uzuvlu bir manipülatörde çubuk üzerinde titreşim analizi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın uygulanması Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir. Yöntem olarak da 4. ve 5. Mertebeden Runge-Kutta formüllerinden faydalanılmıştır. Bu çalışma sonucunda küçük kütleli sayıları için nonlineer ve lineer sayısal değerlerine indirgenmiş modeller arasında iki çalışmanın analiz sonuçları karşılaştırılmış ve ikisi arasında herhangi bir kayda değer farkın oluşmadığı kanıtlanmıştır.

Kapucu ve Kaplan (2005) çalışmasında hafif sönümlemeli esnek sistemlerde kalıcı olarak titreşim azaltma veya titreşimi yok etme konusunda bir metot geliştirilmiştir. Bunu çok serbestlik derecesine sahip sistemlerde geliştirilebilmesi için referans konumda olabileceği dile getirilmiştir. Basit ve uygulanabilirliği açısından kolaylık sağlayan bu yöntem bir rampa fonksiyonu üzerinde sikloid ve versine (harmonik terimlerin toplamını içeren bir fonksiyon türü) rampa fonksiyonları ile bir arada kullanılarak oluşturulan bir uygulama metodu ile gerçekleştirilmiştir. Tek serbestlik derecesine sahip hafif sönümlemeli esnek sistemde gerçekleştirilen bu çalışmanın titreşimleri sınırlama konusunda istenilen başarı sağlanmıştır.

Özer ve Sermercigil (2008) çalışmasında genellikle esnek manipülatörlerde meydana gelen titreşim hareketlerini incelemiştir. Genel olarak pasif ve aktif kontrol şeklinde yapılan tekniklerle incelemiştir. Pasif kontrol tekniğinde kütle, sertlik ve enerji yayma gibi bazı özellikleri tasarlamayı gerçekleştirmiştir. Aktif titreşim kontrol tekniklerinde ise aktif kontrol yanıtını almıştır. Aktüatörler kullanılarak ihtiyaç duyulan kuvvetleri üretmiş ve bunu uygulama olarak işlerlik kazandırmaya çalışmıştır. İki adet bağlantı noktasına sahip bir esnek robotik kol üzerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Robotik kol üzerindeki sönümlemeyi gerçekleştirmek için geliştirilip uygulanan yöntem olarak da VSC (Değişken Sertlik Kontrolü) yöntemi kullanmıştır. Yöntem, gerekli hesaplamalar sonucunda elde edilen parametrelerin tutarlılığını ölçmek adına laboratuvar ortamında üretilen robotik kol üzerinden deneyler gerçekleştirmiştir. Yapılan analizler sonucunda titreşim çözümlemelerinin başarı sağlandığı ve titreşim kontrolünü engellemesine yönelik başka herhangi bir donanım kullanmadan bunun gerçekleştirildiği görülmüştür.

Tso ve ark. (2001) çalışmasında, tek esnek bağlantıya sahip bir robotik kolun titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Tek esnek bağlantıya sahip bir kolun hareket değişimini ölçmek için bir lazer diyot ile konum ölçer detektörden oluşan bir optik algılama sistemi kullanmış olup robotik kolun ucundaki titreşimleri düzenlemek için sapma geri bildirime dayalı Lyapunov Tipi bir kontrolör kullanmıştır. Robotik kolunda oluşan titreşimlerin, ondan istenen bir işi yapma konusunda olumsuz sonuçlarının çözüm bulunması adına, tek serbestlik dereceli robotik kolların

titreşim analizleri içinde yer alan deneylere göre farklı olarak kolun ucuna bir ağırlık bağlanılarak titreşim hareketlerini incelemiştir. Robotik kolun aktarma merkezine lazer diyot yerleştirmiştir. Titreşime elverişli sabit olmayan robotik kolun ucuna bir optik algılama sistemi yerleştirilerek analiz yapmıştır. Yapılan analiz sonucunda bu kontrolörün hareket esnasında gerçekleşen titreşimleri önlenmesinde başarı kaydettiği saptanmıştır.

2.1. Yakın Tarihte Konu ile İlgili Literatür Çalışmaları

Armagan ve ark. (2015) konuyla ilgili katı modeli oluşturulan robotik bir manipülatöre 1000 N'luk kuvvet X, Y ve Z eksenlerinde sırasıyla uygulamıştır. Katı model, sonlu elemanlar yöntemi ile önce mesh işlemi gerçekleştirilmiş, daha sonra modal analiz ile 11 mod şeklinde incelendikten sonra FFR (forced frequency) analizi, stress analizi, yer değiştirme (deflection) analizi ve en son olarak yapının rezonans durumu incelenmiştir. Katı model üzerinde gerçekleştirilen FFR analizleri neticesinde rezonans durumu incelenmeye çalışılmış ve yapının herhangi bir rezonansa maruz kalmadığı tespit edilmiştir.

Malgaca ve ark. (2013) çalışmasında, oluşturulan katı cisim bilgisayar destekli hareket kontrol sisteminin kablolu şeklinde titreşim ölçümünü sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Abaqus programı yardımı ile modelinin ve üç eksene sahip çelik uzuvlu robotik kolun birinci uzvu rijit olarak ikinci uzvu ise esnek olarak seçilmiştir. Üç eksenli ve uç kolun esnek yapılı olduğu bir robotik kolda ani duruşlardaki ivmelerinin artık titreşim üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Chen ve ark. (2019) çalışmasında, parlatma ve cilalama amaçlı bir robotik kol üzerinde titreşim azaltma çalışmaları yaparak bunun sonucunda ortaya çıkabilecek cilalama iş kalitesini incelemek için aktif temas kuvveti kontrolü ve titreşimi bastırmak için yeni geliştirilen bir akıllı uç efektör ile artık titreşim kontrolün sağlıklı oluşması için iki girdap damperi birbirine entegre edilerek analiz işlemleri gerçekleştirmiştir. Normal şartlara göre yapılan bu işlem sonucunda iş mili ivmeleri üzerinde %60 oranında bir azalma görülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülüğünde ise 0.535 μm 'den 0.128 μm 'ye kadar düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Böylece robotik kolun ucuna uygulanan sistemler ve ölçülen parametre değerlerinin sonucunda titreşim iş kalitesi üzerinde olumsuzlukları önemli oranda çözümlendiği gözlemlenmiştir.

Kapsalas ve ark. (2018) çalışmasında, endüstriyel robotik manipülatörün esnek kolu üzerindeki titreşim analizini yapmak ve artık titreşimi minimum seviyeye çekmek için analizler gerçekleştirmiştir. Tek serbestlik dereceli bir robotik kol üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma eXogenous stokastik (rasgele) model ile tek giriş-çıkışlı AutoRegressive (otomatik geri bildirim)

şeklinde elde edilmiştir. Tipik bir geri beslemeli PID Kontrolör kullanımı gerçekleştirilmiştir. Robotik kolun bilek kısmındaki hareketlerden kaynaklı titreşim oranlarını minimum düzeye çekmek için bu işlem yapılmıştır. Böylece belli bir zaman aralığında ve kütleyle bağlı artık titreşimler bastırılmak istenmiştir. Robotik kolun serbest ucundaki titreşim genliği, diğer kütleli bölgelere göre artış sıklığı azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu yöntemin çok yönlü olduğu ve robot-esnek kiriş entegrasyonunda uygulanabilirliğinin kolay olduğu iddia edilmiştir. Ayrıca esnek robotik kolun serbest ucunda dikey yönlü titreşiminin bastırılmasında başarı sağlanmıştır.

Garcia-Perez ve ark. (2019) çalışmalarında, esnek bağlantılı bir robotik kolun sonlu elemanlar yöntemi ile modal analizleri en baskın titreşim modlarına kadar incelenmiştir. Daha sonra bu esnek robotik kolda titreşim bastırma işlerinin engellenmesi adına yöntem olarak iki bölümden oluşan bir kontrol şeması denenmiştir. Bunlardan ilki doğru akım motorunun dönme kuvvetine bağlı olarak orantılı-integral türevine göre oluşturulmuş bir kayar mod kontrolü uygulamasıdır. Bir diğeri ise esnek robotik kol üzerinde bağlanmış çoklu pozitif konum geri bildiriminin esnek kolda oluşabilecek titreşimleri olabildiğince alt seviyelere düşürmüş ve aktif titreşim kontrolünü bir piezoelektrik yama yoluyla entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak bu uygulama analizi sonrasında robotik kolda oluşan artık titreşimlerin bastırılması konusunda normale göre üç kata kadar başarı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Meng ve ark. (2018) çalışmasında, uzayda uydu görevinde bulunan iletişim anteninin belli bir sayıda bir serbestlik derecesine ve belli bir sayıda esnek uzantılarına sahip bir robotik kolun, uzay boşluğunda hareketleri esnasında iletişim anteninde belli titreşime neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu titreşimlerin sebep olduğu panelin hedef yakalamasındaki olumsuzlukları gidermek amacıyla bir titreşim bastırma yöntemi kullanılarak bu sorun giderilmeye çalışılmıştır. Doğrusal ve açısal momentumların olduğu dönme noktalarında bazı uygun oranlar yakalanmaya çalışılmıştır. Esnek bölgelerdeki hareketler ile uç-efektör hızları arasında belli bir ilişki kurulmuştur. Yapıdaki dinamik modele uygun bir kapalı döngü kontrol sistemi uygulanmıştır. Böylece belirlenen tahmini hedef otomatik olarak planlanmıştır. Bu çalışmanın analiz tutarlılığını ispatlamak için bir bilgisayar ortamında bir uzay robotu 3D olarak tasarlanmış olup eklem kontrol etkinliğinin titreşim bastırma konusunda başarı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Sahu ve ark. (2017) çalışmasında, CATİA V5 Programı yardımı ile tasarlanıp oluşturulan iki serbestlik dereceli bir rijit robotik kolu, sonlu elemanlar yöntemi ile ansys workbench uygulamasında modal analizleri gerçekleştirmiştir. Robotik kolda çatlaklı hali ve çatlaksız halinin modal analizindeki doğal titreşim frekansları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Modal analizi üç adet mod şeklinde araştırmıştır. Yapılan titreşim analizi sonucunda, robotik kolda oluşabilecek olumsuz sapma oranının çatlakla birlikte arttığı ve buna bağlı doğal titreşim frekanslarının arttığı

görülmüştür. Bu çalışmanın, robotik koldaki doğal frekanslarındaki sapma oranlarına göre çatlakların oluşup oluşmadığı yorumunu yapılabilmesi için bunun uygun bir yöntem olduğu söylenmiştir.

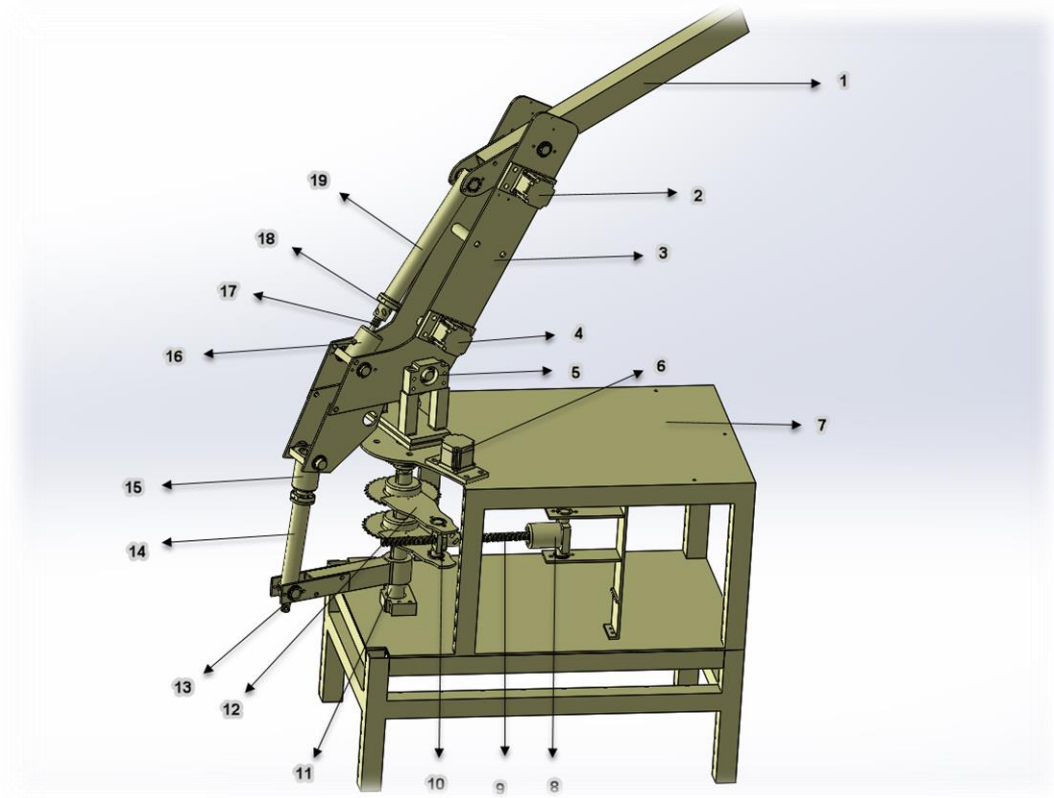
Oaki ve Chiba (2017) çalışmasında, elastik prizmatik eklemler ile döner vektör dişlilerine sahip bir SCARA robot üzerinde titreşim analizleri gerçekleştirmiştir. Robotik kolun uç kısımlarında oluşacak titreşim hareketlerinin incelenmesi için bir Burulma Açısız Hız Besleme (TVFB) şeması yardımı ile incelemeler yapmıştır. TVFB şeması ile gerçekleştirilen bu çalışmada robotik kolda oluşacak titreşim hareketlerini belirli bir yük ile sönümlendirme çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu gibi titreşimlerin olumsuz etkilerini en aza indirmek veya bunu tamamen ortadan kaldıracak bazı yöntemlerin bunlara benzer çalışmalarda geliştirildiğini de görmek mevcuttur.



Çizelge 3.1. Model 1 parça adları

Parça Numarası	Parça Adı
1	1. Robot kol (uç kol)
2	2. Robot kol
3	2. Kol yuvası
4	Robot kol iş sehpası
5	Nema23 motor 1
6	Vida mili döndürücüsü
7	Vida mili
8	Vida mili tutucusu
9	Motor 1 döndürme mili
10	Döndürme mili tutucusu
11	Vida mili
12	Piston kılıfı
13	Vida mili döndürücüsü
14	Nema23 Motor 2
15	Nema23 Motor 3
16	Vida mili döndürücüsü
17	Vida mili
18	Vida mili tutucusu
19	Piston kılıfı

Açısal hız analizi için hazırlanan model Şekil 3.2. deki görselde; modele ait parça adları ise Çizelge 3.2. de gösterilmiştir. Tahrik motor konumları incelendiğinde ilk modele göre dönme gerçekleştirilen alana yakın bir bölgede konumlandırılmıştır.



Şekil 3.2. Kayış kasnağı yardımı ile tahrik modeli 2 (açısal tahrik modeli)

Çizelge 3.2. Model 2 parça adları

Parça Numarası	Parça Adı
1	1. Robot kol (Uç kol)
2	Nema23 motor 3
3	2. Robot kol
4	Nema23 motor 2
5	2. Kol yuvası
6	Nema23 motor 1
7	Robot kol iş sehpaı
8	Vida mili döndürücüsü
9	Vida mili
10	Vida mil tutucusu
11	Motor 1 döndürme mili
12	Döndürme mili tutucusu
13	Vida mili
14	Piston kılıfı
15	Vida mili döndürücüsü
16	Vida mili döndürücüsü
17	Vida mili
18	Vida mili tutucusu
19	Piston kılıfı

3.1. Rijit Dinamik Analizi (Rigid Dynamics Analysis)

Rijit dinamik analizinde sistemler üzerinde ve sistemin hareket kabiliyeti oranında değişik hareket analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu hareketler sonrasında sistem üzerinde gerçekleşen belli hareket bölgelerinde oluşan kuvvet, ivme ve moment gibi değerler okunabilmektedir.

Robot kolun iki farklı tahrik yöntemine sahip modeller olduğundan dolayı her iki model için aynı koordinatlarda başlayıp aynı koordinatlardaki deplasman elde edilebilmesi amacıyla ayarlar kısmından manuel olarak data şeklinde girilmiştir. Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4. de belirlenen veriler, çizgisel hareket ve açısal hareket için öngörülen sayısal verileri olarak girilmiştir.

Çizelge 3.3. Çizgisel hareket analiz data girdisi

Steps	Time [s]	Velocity [mm/s]
1	0	0
1	1	-41,66
2	2	-41,66
3	3	-41,66
4	4	-41,66
5	5	-41,66
6	6	-41,66
7	7	-41,66

MOTOR 1

Steps	Time [s]	Velocity [mm/s]
1	0	0
1	1	0
2	2	41,68
3	3	41,66
4	4	41,66
5	5	41,66
6	6	41,66
7	7	41,66

MOTOR 2

Steps	Time [s]	Velocity [mm/s]
1	0	0
1	1	0
2	2	2
3	3	4
4	4	6
5	5	8
6	6	10
7	7	20

MOTOR 3

Çizelge 3.4. Açısıl hareket analiz data girdisi

Steps	Time [s]	Rotation [°]
1	0	0
1	1	-16,623
2	2	-33,246
3	3	-33,246
4	4	-33,246
5	5	-33,246
6	6	-33,246
7	7	-33,246

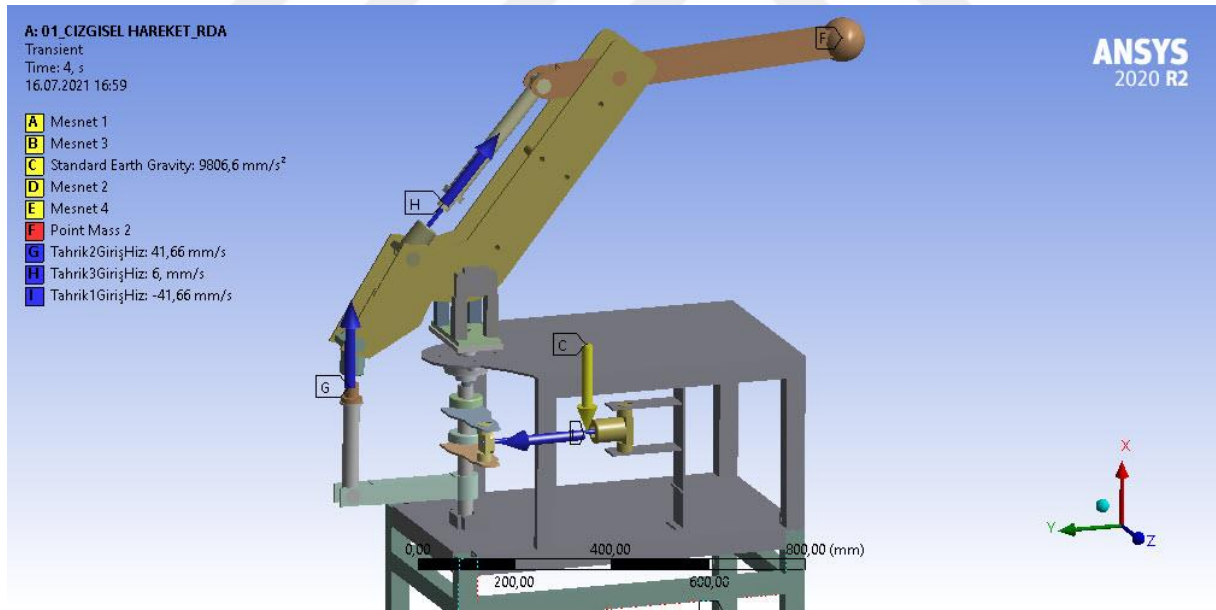
MOTOR 1

Steps	Time [s]	Rotation [°]
1	0	0
1	1	0
2	2	0
3	3	0
4	4	-12,898
5	5	-25,796
6	6	-25,796
7	7	-25,796

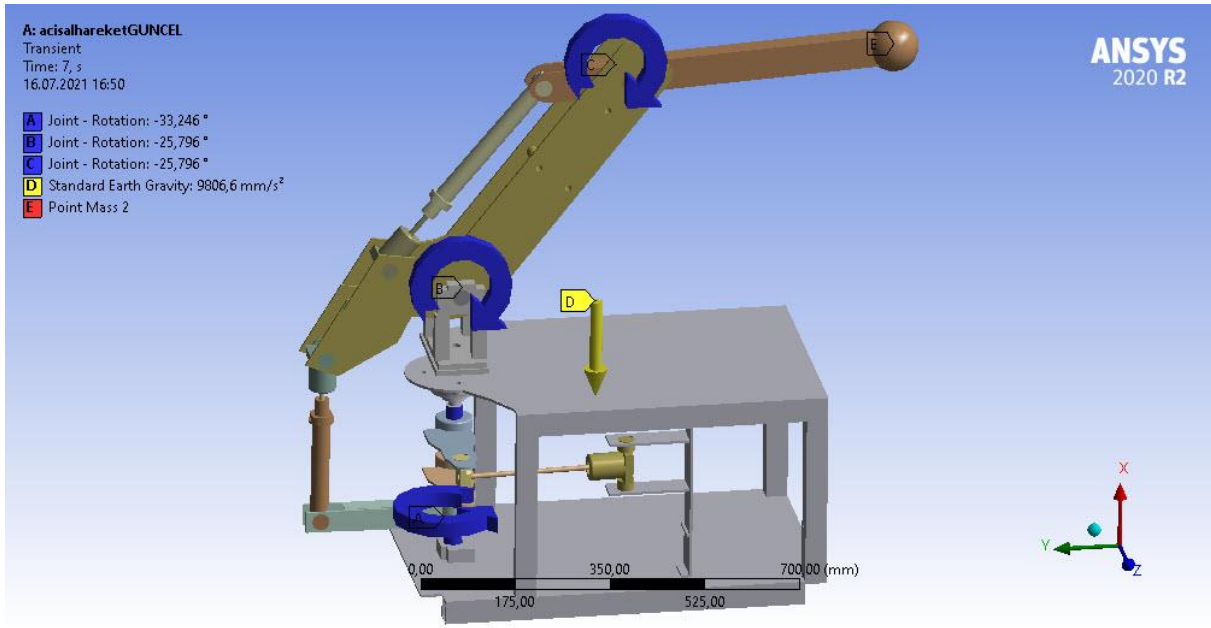
MOTOR 2

Steps	Time [s]	Rotation [°]
1	0	0
1	1	0
2	2	0
3	3	0
4	4	0
5	5	0
6	6	-12,898
7	7	-25,796

MOTOR 3



Şekil 3.3. Çizgisel hareket tahriklerinin uygulanma bölgeleri



Şekil 3.4. Açısal hareket tahriklerinin uygulanma bölgeleri

Çizgisel hız analizi şeklindeki iletim yapan modelde aktüatör yardımıyla çizgisel hız tahrik hareketi verilirken, açısal hız şeklindeki hareket ileten modelde ise kayış kasnak yardımıyla tahrik hareketi gerçekleştirilmiştir. Böylece manuel bir şekilde her iki modeli üzerinde verilen değerler neticesinde aynı koordinatlara sahip bir deplasman elde edilmiştir. Şekil 3.3. ve Şekil 3.4. deki görsellerde her iki model için tahrik yönelimleri gösterilmiştir. Her iki model üzerinde gerçekleştirilen bu hareket ile motorlarda ve birinci kolun uç kısmında oluşan maksimum kuvvet ve ivme değerleri elde edilmiştir.

Robot kol eklemlerinde gerçekleşen dönme kuvvetlerinden X, Y ve Z eksenleri doğrultusunda oluşan en büyük kuvvet değerini, gerçekleştirilen harmonik response analizinin (zorlanmış titreşim analizi) çözüm kısmında vektörel olarak tanımlanmıştır. Böylece her iki model için bulunan iki farklı kuvvet değerleri ile zorlanmış titreşim analizi gerçekleştirilmiştir.

Rijit dinamik analizinde elde edilen son deplasmandaki harekete göre harmonik titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun gerçekleştirilmesi için rijit dinamik analizin harmonik hareket analiz kısmına bağlanması ile sağlanmıştır. Bu hareket analizi sonucunda elde edilmek istenen amaç ile her iki model üzerinde bulunan motorlarda oluşan kuvvetleri, açısal ve çizgisel hız oranları, açısal ve çizgisel ivme oranları ve birinci kolun uç kısmında oluşan X, Y ve Z koordinatlarındaki ivme değerleri belirlenmiştir.

3.2. Zorlanmış Titreşim Analizi (Harmonik Titreşim Analizi)

Zorlanmış titreşim analizi, harmonik titreşim analizi, response spectrum titreşim analizleri ve random vibration-PSD (power,spectral,denstiy) spectrum titreşim analizleri olarak incelenir. Response spectrum titreşim analizi, harmonik yani periyodik bir hareketin dışında belli eğriler yardımıyla veriler, oluşturulan tablo halinde girilir. Bu tablo içerisinde yapı üzerinde uygulanmak istenen hız değerleri, ivme değerleri, frekans değerleri ve yapının hangi noktadan hangi noktaya ulaşacağını gösteren data bilgileri bulunur. Random vibration-PSD spectrum titreşim analizleri, yapı üzerinde uygulanacağı dış yüklerin, yapıda hangi tür bir davranışın gerçekleşeceği öngörülemez durumdadır. Yapı frekans, hız, ivme ve hareket açısından uzayda tahmini davranışlar sergilemektedir. Günümüz teknolojik gelişmelere bağlı olarak titreşim analiz alanı içerisinde yer alan random vibration analiz yöntemi hala üzerinde çokça araştırma yapılması gereken titreşim analiz alanları içerisinde yer almaktadır.

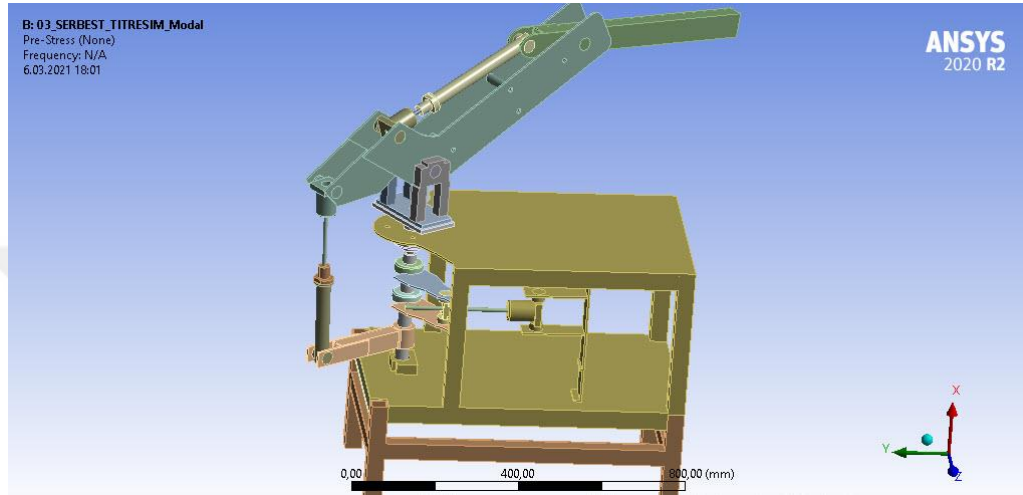
Harmonik titreşim, herhangi bir dış yük tarafından yapı üzerinde bulunduğu etki sonucunda yapının davranışlarında sürekli olarak uzayda hareketlerin tekrarladığı saptanır. Yani periyodik bir davranış hareketi sergiler. Harmonik analizi gerçekleştirmek için öncelikle bir modal analiz işlemi gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Modal analizin yapılmasındaki amaç sistemin üzerindeki doğal frekansları incelemek ve yapıda oluşan titreşim oranlarını görmektir.

Bu çalışmada modal analizde elde edilen tüm frekansların dataları harmonik analize aktarılarak veriler elde edilmektedir. Gerçekleştirilen harmonik analizde modellere etki ettirilecek dış kuvvetler hangi bölgelere uygulanacağı ve bunun ne kadar olacağı yapı üzerinde tanımlanır. Harmonik titreşim analizinde genel olarak yapıda bir veya birkaç kuvvetin maruz kaldığı bölgelerde ve buna bağlı olarak yapının tümünde oluşacak zorlanmış titreşim frekanslarının sonucunda yapıda, gerilme, titreşim, deformasyon ve şekil değiştirme gibi faktörlerin hangi frekansta oluşacağı incelenmektedir. Bunları şu yöntemlerle görmek mümkündür;

Harmonik titreşim analizinde, yapının önceden belirlenen bir frekans, zaman ve faz açısı değerlerinde uzayda sergileyeceği davranışlar sonucunda oluşacak deformasyon tepkileri tespit edilebilmektedir. Sistemde bulunan tüm uzuvlar, gerçekleştirilmiş hareketlere bağlı olarak gerilme, yer değiştirme ve ivme değerlerinin grafiksel sonuçları elde edilebilmektedir. Ayrıca yapının uzayda yapmış olduğu hareketler sonucunda oluşacak şekil değişikliği ve bir konumdan başka konuma gidip durduğu andaki değerleri faz olarak grafiksel verilerde incelemek mümkündür.

3.3. Modal Analiz Uygulaması

Modal analizde yapının deformasyonu açısından 6 mod şeklinde incelenmiştir. Modal analizde, yapı üzerinde herhangi bir dış kuvvet olmaksızın yapının doğal titreşim analizi elde edilmeye çalışılmıştır. Böylece sisteme ait titreşim karakteristik özelliklerini deneysel olarak elde edilmiş olur. Şekil 3.5.de modal analiz için hazırlanan model gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Modal analiz deneyi robot kol

Çizelge 3.5. Modal analiz ansys sonuç tablosu

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Total Deformation 3	Total Deformation 4	Total Deformation 5	Total Deformation 6
State	Solved					
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	All Bodies					
Definition						
Type	Total Deformation					
Mode	1,	2,	3,	4,	5,	6,
Identifier						
Suppressed	No					
Results						
Minimum	0, mm					
Maximum	8,9575 mm	7,8924 mm	17,079 mm	14,747 mm	17,85 mm	15,372 mm
Average	2,1965 mm	2,5199 mm	2,5207 mm	2,299 mm	2,4248 mm	2,6209 mm
Minimum Occurs On	NONE(02_KOL1 KONUM-cizgisel Rigid Dynamics)					
Maximum Occurs On	Cisim2(02_KOL1 KONUM-cizgisel Rigid Dynamics)					
Information						
Frequency	36,141 Hz	51,197 Hz	78,295 Hz	89,014 Hz	100,86 Hz	115,56 Hz

Çizelge 3.5. de ve Çizelge 3.6. da ansys workbench arayüzünde modal analiz için öngörülen ayarlama bilgisi incelenebilir. Tablolarda öngörülen sınır şartlarının yanında bu analizin kaç mod ile gerçekleştirildiği ve buna bağlı olarak elde edilen mod cevapları bulunmaktadır.

Çizelge 3.6. Ansys modal analiz ayarlar tablosu

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Options	
Max Modes to Find	6
Limit Search to Range	No
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
Advanced	
Contact Split (DMP)	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Surface Stress	No
Back Stress	No
Strain	Yes
Contact Data	No
Nodal Forces	Constrained Nodes
Volume and Energy	No
Euler Angles	No
Calculate Reactions	Yes
Store Modal Results	Program Controlled
General Miscellaneous	No
Result File Compression	Program Controlled

Bu analiz için lineer contact grubu seçilerek uygulanmıştır. Robot kolun alt taraftan yer ile teması olacak şekilde her dört ayağından sabitlenmiştir. (açısal hareket analizinde dört adet ayaklardan sabitlenmesi yerine sehpa alt kısmından yer ile sabitlenmiştir bu durum elde edilmek istenen analiz sonucunu etkilememektedir) Sistemde incelenmek istenilen en kritik bölge olarak görülen robot kolun en uç bölgesidir. Robot kolun en uç bölgesinde oluşan maksimum toplam deformasyon 17,079 mm olarak ölçülmüştür. Bu değer, sistem 100,86 Hz doğal frekansındayken elde edilmiştir. Sistemin serbestlik derecesi sayısı kadar farklı tipte titreşim modu bulunmaktadır. Her bir moda ait bir doğal frekans oluşmaktadır. İncelenen robot kol, üç serbestlik derecesine sahip bir sistem olması sebebiyle sistemde üç ayrı step motor yerleştirilmiştir. Bu motorların her birinin dönme hızı 500 dv/dk'dır. Bu dönme hızını frekans değeri denklem 3.1'de gösterildiği gibi Hz cinsine çevirirsek;

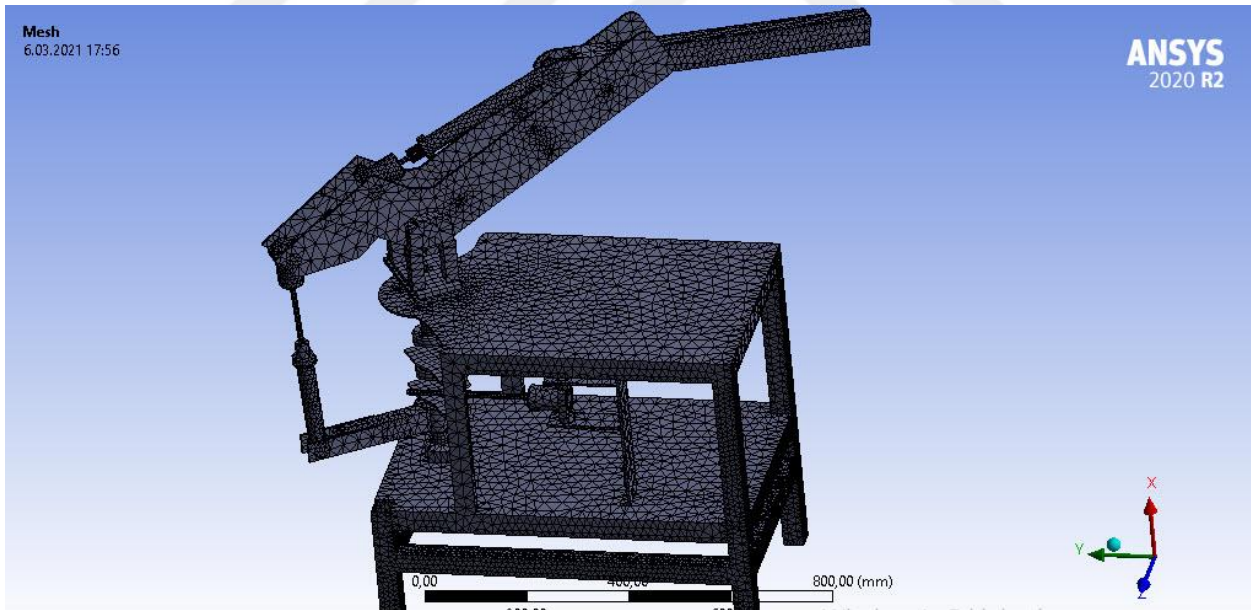
$$\text{devir/dakika} = 500/60 = 8,33 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Elde edilen 8,33 Hz frekans, sistem üzerinde bulunan motorların maksimum frekansını teşkil eder.

3.4. Mesh İşlemi

Mesh işlemi, analiz sonuçlarının tutarlı bir şekilde elde edilebilmesi için önemli faktörlerden birisi olduğu söylenebilir. Mesh işlemi bir nevi analiz için kontrol edilecek yapının sayısal değer cinsinden incelenmeye ortam hazırlamaktadır. Bu sayede yapı küçük elemanlara bölünerek incelenmesi gerçekleştirilir. Default (varsayılan) mesh, Ansys workbench arayüzündeki herhangi bir detay ayar girilmeden oluşturulan temel mesh ayarlarından biridir. Mesh işlemi analiz yapılacak parça üzerindeki detaylara göre yapılması gerekir. Default mesh ile mesh işlemi yapıldıktan sonra workbench arayüzünde bulunan detay ayarlar yapılarak meshleme işlemi tamamlanmaktadır. Yapıda default mesh türü uygulanıp analiz yapılabileceği gibi farklı mesh türlerinin de ayarlanıp ve ince detaylar da verilerek meshleme işlemi yapılabilir. Yapı detaylı profillere sahipse, verim açısından default mesh işlemi ile analiz yapılması tavsiye edilmez. Eğer yapı fazla detay barındırıyorsa meshleme işleminin detaylandırılıp iyileştirilmesi ve analiz sonuçlarında daha sağlıklı verilerin elde edilmesini sağlamak gerekmektedir.

Analiz için meshleme işlemi uygulanacak robot manipülatörün frekans analizleri inceleneceğinden dolayı çok detaylı ve hassas bir mesh işlemine tabi tutulmamıştır.



Şekil 3.6. Mesh işleminin görünümü

Analizi yapılan robot manipülatöre mesh işlemi, workbench ara yüzündeki mesh bölümünde bulunan sizing mesh türü default ayarında uygulanmıştır. Yapılan sizing mesh sonucunda, robot manipülatörün gövdesi ve tüm eklemleri üzerinde toplam olarak 193754 nokta olduğu ve 85831 elemana ayrıldığı görülmüştür. Elemanlar arasındaki mesafe ise 15 mm olarak

belirlenmiştir. Şekil 3.6. de görülen mesh işlemindeki detay parsellenmiş görüntüsünü ifade etmektedir.

Çizelge 3.7. Ansys mesh ayarlar tablosu 1

Object Name	Mesh
State	Solved
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	15, mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	1964,5 mm
Average Surface Area	7872,7 mm ²
Minimum Edge Length	9,8798e-002 mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	193754
Elements	85831
Model Assembly	
Read Only	No

Model için öngörülen ve uygulanan mesh işlemi değerleri Çizelge 3.7. ve çizelge 3.8. de incelenebilir. Bu analiz mesh işlemi rijit dinamik analizi için uygulanmıştır. Diğer analiz incelemeleri olan harmonik açısal hareket analizi ile harmonik çizgisel hareket analizi için meshleme işlemi gerekmediğinden bu işlem yapılmamıştır.

Tablo 3.8. Ansys mesh ayarlar tablosu 2

Object Name	Body Sizing
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	10, mm
Advanced	
Defeature Size	Default
Behavior	Soft

3.5. Harmonik Çizgisel Hareket Analizi

Zorlanmış frekans ile doğal frekansın birbirine eşitlendiği durumda rezonans durumu meydana gelmektedir.

$$\text{Zorlanmış frekans} \rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.2)$$

$$\text{Doğal frekans} \rightarrow f_0 = \frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (3.3)$$

Şeklinde ifade edilir. Buradan;

$$f = f_0 \rightarrow \omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.4)$$

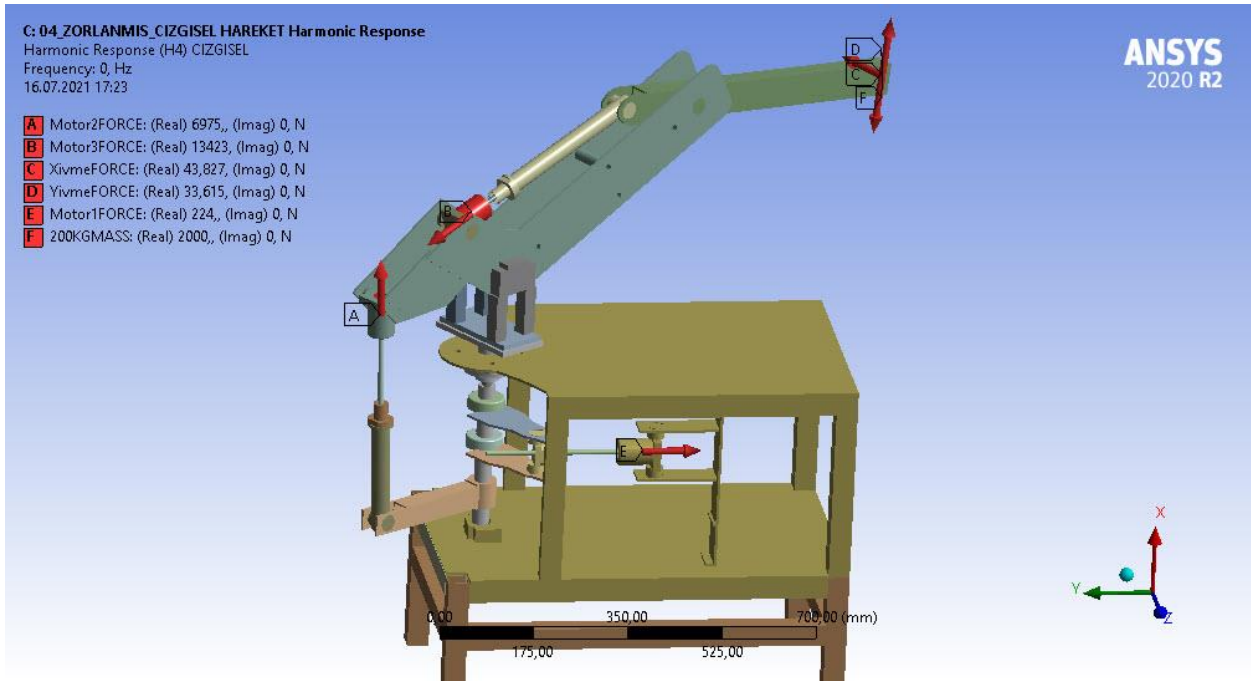
$$\omega^2 = \frac{k}{m} \rightarrow x = \frac{c}{k} - m \cdot \frac{k}{m} = \frac{c}{0} \rightarrow (\text{rezonans}) \quad (3.5)$$

Robot kol üzerinde bulunan motorların dönme hızına bağlı doğal frekans oranı 8,33 Hz olduğu hesaplanmıştır. Bu frekans sistemin zorlanmış titreşim frekansıdır. 8,33 Hz frekansının, modal analiz ile elde edilen en düşük doğal frekans 36.141 Hz değeriyle veya elde edilen diğer frekanslarla çakışmaması herhangi bir rezonans (doğal frekansı ile zorlama frekansın çarpışması sonucu meydana gelen sürekli salınım) durumunu oluşturma ihtimalinin olmadığı sonucuna vardırır.

Harmonik titreşim analizi işlemi gerçekleştirmeden önce bir modal analiz deneyi gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sırasında robot kolun harekete başladıktan sonra hareketin bir

periyodunu bitirdiği ve yeni bir periyot hareketine geçmeden hemen önceki durağan durumunun doğal frekansı incelenmiştir.

Şekil 3.7. de model üzerine uygulanan kuvvetler gösterilmiştir. Ansys workbench arayüzünde gerçekleştirilen harmonik analiz için öngörülen ve uygulanan ayar detayları Çizelge 3.9. da gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Harmonik çizgisel harekette uygulanan kuvvet bölgeleri

Rijit dinamik analizinde robot kola rastgele X, Y ve Z koordinatlarına sahip belli bir noktaya kadar bir deplasman sağlanmıştır. Bu hareketin sonucunda robot kolun uç noktasında yapmış olduğu X, Y ve Z koordinatlarında oluşan en yüksek ivme değerleri elde edilmek istenmiştir. En yüksek ivme değerlerini tahrik noktasında bulunan ve motorlara bağlı X, Y veya Z bileşenlerine paralel olarak konumlanan millere çizgisel hız şeklinde bir dış etki olarak tatbik edilmiştir. Yani harmonik titreşim analizinde, çizgisel hız uygulanarak robot koldaki 1. kolun harmonik frekanslarını titreşim, genlik ile stress durumları açısından incelenmeye çalışılmıştır.

Rijit dinamik analizinde robot kola çizgisel hız uygulanarak, robot kol ucunda serbest hareket sonucunda oluşan en yüksek ivme değerleri;

X koordinatında en yüksek ivme değeri $214,84 \text{ mm/s}^2$

Y koordinatında en yüksek ivme değeri $164,78 \text{ mm/s}^2$

Z koordinatındaki en yüksek ivme değeri ise düşük bir değer çıktığından dolayı bu değer ihmal edilmiştir.

Çizelge 3.9. Ansys harmonik çizgisel hareket ayarlar tablosu

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Step Controls	
Multiple RPMs	No
Options	
Frequency Spacing	Linear
Range Minimum	0, Hz
Range Maximum	200, Hz
Solution Intervals	100
User Defined Frequencies	Off
Solution Method	Mode Superposition
Include Residual Vector	No
Cluster Results	No
Skip Expansion	No
Store Results At All Frequencies	Yes
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Surface Stress	No
Back Stress	No
Strain	Yes
Contact Data	Yes
Nodal Forces	No
Volume and Energy	Yes
Euler Angles	Yes
Calculate Reactions	Yes
General Miscellaneous	No
Expand Results From	Program Controlled
-- Expansion	Modal Solution
Result File Compression	Program Controlled
Damping Controls	
Eqv. Damping Ratio From Modal	No
Damping Define By	Damping Ratio
Damping Ratio	0,
Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
Stiffness Coefficient	0,
Mass Coefficient	0,

Robot kolun hareketi esnasındaki ivme değerlerinin tespiti sonrasında harmonik titreşim çizgisel hız analizi için dış kuvvet olarak gösterilecek olan kuvvetleri, robot kolu uç kısmına ne kadar yük bindirileceği tespit edilmiştir. Bu yükler harmonik titreşim çizgisel hız analizi için bir dış etki şeklinde remote force olarak sınır şartları belirlenmiştir.

Rijit dinamik analizde gerçekleştirilen serbest hareket sonucunda motorlara X, Y ve Z doğrultularında belli kuvvetler binmiştir. Bu kuvvetlerin maksimum seviye olanları alınıp yine o doğrultuda harmonik çizgisel hız analizinde motorun bağlı olduğu pistonlara çizgisel hız olarak tatbik edilmiştir. Bu kuvvetler her üç motorun oluşturduğu kuvvet tepkisi oranında uygulanmıştır. Değerlerin maksimum alınma sebebi sistem üzerinde oluşan maksimum kuvvetlere göre titreşim analizini elde etmektir. Rijit dinamik analizinde, aşağıda sırasıyla hangi motora ne kadar yük bineceği tespiti yapılmıştır:

Hareket anında birinci motor üzerinde (alt motor) oluşan kuvvet -224 N olup bu motora bu değerde tahrik bir dış kuvvet tanımlanmıştır. İkinci motorda (orta motor) oluşan kuvvet 6975 N olup bu motora bu değerde tahrik bir dış kuvvet tanımlanmıştır. Son olarak üçüncü motorda (üst motor) oluşan kuvvet 13423 N olup bu motora da bu kuvvet kadar tahrik bir dış kuvvet

tanımlanmıştır. Bu kuvvetler çizgisel hız şeklinde motor pistonlarına bağlı olan millere verilerek sınır şartı olarak uygulanmıştır. Tüm bu kuvvetler harmonik hareket analiz kısmında uygulanmıştır.

Yukarıda belirlenen sınır şartlarının haricinde robot kolun en uç kısmına bir koordinat sistemi atanmış olup bu koordinat sisteminin tam orta noktasına -X yönünde 200 kg'lık bir sabit kuvvet ağırlık merkezi yönünde mass (kütle) şeklinde tanımlanmıştır Robot kolun uç noktasında doğru bir şekilde harmonik frekans analizi elde etmek için robot kolun en uçta bulunan kol ağırlığı da sınır şartları olarak belirlenmiştir. Bu ağırlık 3.79 kg değerinde olup yaklaşık olarak değeri 4 kg şeklinde kabul edilmiştir. Robot kolda önceden belirlediğimiz 200 kg'lık kuvvetin bağlı olduğu nokta üzerinde robot kolun uç noktasına ve ağırlık merkezi yönünde bu oranda bir dış kuvvet tayin edilmiştir.

Bu kuvvetler toplamı olan 204 kg, yukarıda elde edilen sırasıyla X ve Y yönündeki en yüksek ivme değeri Denklem 3.6 ve 3.7'deki kuvvet formülünden yararlanılarak kuvvet cinsinden hesaplanıp uygulanmıştır.

$$F=m.a=204.214,84=43,827 \text{ N} \quad (3.6)$$

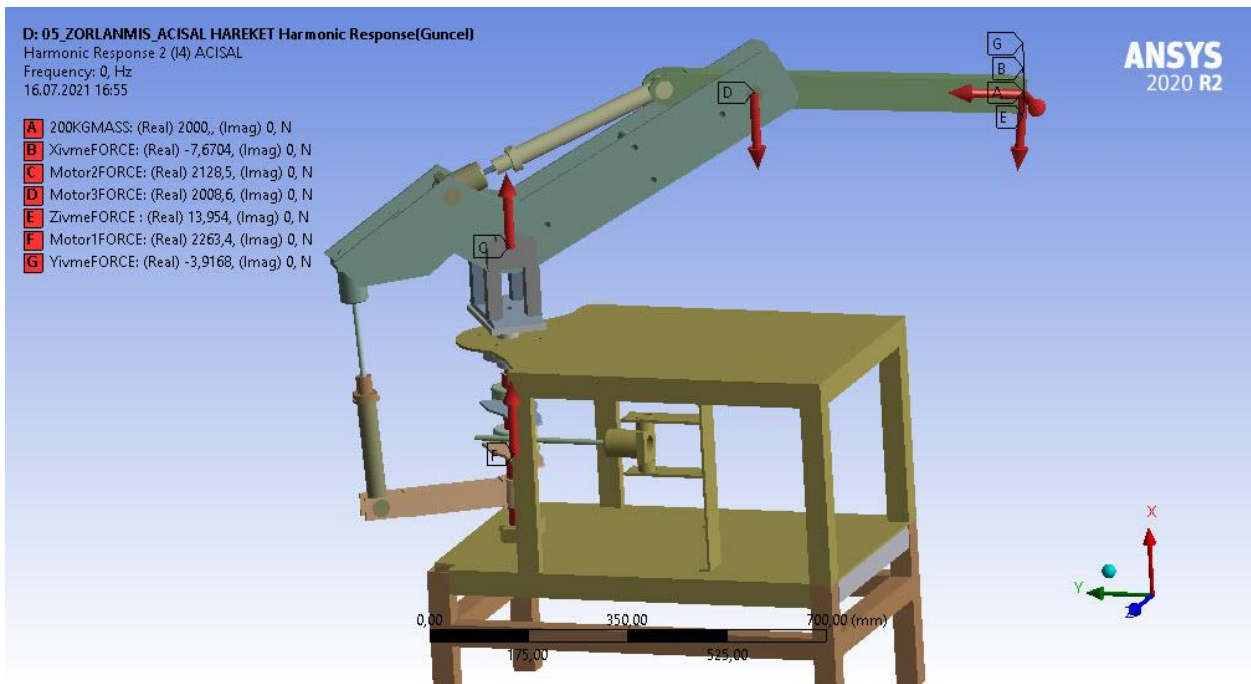
$$F=204.164,78=33,615 \text{ N} \quad (3.7)$$

Robot kolun uç noktasına konumlandırılmış olarak bulunan koordinat sisteminin merkezine yerleştirilen hayali nokta sırasıyla yukarıda elde edilen dış kuvvetler X ve Y koordinatları doğrultusunda tanımlanmıştır. Z koordinatı doğrultusundaki ivme değeri küçük olduğundan daha önce belirtildiği gibi ihmal edilmiştir. Bundan dolayı Z koordinatı yönünde herhangi bir dış kuvvet tanımlanmamıştır.

Yukarıda belirlenen tüm bu dış kuvvet girdilerinin belirlenmesinden sonra harmonik analiz belli frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Modal analizde robot kol üzerinde toplam deformasyon oranının en yüksek olduğu sayısal değeri 115.56 hz frekanstır. Bu frekans değerinin en az 1.5 katı aralığı incelenmiştir. Bu frekans aralığı incelenmesi gereken kritik bir aralıktır. Bu frekans aralığı tüm analizler için geçerli bir orandır (1.5 kat oranı). Analiz için öngörülen frekans Aralığı 0-200 Hz olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu frekans değeri 100 adet aralığa bölünerek incelenmiştir. Sönümlenme oranı ise tüm analizler için optimum değer olan 0,01 olarak girilmiştir.

3.6. Harmonik Açısal Hız Analizi

Harmonik çizgisel hareket analizi için gerçekleştirilen rijit dinamik analizde robot kol serbest bir hareketiyle belli bir X, Y ve Z ye sahip koordinat noktasına kadar hareket ettirilmiştir. Harmonik açısal hareket analizi ile harmonik çizgisel hareket analiz sonuçlarının kıyaslanması için rijit dinamik analizini açısal hareket modeli için de incelenmiş ve çizgisel hareket deplasmanı elde edilmiştir. Aynı hareketi yakalamak için bazı jointlere (eklem bölgeleri) belirli sınır şartları verilmiştir. Böylece her iki model için harmonik titreşim analizinde aynı şartlar elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.8. Harmonik açısal harekette uygulanan kuvvet bölgeleri

Harmonik çizgisel hareket analizinde olduğu gibi robot kolun X, Y ve Z koordinatlarına gelinceye kadar en yüksek ivme değerleri elde edilmiştir. Robot kola verilen bu serbest hareketler, açısal dönme kuvveti şeklinde motorların bağlı olduğu döndürme miline verilmiştir. Robot kolun en ucuna diğer çizgisel hareket analizinde olduğu gibi bir dış kuvvet olarak ve yerçekimi yönünde sabit 200 kg'lık bir kuvvet uygulanmıştır. Uç kol ağırlığı olan 4 kg ile yerçekimi yönüne kolun uç noktasına yerleştirilmiştir. Şekil 3.8. de model üzerine uygulanan kuvvetler gösterilmiştir. Kolun ucunda oluşan toplam 204 kg'lık kuvvet, rijit dinamik analizinde oluşan ve X, Y ve Z koordinatları yönünde elde edilen maksimum ivme değerleri ile çarpılıp oluşan kuvvetler harmonik açısal hareket analizi için dış sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Bu dış kuvvetler sırasıyla X, Y ve Z

koordinatları yönünde ve kolun uç noktasına uygulanmıştır. Rijit dinamik analizinde robot kola açısal hız uygulanarak, robot kol ucunda serbest hareket sonucunda oluşan en yüksek ivme değerleri;

X Koordinatında en yüksek ivme değeri $-37,609 \text{ mm/s}^2$

Y koordinatında en yüksek ivme değeri $-19,202 \text{ mm/s}^2$

Z koordinatında en yüksek ivme değeri $-68,477 \text{ mm/s}^2$ olarak ölçülmüştür.

Rijit dinamik analizde, robot kol ucunun serbest hareketlerini sonlandırdığı X, Y ve Z koordinatlarındaki konumu anında elde edilen en yüksek ivme değerleri ile ayrıca kol ucunda uygulanmış toplam 204 kg'lık kuvvet, kuvvet formülü yardımıyla hesaplanıp harmonik açısal hareket analizi için robot kolun ucuna bir dış kuvvet olarak atanmıştır.

Bu kuvvetler sırasıyla;

X yönünde

$$F = m.a = 204 \times -37,609 = -7,672 \text{ N} \quad (3.8)$$

Y yönünde

$$F = m.a = 204 \times -19,202 = -3.917 \text{ N} \quad (3.9)$$

Z yönünde

$$F = m.a = 204 \times -68,477 = -13.969 \text{ N} \quad (3.10)$$

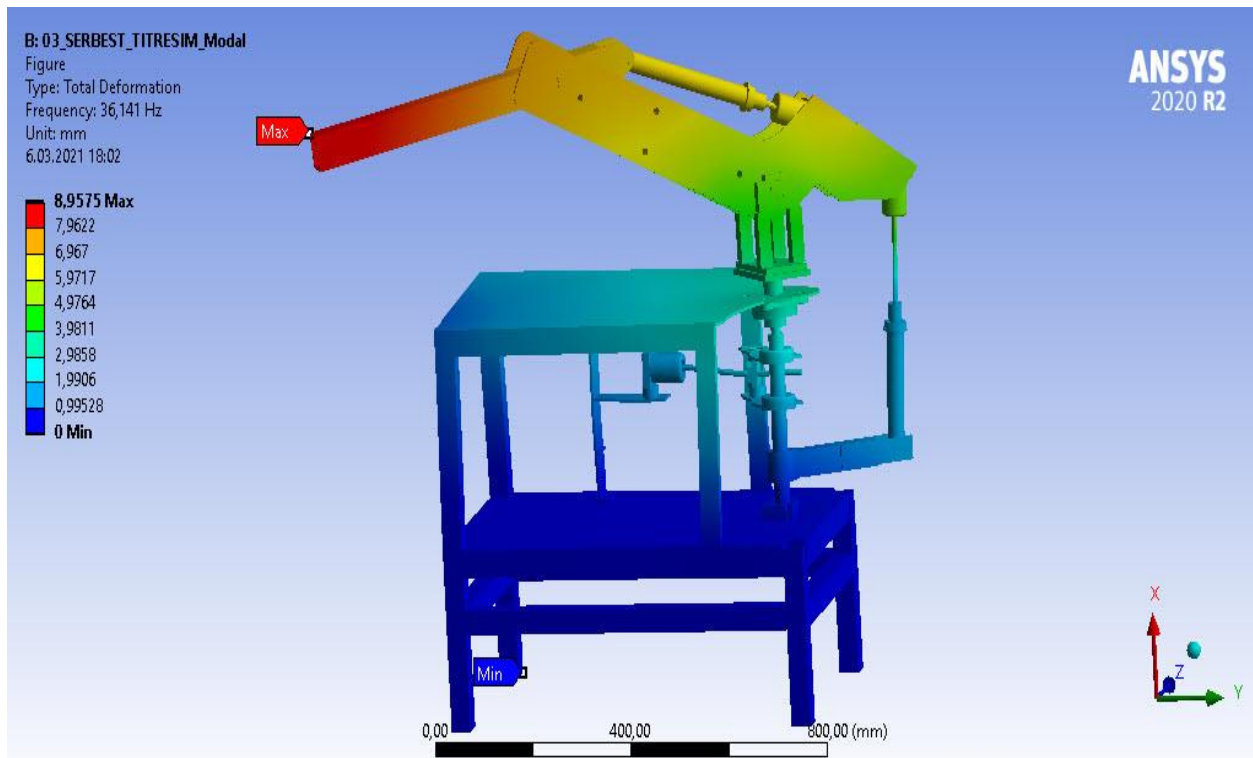
olarak bulunup uygulanmıştır.

Rijit dinamik analizi sonucunda, maksimum kuvvetler sırasıyla birinci motor üzerinde - 2263,4 N, ikinci motor üzerinde -2128,5 N ve üçüncü motor üzerinde 2008,6 N olarak hesaplanmıştır. Belirlenen bu kuvvetler motorların bağlı olduğu millere bu değerler oranında açısal hız analizinde açısal kuvvet şeklinde tanımlanmıştır. Böylece harmonik çizgisel analiz için uygulanan tüm dış etki kuvvetlerini tamamen eşit şartlar şeklinde harmonik açısal analiz için de uygulanıp oluşturulan eşit şartlardaki analiz sonuçlarını değerlendirme ortamı yakalamak istenmiştir.

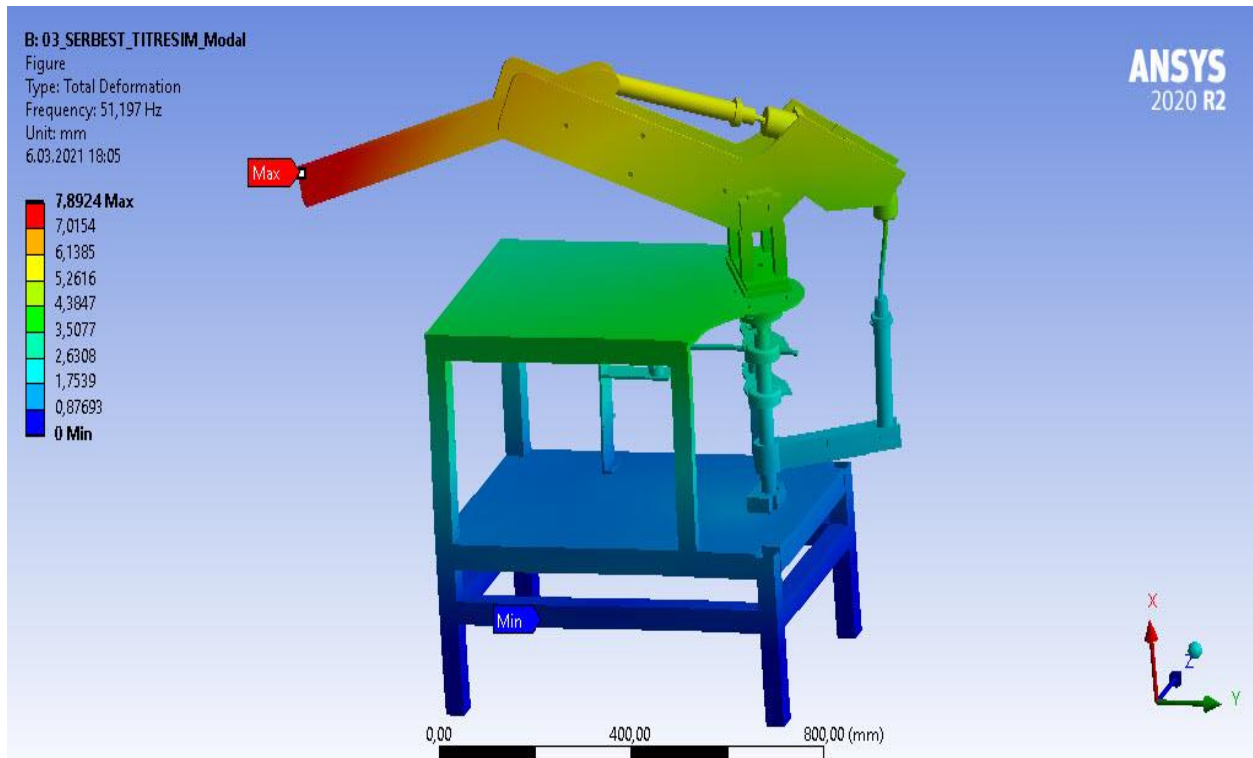
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Modal Analizde Toplam Deformasyon Analiz Sonuçları

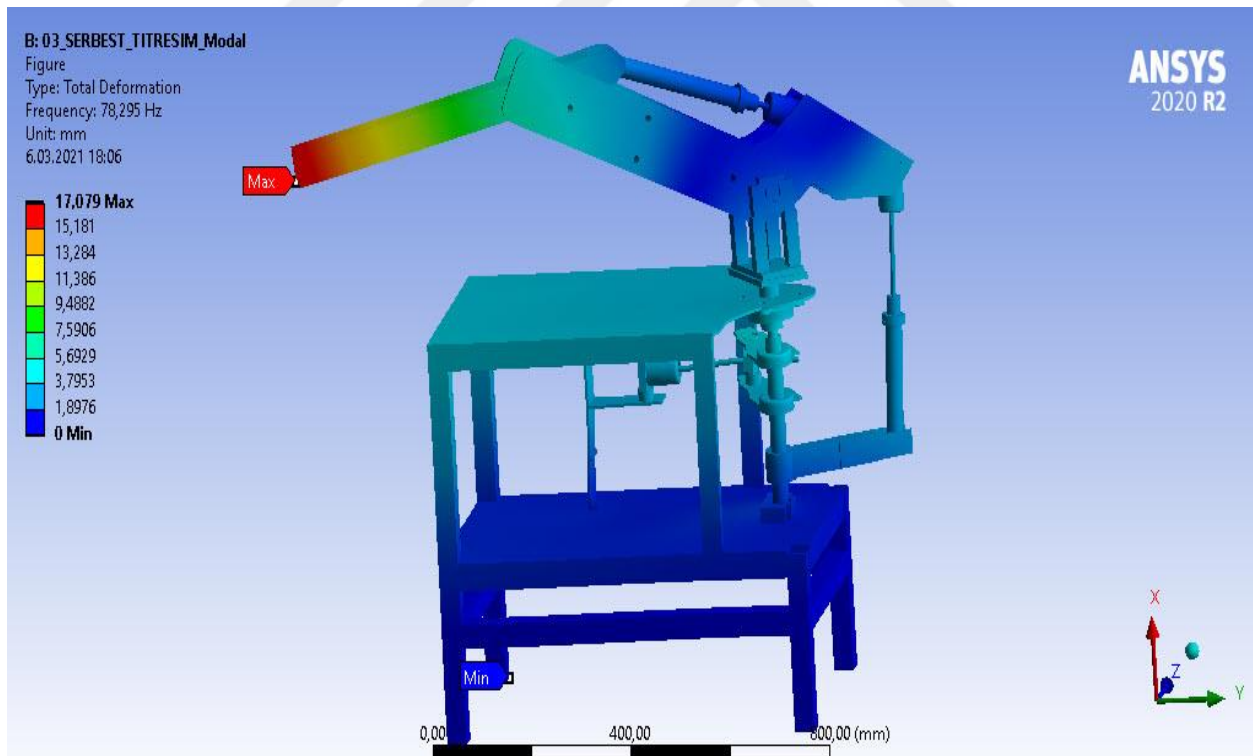
Robot kolda zorlanmış harmonik frekanslarını incelemekten önce robot kolun modal analizi uygulanmıştır. Böylece yapının doğal frekans aralıkları tespit edilmiştir. Doğal frekanslar Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.daki görselleriyle de paylaşıldığı gibi 6 kritik faz şeklinde incelenmiş olup bu mod'larda oluşan toplam deformasyona bağlı doğal frekanslar elde edilmiştir.



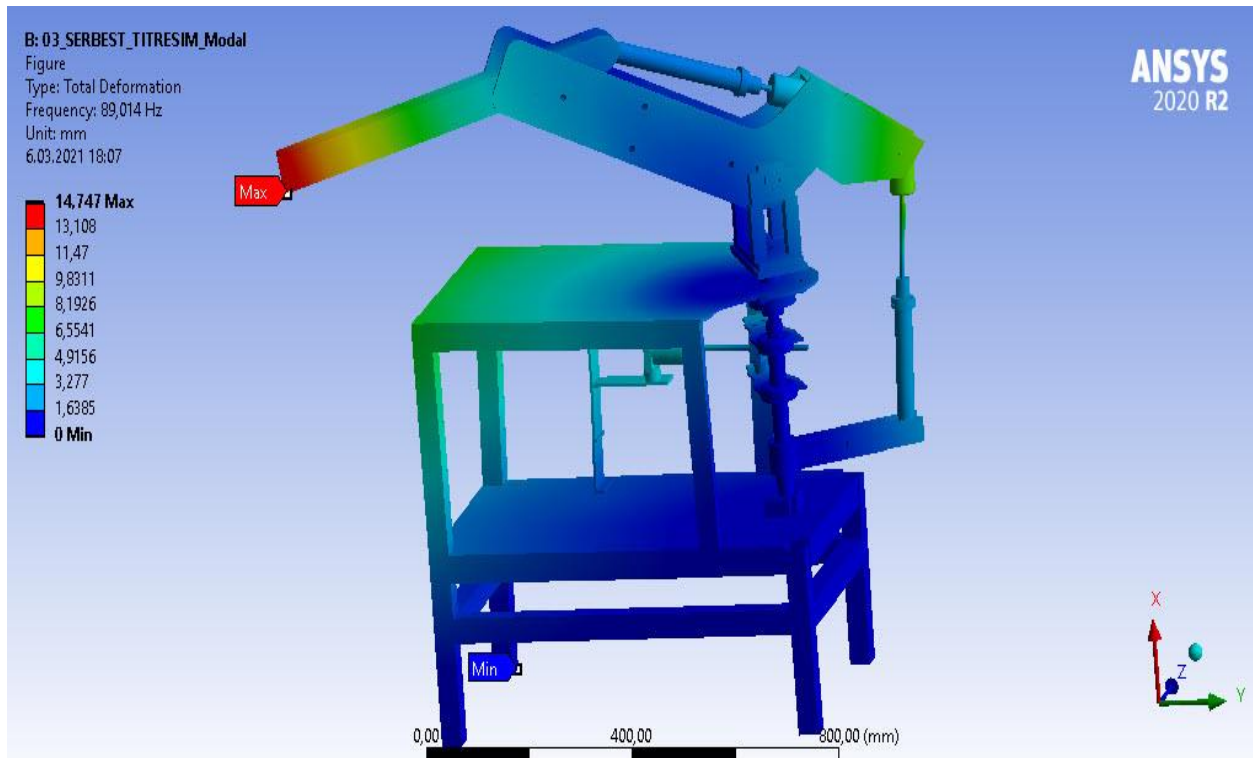
Şekil 4.1. Modal analiz mod 1



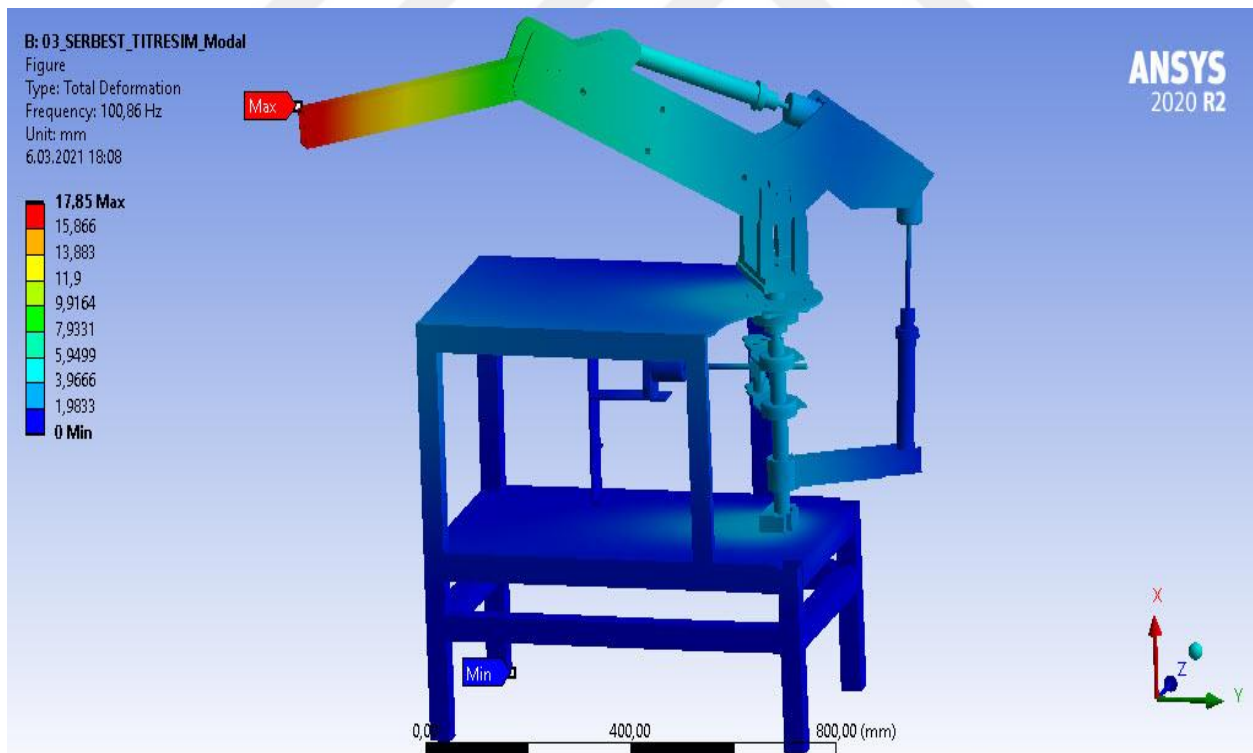
Şekil 4.2. Modal analiz mod 2



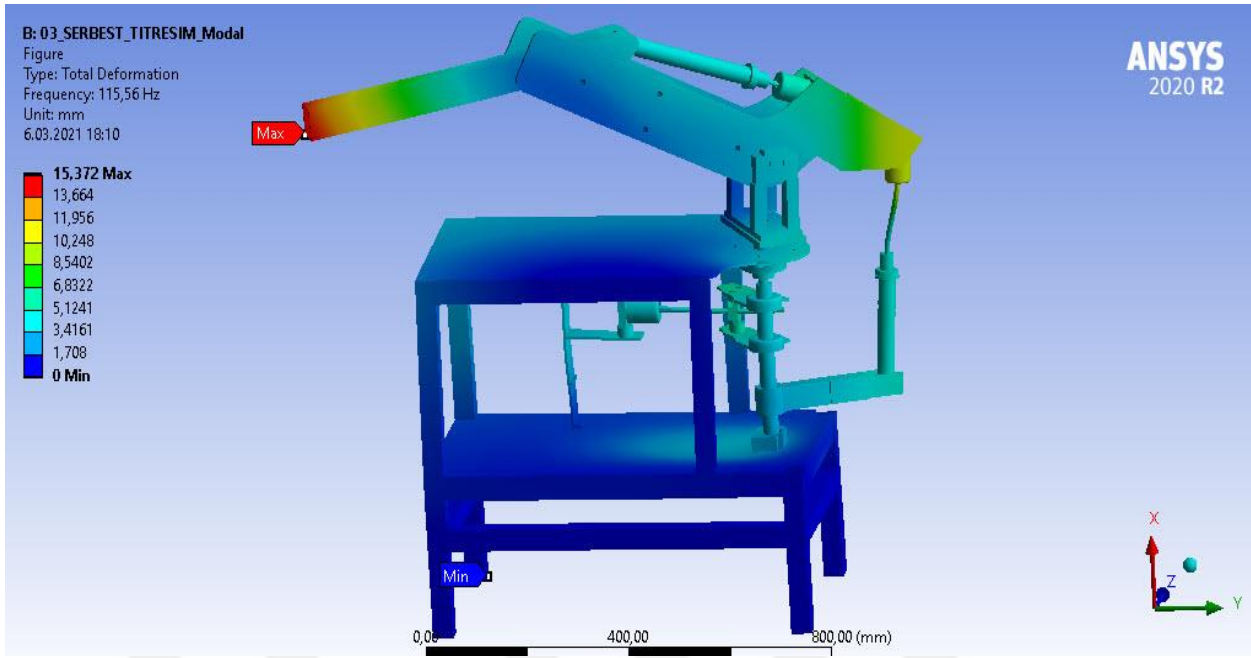
Şekil 4.3. Modal analiz mod 3



Şekil 4.4. Modal analiz mod 4



Şekil 4.5. Modal analiz mod 5



Şekil 4.6. Modal analiz mod 6

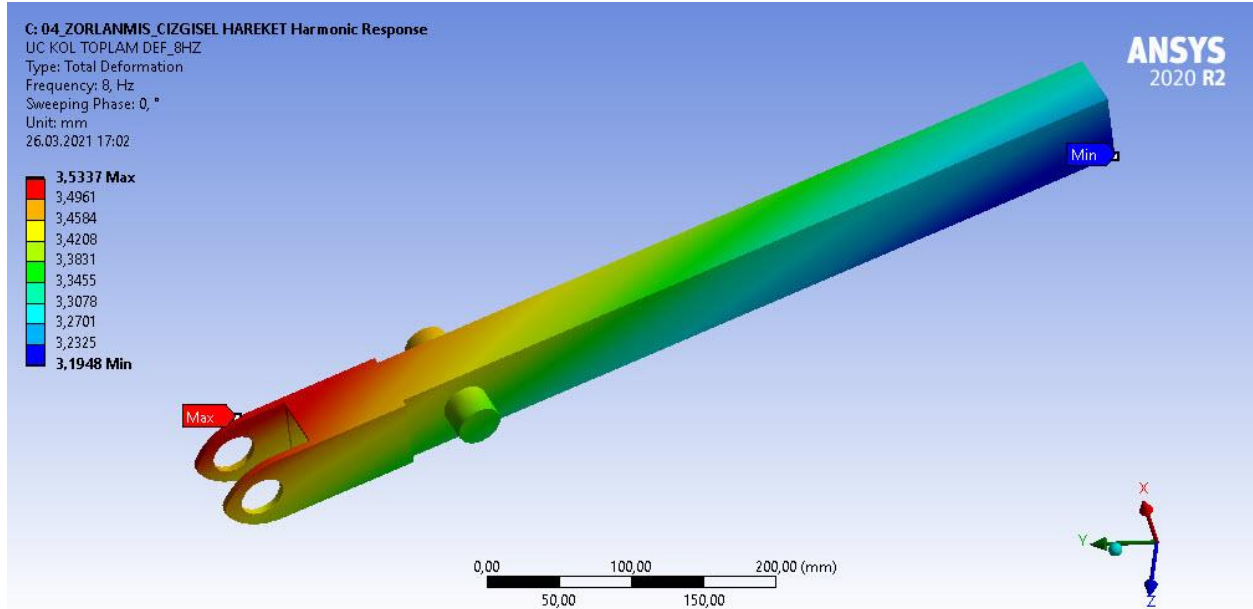
Uygulanan modal analizde toplam deformasyon yoğunluğunun robot kolun uç kısmında olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu sonuç robot kol sisteminin iskelet yapısı durumu göz önüne alındığında bu beklenen bir durumdur. Çizelge 4.1. de modal analizde elde edilen frekans değerleri gösterilmiştir. Robot kol 1. mod değeri olan 36,141 frekansta yaklaşık 9 mm maksimum uzamaya neden olmuştur. 6. mod değeri olan 115,56 frekansta ise maksimum uzama değeri 15 mm yi aştığı görülmektedir. Bu değerler bizlere bu sistemde meydana gelen serbest titreşim sonucunu hem sayısal değer hemde görsel olarak sunmaktadır. Daha önce elde edilen motorların oluşturduğu titreşim frekansı oranı olan 8 Hz ile modal analizin sonucunda oluşan frekans değerleri içerisinde en yakın frekans değeri 36,141 elde edilmiştir. Bu değerlerin birbirinden uzak olduğu ve rezonans durumunun gerçekleşmesi ihtimalinin oluşmayacağı değerlendirilebilir.

Çizelge 4.1. Modal analiz frekans değerleri

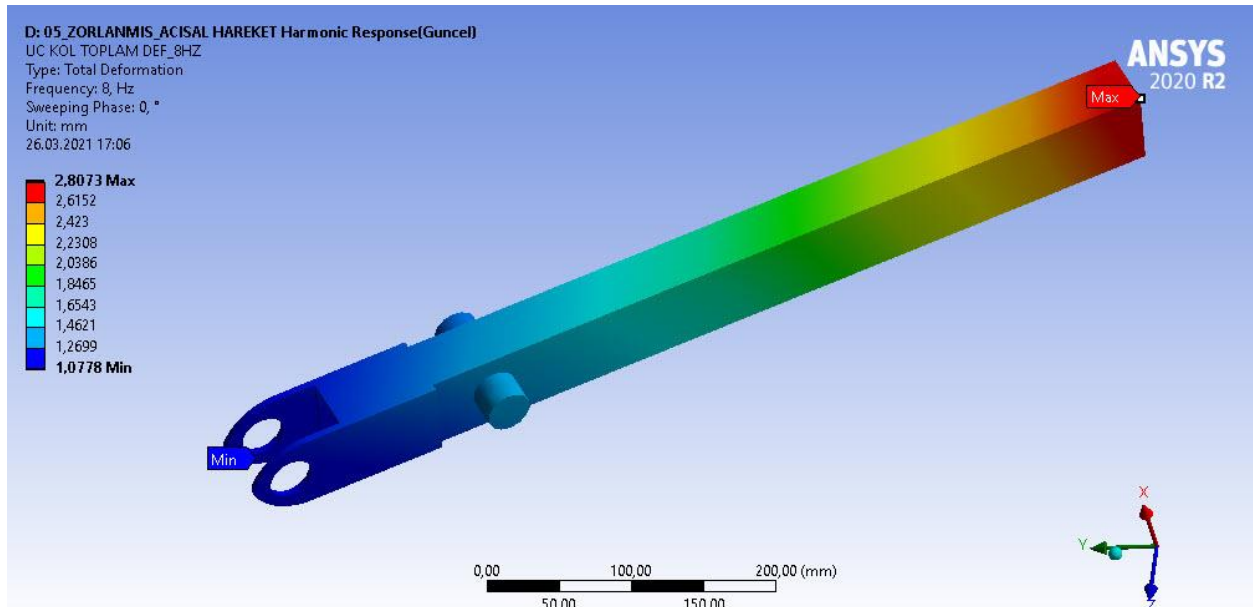
Mod	Frekans
1. Mod	36,141 Hz
2. Mod	51,197 Hz
3. Mod	78,295 Hz
4. Mod	89,014 Hz
5. Mod	100,86 Hz
6. Mod	115,56 Hz

4.2. Harmonik Analiz ile Robotun Uç Kolunda Oluşan Deformasyon ve Stress

Harmonik analiz olarak gerçekleştirilen çizgisel ve açısall hareket analizler, robot kolun uç kısmında bu analizler sonucunda 8 Hz ve 100 Hz frekanslarında deformasyona ve stress'e bağlı oluşan genlikler incelenmiştir.



Şekil 4.7. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan toplam deformasyon



Şekil 4.8. Zorlanmış açısall harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan toplam deformasyon

Şekil 4.7. ve Şekil 4.8. deki görsellerde görünen zorlanmış çizgisel ve zorlanmış açısal hareket analizleri (Harmonik analiz) 8 Hz frekansta uç kolda meydana gelen toplam deformasyonu göstermektedir.

Çizgisel hareket analizi sonucunda maksimum deformasyon oranı 3,53 mm iken açısal hareket analizinde bu oran 2,80 mm civarında seyretmiştir.

Çizgisel harekette kolun mile bağlı olduğu kısımda maksimum değer oluşurken açısal harekette ise bunun tam tersi bölgesinde; kolun en ucunda deformasyonun maksimum olduğu değer gözlemlenmiştir.

Titreşim, rijit bir sistemin denge konumundayken bir dış etki nedeniyle olduğu salınımlardır. Bir sistemde titreşimin var olabilmesi için o sistem belli bir enerjiye maruz kalması gerekmektedir. Sisteme belli bir etkide bulunarak oluşturulan titreşim serbest titreşim olarak tanımlanabilir. Sisteme bağlı olarak çalışan motorların etkisi altında harmonik hareket gerçekleştiren düzeneklerin oluşturduğu ve sisteme dışardan etkide bulunulması sonucunda meydana gelen titreşimler, zorlanmış titreşim olarak tanımlanabilir. Bu analiz yönteminde her iki modelde motorlar üzerine binen yükler ile dışardan rijit dinamik analizinde kol ucunda oluşan (1. Kol) ivme değerleri ve ayrıca kol ucuna belirlenen bir ağırlık miktarı tanımlanmıştır. İki model için oluşan zorlanmış titreşim oranları karşılaştırılmıştır. Bu iki model üzerine dış kuvvetler bakımından;

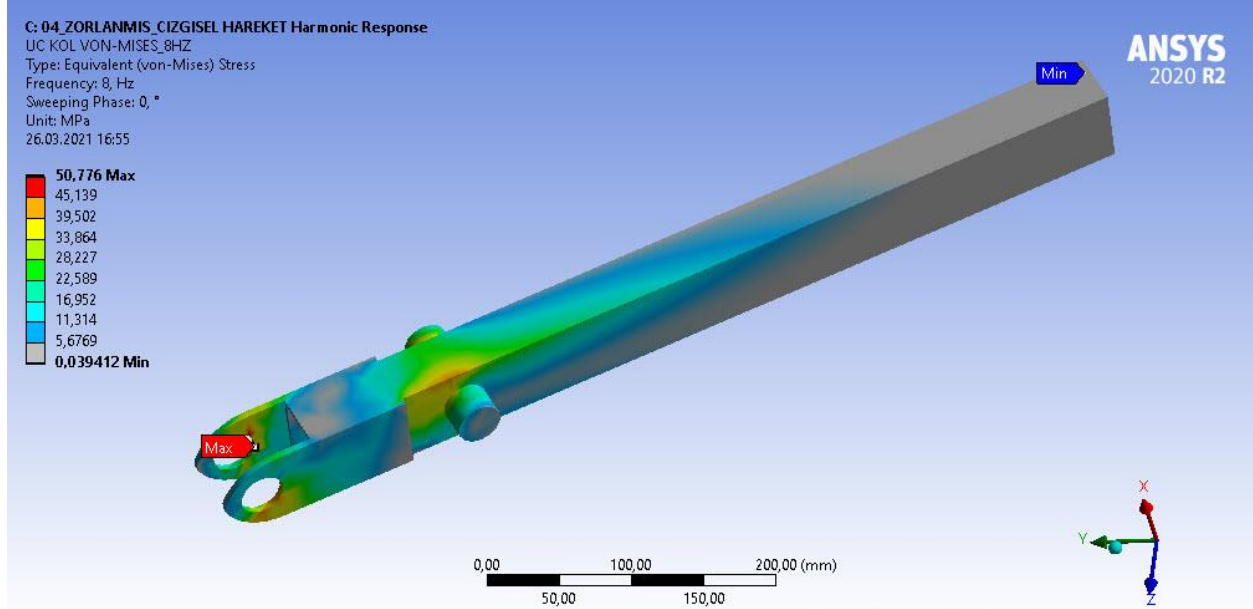
Çizgisel harmonik analiz için 1. motora -224 N, 2. Motora 6975 N, 3. Motora 13423 N ve ayrıca kol ucunda (1.kolda) oluşan ivme kuvvetleri; X koordinatına 43,827 N, Y koordinatına 33,615 N ile kol ucuna yerçekimi yönünde mass olarak 204 kg tanımlanırken açısal harmonik analiz için ise 1. motora 2263 N, 2. Motora 2128 N, 3. Motora 2008 N ve kol ucunda oluşan ivme kuvvetleri; X koordinatına -7,6704 N, Y koordinatına 3,9168 N, Z koordinatına 13,954 N ile kol ucuna yerçekimi yönünde mass olarak 204 kg tanımlanmıştır.

Tanımlanan tüm bu dış kuvvetler ile iki model için harmonik analiz ile robot kol ucunda oluşan titreşimler elde edilmiş ve titreşimin hangi modelde daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

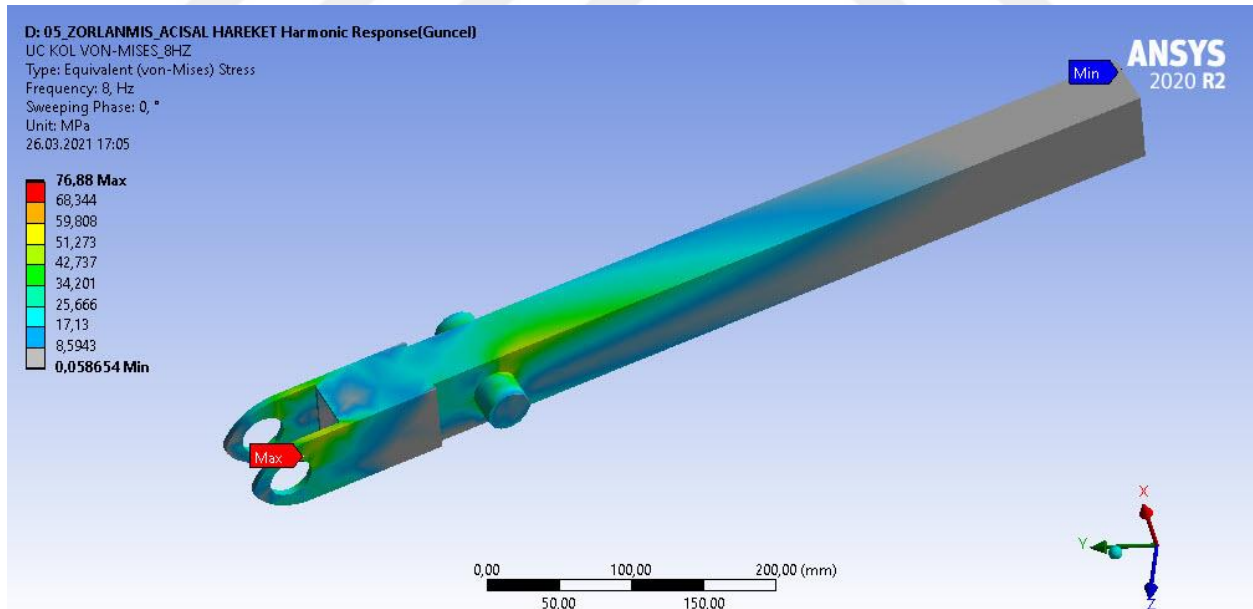
Tüm bu bilgiler ışığında robot kolda oluşan maksimum frekans değeri olan 8 Hz için genlikler incelenmiştir. Sonuç olarak çizgisel harmonik harekette robot uç kol 3,5337 mm, açısal harmonik harekette ise 2,8073 mm lik bir veri elde edilmiş olup çizgisel hareket modelin daha çok titreşim oluşturduğu yorumu yapılabilir.

Von mises stress türü, sisteme etkide bulunan bir kuvvet sonucunda sistemde oluşabilecek plastik şekil değişiminin tespiti yapılması amacıyla elde edilen bir değerdir. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. daki görsellerinde görünen zorlanmış çizgisel ve zorlanmış açısal hareket analizleri 8Hz frekansta uç kolda meydana gelen stress'i (Von-mises) göstermektedir. Zorlanmış çizgisel hareket

sonucunda oluşan maksimum değer 50,776 MPa olurken, zorlanmış açısal harekette bu oran 76,88 MPa olarak ölçülmüştür. Her iki analizde de kolun mile bağlı kısımlarında maksimum değer gözlemlenmiştir.

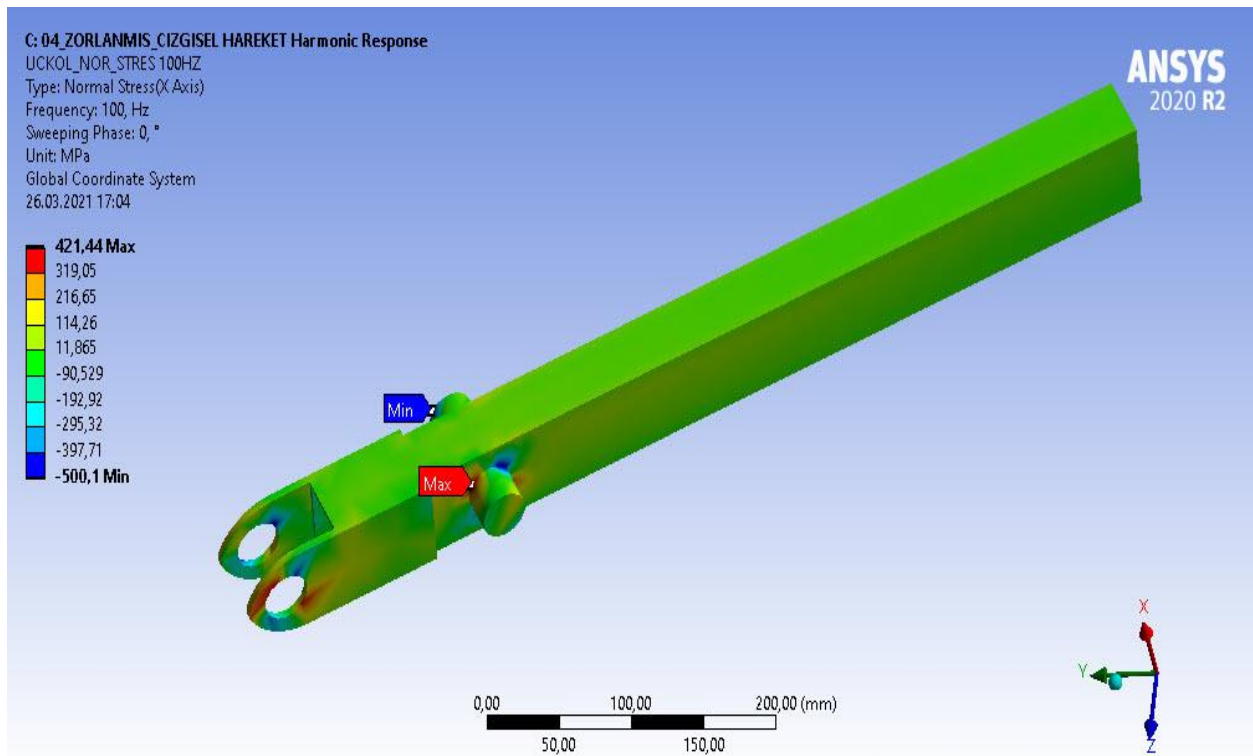


Şekil 4.9. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan stress (von-mises)

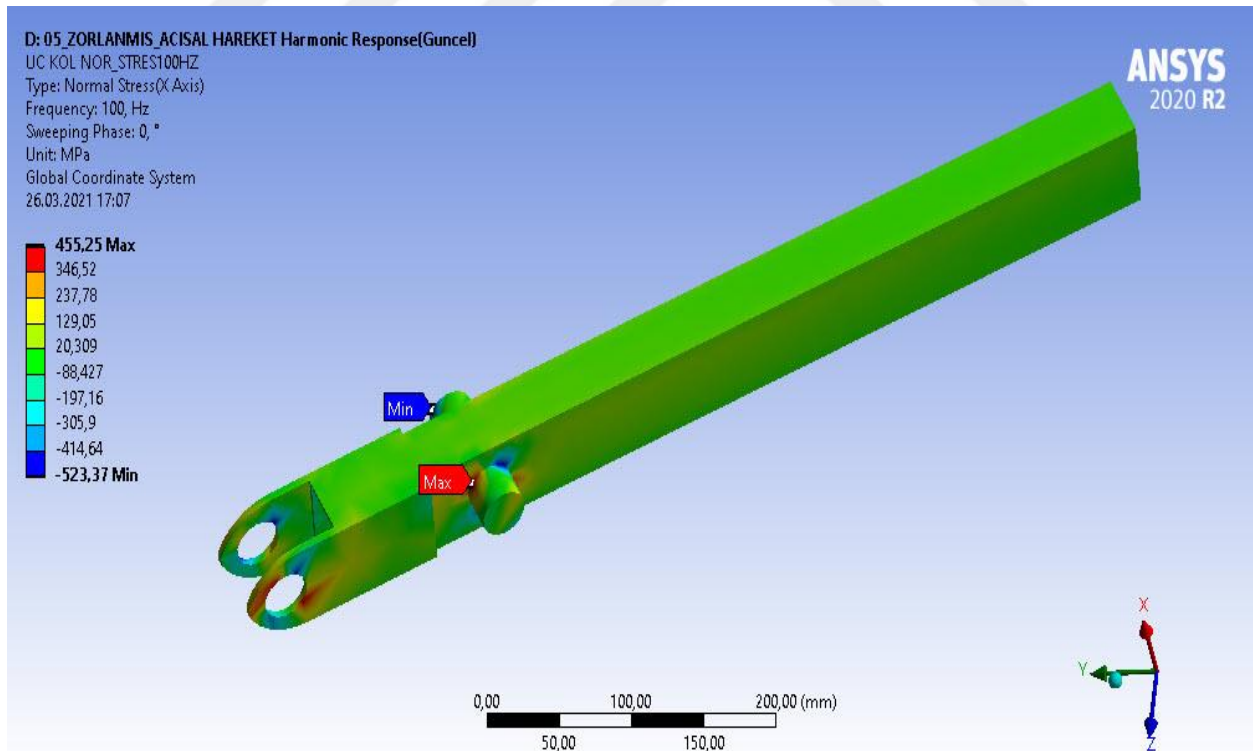


Şekil 4.10. Zorlanmış açısal harekette 8 Hz frekansta uç kolda oluşan stress (von-mises)

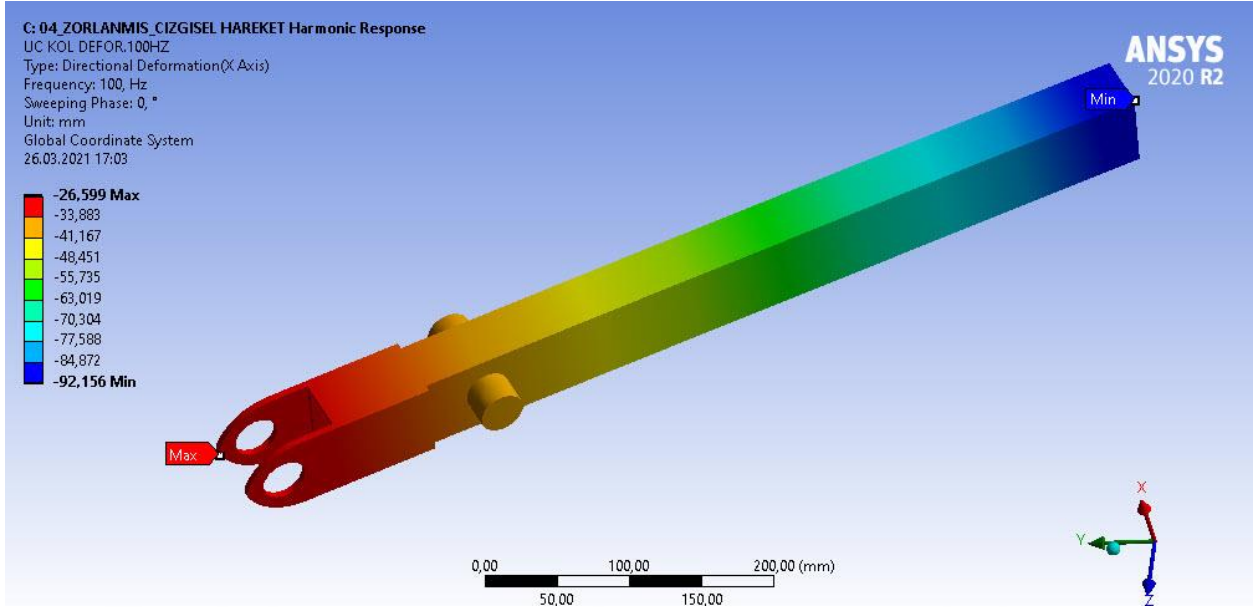
Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.deki görsellerinde robot uç kolunda, 100 Hz frekansta normal stress'e bağlı; Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 görsellerinde ise 100 Hz frekansta deformasyona bağlı genlikler gösterilmiştir.



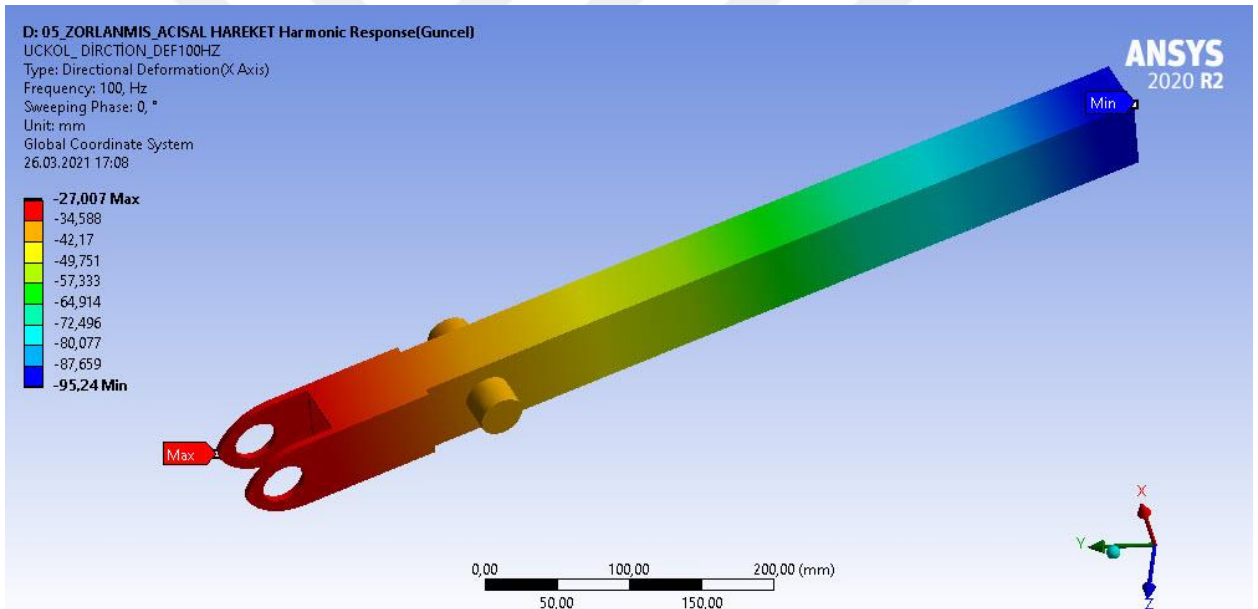
Şekil 4.11. Zorlanmış çizgisel harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan normal stress (X koordinatı)



Şekil 4.12. Zorlanmış açısıl harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan normal stress (X koordinatı)



Şekil 4.13. Zorlanmış çizgisel harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan directional deformasyon (X koordinatı)



Şekil 4.14. Zorlanmış açısıl harekette 100 Hz frekansta uç kolda oluşan directional deformasyon (X koordinatı)

Bode diyagramından elde edilen verilere göre 100 Hz frekans değeri maksimum değerde olduğundan bu frekans değerinde oluşan deformasyon ve stress oranları X, Y ve Z koordinatları doğrultusunda incelenmiştir.

Hem deformasyon açısından hem de stress açısından her iki zorlanmış hareket türünde de robot kolda oluşan maksimum değerler birbirine yakın bölgelerde görünmektedir. Deformasyon açısından, çizgisel hareket analizinde robot uç kolunda elde edilen oranlar Çizelge 4.2. de; açısıl hareket analizinde ise Çizelge 4.3. de gösterilmiştir.

Zorlanmış hareket analizinde 8 Hz frekansta elde edilen veriler ile 100 Hz frekansta elde edilen veriler incelendiğinde yapıda oluşan genliğin maksimum ve minimum seviyeleri bağlı olarak yapıdaki metalürjik dayanımı konusundaki veriler elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Zorlanmış çizgisel harmonik titreşim analizi sonucunda 100 Hz frekansında X, Y ve Z koordinatlarında oluşan maksimum deformasyon ve stress (mm) oranları

Eksenler	Eksen değerleri(mm)
X: max normal stress değeri	421,44
Y: max normal stress değeri	1613,90
Z: max normal stress değeri	929,27
X: max direction deformasyon	-26,5990
Y: max direction deformasyon	8,6259
Z: max direction deformasyon	-1,3671

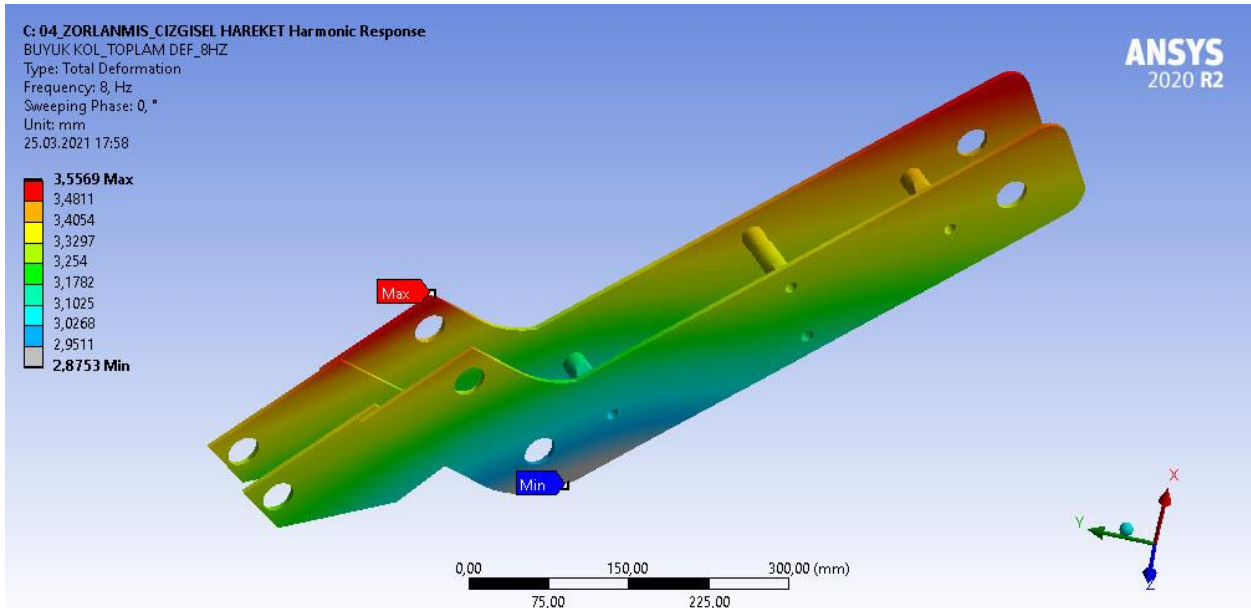
Çizelge 4.3. Zorlanmış açısal harmonik titreşim analizi sonucunda 100 Hz frekansında X, Y ve Z koordinatlarında oluşan maksimum deformasyon ve stress (mm) oranları

Eksenler	Eksen değerleri(mm)
X: max normal stress değeri	455,25
Y: max normal stress değeri	1735
Z: max normal stress değeri	987,96
X: max direction deformasyon	-26,5990
Y: max direction deformasyon	8,6259
Z: max direction deformasyon	-1,3671

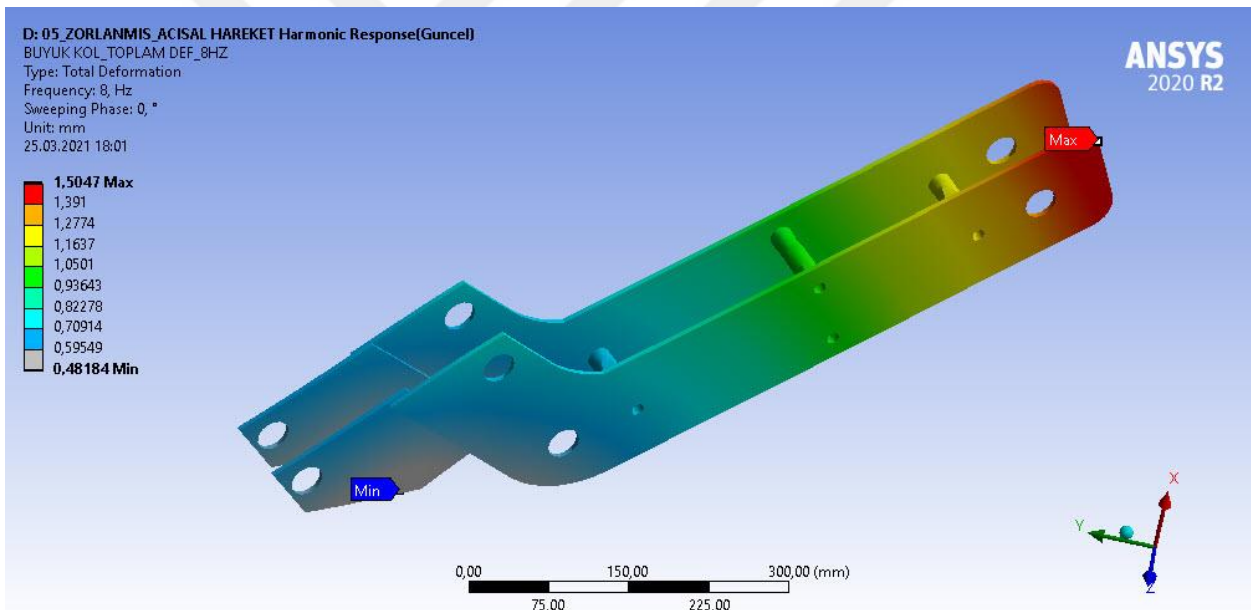
4.3. Harmonik Analiz ile Robotun 2. Kolunda Oluşan Deformasyon ve Stress

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16. daki görsellerde robot kolun orta kısmında bulunan ikinci kolda zorlanmış çizgisel hareket ile zorlanmış açısal hareket analizlerinde 8 Hz frekansta oluşan maksimum toplam deformasyon genlik oranları görülmektedir.

Çizgisel harekette oluşan yüksek deformasyon kolun uç tarafında da yoğunluk göstermesi ile beraber maksimum değeri kolun alt kısmında kendini göstermiştir. Açısal hareket sonucunda oluşan maksimum deformasyon ise kolun uç bölgesinde kendini göstermiştir.

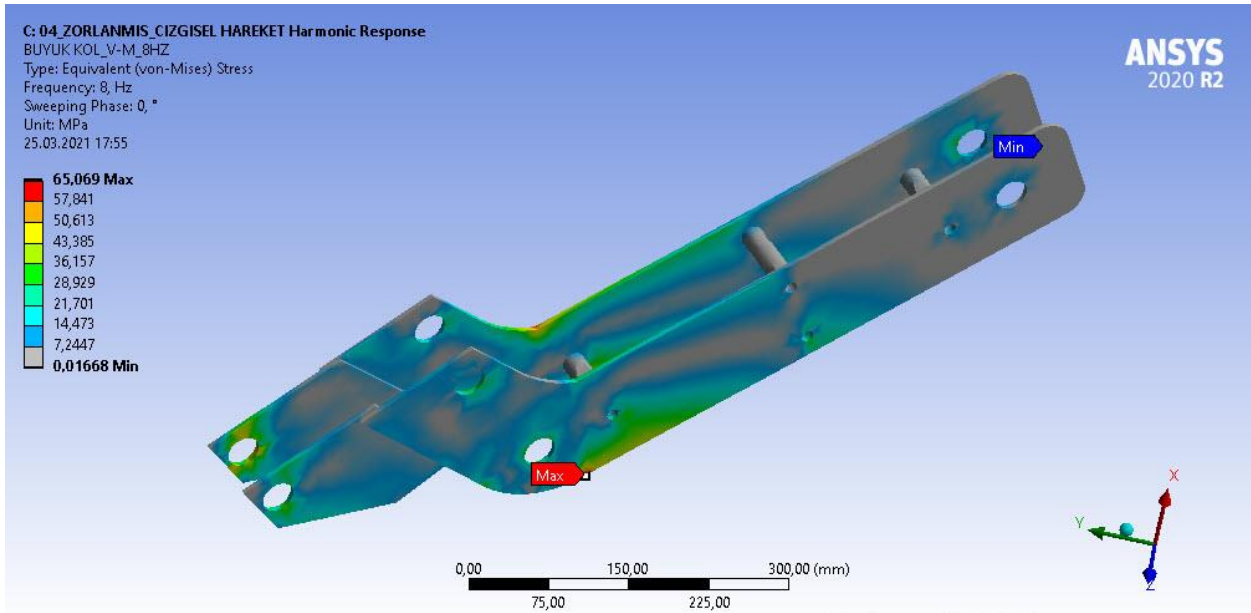


Şekil 4.15. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta 2. kolda oluşan toplam deformasyon

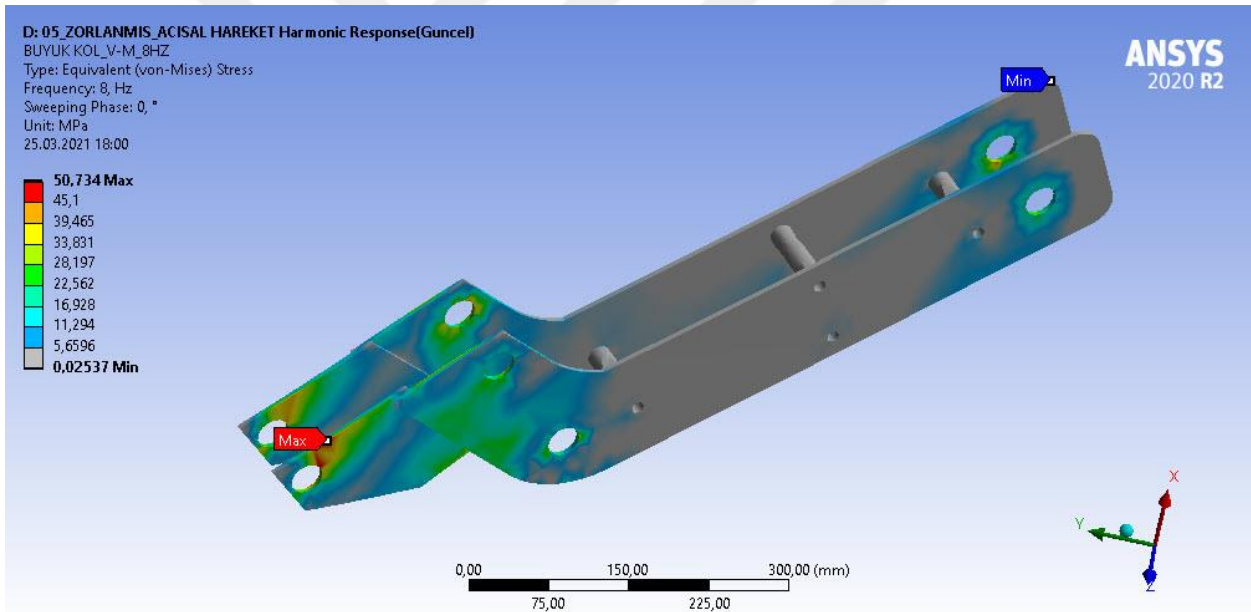


Şekil 4.16. Zorlanmış açısıl harekette 8 Hz frekansta 2. kolda oluşan toplam deformasyon

Deformasyon açısından çizgisel hareket sonucunda maksimum değer 3,5569 mm olurken açısıl hareket sonucunda oluşan değer ise çizgisel hareket maksimum değerinin yaklaşık olarak yarısını tekabül eden 1,5047 mm olarak elde edilmiştir. Titreşim oranının 2. kolda çizgisel hareket modelinin açısıl hareket modeline göre daha yüksek olduğu sonucuna götürür. Sonuç olarak 1. kolda olduğu gibi 2. kolda da çizgisel harekete maruz bırakılan modelde titreşimin daha fazla yaşandığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.17. Zorlanmış çizgisel harekette 8 Hz frekansta 2. kolda oluşan stress (von-mises)



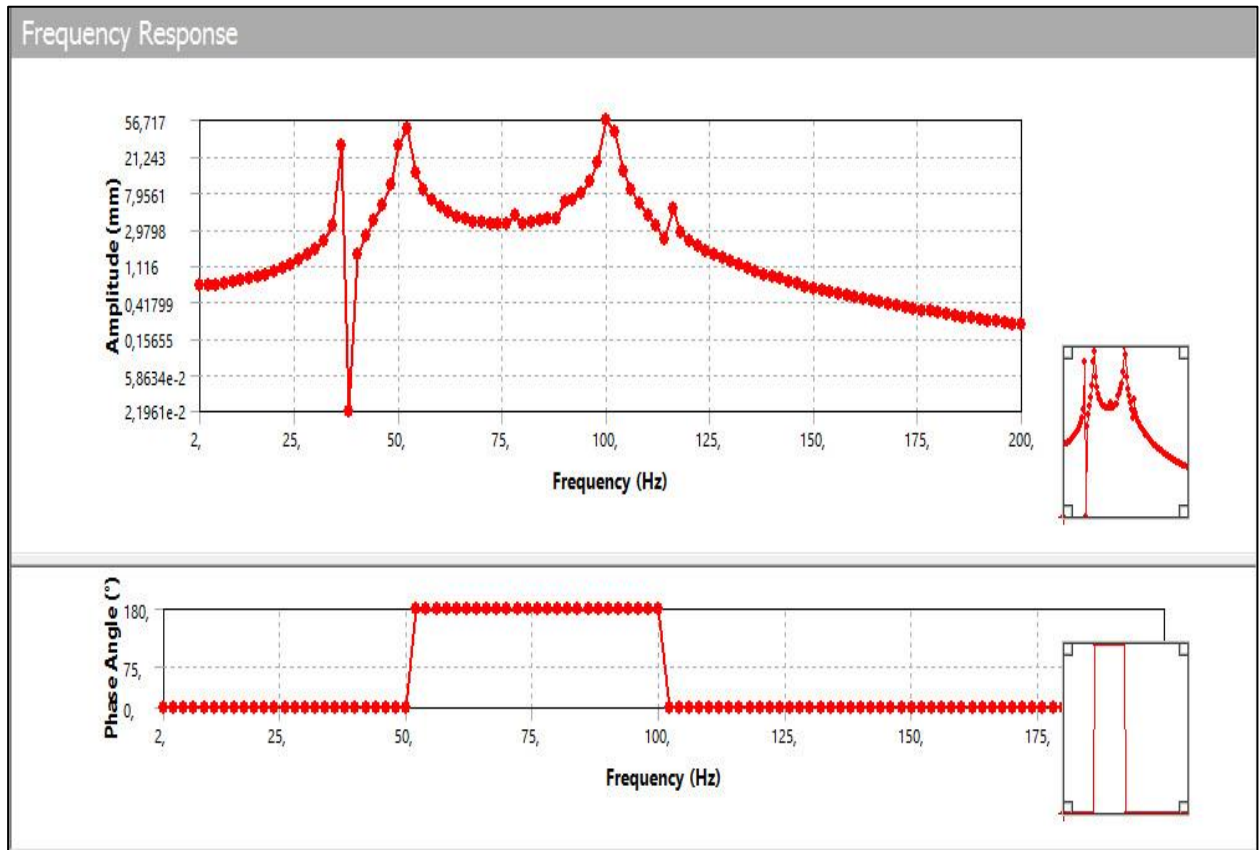
Şekil 4.18. Zorlanmış açısıl harekette 8 Hz frekansta 2. kolda stress (von-mises) oluşumu

Şekil 4.17. ve Şekil 4.18. deki görsellerde 8 Hz frekansta stress'e bağlı maksimum stress değerleri gösterilmiştir. Çizgisel hareket analizinde oran 65,069 Mpa olurken, açısıl hareket analiz sonucunda ise bu oran 50,734 Mpa olarak elde edilmiştir. Robot kol incelendiğinde bu maksimum değerler farklı bölgelerde oluşmuştur.

4.4. Harmonik Çizgisel Hareket Analiz Eğrisinin ve Harmonik Açısal Hareket Analiz Eğrisinin Deformasyon Açısından Kıyaslanması

Şekil 4.19. daki görselde çizgisel hareket analizin deformasyona bağlı genlik-frekans diyagramları gösterilmiştir. Şekil 4.20. deki görselde ise açısal hareket analizin deformasyona bağlı genlik-frekans diyagramları gösterilmiştir. Robotun sadece uç kolu için analiz yapılmıştır.

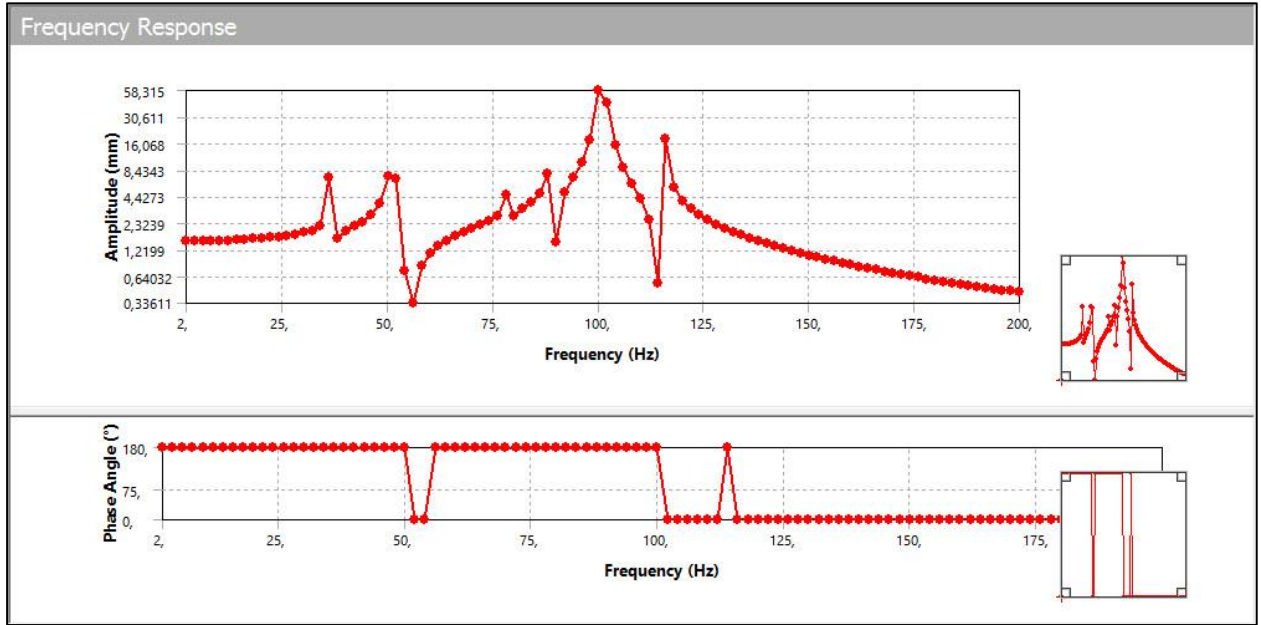
Bode genlik-frekans diyagramlarında uç kolda oluşan doğal frekans aralıkları ve maksimum genlik oluştuğunda frekans değerlerinin ne kadar olduğu görülmektedir. Faz-frekans diyagramında 180 derecelik değişim olduğu bölgelerde doğal frekansın oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.19. Zorlanmış çizgisel hareket directional deformasyon (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1

Her iki analiz için hem frekans olarak hem de faz açısı olarak değer aralıkları 0-200 Hz olarak incelenmiştir. Harmonik çizgisel hareket analizi için maksimum genlik değeri olan 56,717 mm noktasına 100 Hz'lik frekansta ulaşmıştır.

Harmonik açısal hareket analizinde maksimum genlik değeri olan 58,315 mm noktasına, 100 Hz frekansta ulaştığı görülmektedir. 100 Hz frekans değeri her iki analiz için deformasyon açısından robot kol için maksimum noktası olduğu görülmektedir.

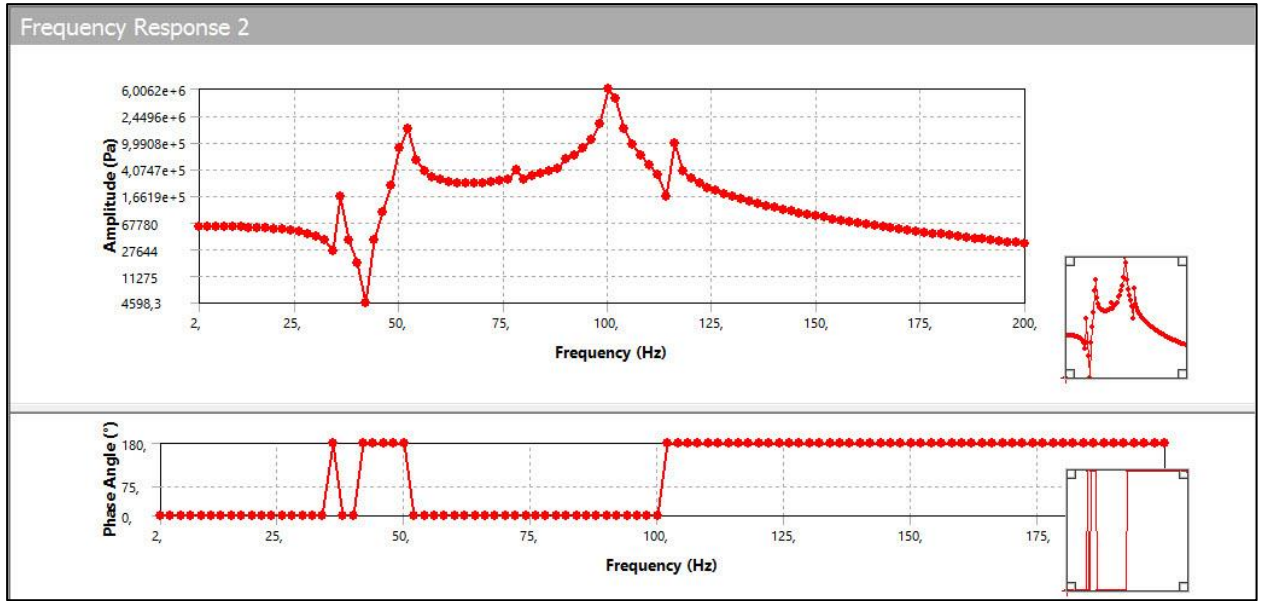


Şekil 4.20. Zorlanmış açısız hareket directional deformasyon (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1

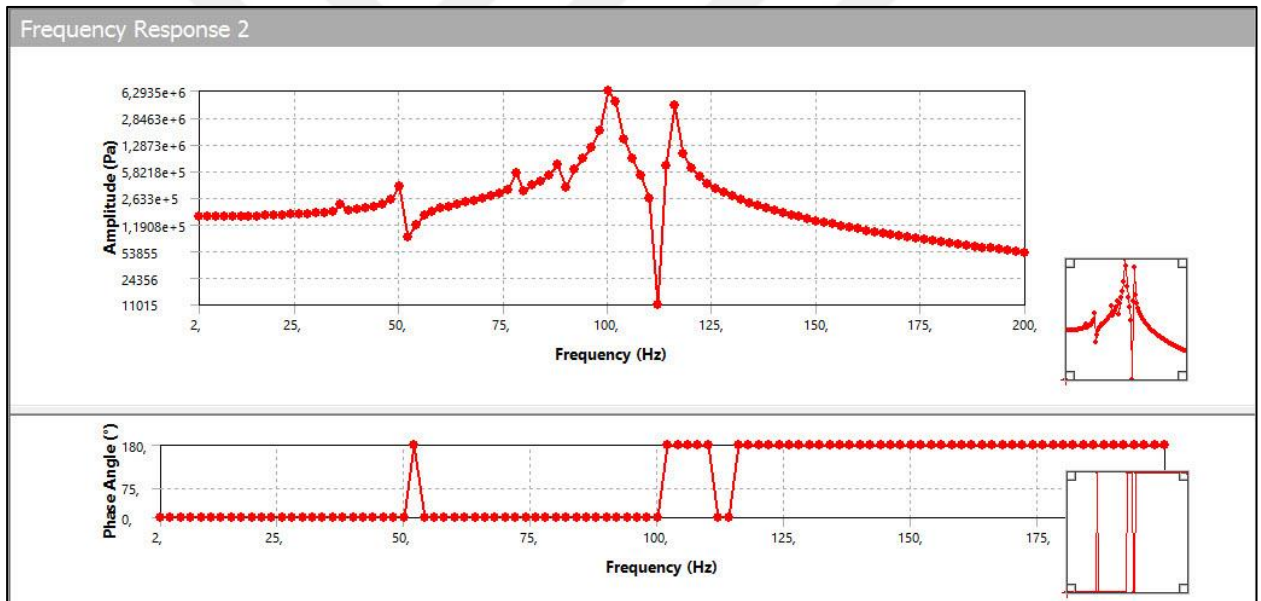
4.5. Harmonik Çizgisel Hareket Analiz ve Harmonik Açısız Hareket Analiz Stress (Normal Stress) Eğrilerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.21. deki görselde çizgisel hareket analizin stress'e bağlı genlik-frekans diyagramları gösterilmiştir. Şekil 4.22. deki görselde açısız hareket analizin stress'e bağlı genlik-frekans diyagramları gösterilmiştir. Bu analiz için de hem frekans olarak hem de faz açısı olarak değer aralıkları 0-200 Hz olarak incelenmiştir. Şekil 4.21. ve Şekil 4.22. deki görsellerin üst kısmında normal stress'e bağlı frekans-genlik, alt kısmında ise frekans-faz açısı şeklinde yerleştirilmiştir.

Şekil 4.21. görselindeki çizgisel hareket eğrisinde maksimum kuvvet genlik değeri olan $6,0062 + 6$ Pa noktasına, 100 Hz frekansta ulaştığı görülmüştür. Şekil 4.24. görselindeki açısız hareket analiz eğrisinde ise maksimum kuvvet genlik değerine $6,2935e + 6$ Pa noktasına, aynı şekilde 100 Hz frekans değerinde ulaştığı görülmüştür.



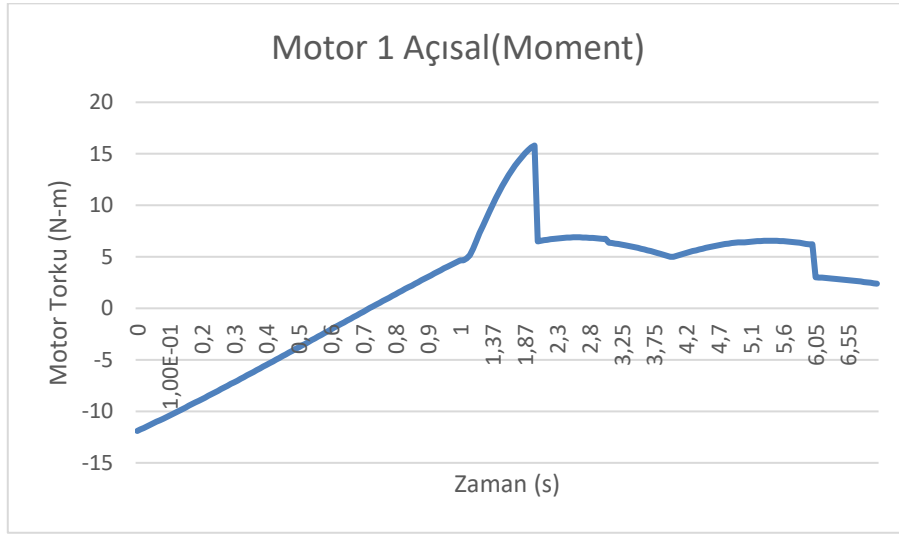
Şekil 4.21. Zorlanmış çizgisel hareket stress (normal stress) (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1



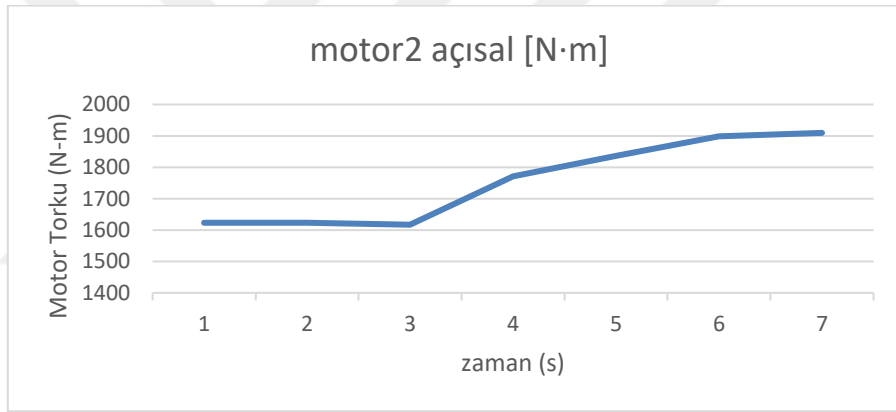
Şekil 4.22. Zorlanmış açısal hareket stress (normal stress), (X axis) açısından bode tepki diyagramı 1

Sistem üzerinde bulunan motorların yapmış olduğu maksimum frekans 8 Hz olarak hesaplanmıştır. Bundan dolayı analizini gerçekleştirdiğimiz robot kol için elde edilen 100 Hz frekans değeri, motorlardan dolayı oluşan 8 Hz değerinden uzaktır. Dolayısıyla bu bulgular sadece bir test durumunu yoklamak için elde edilmiştir.

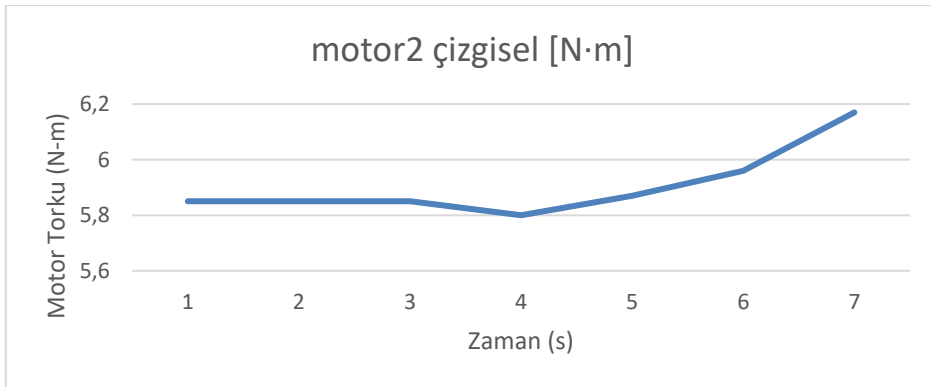
Rijit dinamik hareket analizinde robot kolun her iki modelinde de birbirine yakın koordinatta gerçekleştirilen deplasman sonucunda çizgisel hareket analizi ile açısal hareket analizinin motorlarda meydana gelen tork (Nm) değişimleri Şekil 4.23., Şekil 4.24. ve Şekil 4.25. deki görsellerde gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Çizgisel ve açısal hareket esnasında zamana bağlı 1. motorda tork değişimi

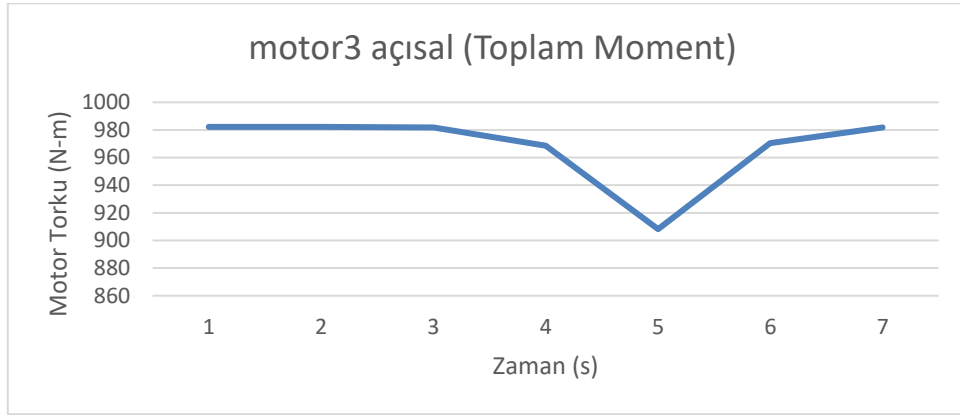


(a)

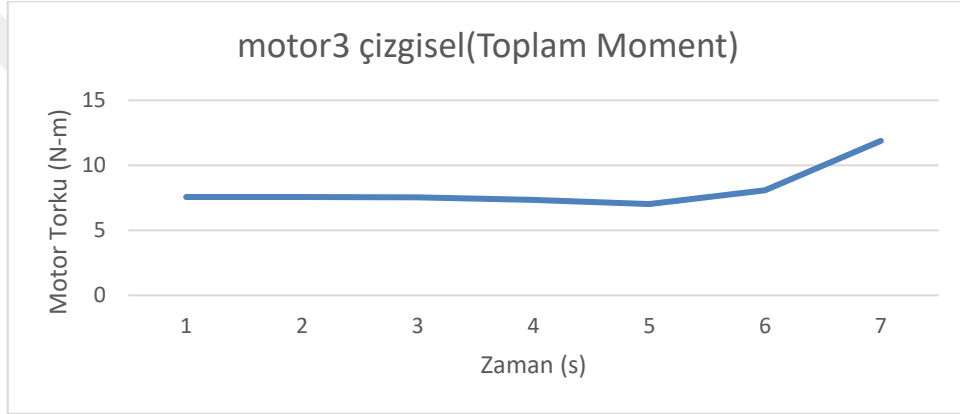


(b)

Şekil 4.24. a) Açısal ve b) Çizgisel hareket esnasında zamana bağlı 2. motorda tork değişimi



(a)



(b)

Şekil 4.25. a) Çizgisel ve b) Açısıl hareket esnasında zamana bağılı 3. motorda tork değişimi

Hareket analizinin uygun bir şekilde yorumlanabilmesi için aşağıda belirtilen faktörlerin etkisi olduğu söylenebilir. Bunlar;

- 1) Sistemin kaç serbestlik derecesine sahip olduğu
- 2) Sistemin iskelet yapısı
- 3) Sistemde kaç motor kullanıldığı
- 4) Sistemde kullanılan motor gücü
- 5) Jointlerin (bağlantı noktaları) nasıl tanımlandığı

gibi durumlar sistemine uygulanan hareket analizini etkileyen bazı önemli faktörlerdir.

Çizelge 4.4. Çizgisel hareket için motor mil verileri

	1. Motor mili	2. Motor mili	3. Motor mili
Hatve mil çapı (mm)	16	16	16
Taşıdığı yük (kg)	-22,84	711,37	1369,14
Mil verimi (%)	90	90	90
Mil uzunluğu(mm)	303	303	303

Rijit dinamik analizi gerçekleştirilen robot kol, üç serbestlik derecesine sahiptir. Buna bağlı olarak her bir modele motor gücü 500 dv/dk olan üç motor yerleştirilmiştir. Sistemin iskelet yapısı incelendiğinde robotlar farklı tahrik noktalarına motor yerleştirmek için elverişli olduğu görülmektedir. Yirmi adedin üzerinde olan farklı tasarım parçasının bir arada montaj işlemi yapılarak oluşturulan bu sistem, rijit dinamik analiz için zor ve karmaşık bir yapıdır. Jointler merkezi koordinat sistemlerinden bağımsız bir bölge olan hareketin gerçekleştiği yerlerde lokal koordinatlar şeklinde uygulanmış olup bağlantı noktaları da bu lokal koordinat sistemlerine göre tanımlanmıştır. Çizgisel hareket modelinde, hareketin olduğu bölgelerde bulunan motor miline, TZ yönünde dönme, Z koordinatı yönünde ise ilerleme verilmiştir. Açısal harekette ise her üç motorun dönme gerçekleştirdiği bölgelerde TZ yönünde dönme (rotation) tanımlanmıştır. Hareket analizinin doğru okunabilmesi adına her bir motor milleri üzerine sistemde maksimum ne kadar yük olduğu tespit edilmiştir. Buna göre çizgisel hareket uygulanan modelde, Çizelge 4.4. de çizgisel hareket için maksimum yükler hesaplanmıştır. Açısal hareket analizindeki veriler program verilerinde tork şeklinde verilmiştir. Her iki modelde kıyaslanması için çizgisel harekette miller üzerindeki maksimum yükler tork cinsinden hesaplanmış ve açısal hareket motorlarıyla birebir kıyaslanmıştır. Bu veriler göz önünde bulundurularak iki model için uygulanan rijit dinamik analizlerin sonucunda Şekil 4.23., Şekil 4.24 ve Şekil 4.25. deki görsellerde birinci, ikinci ve üçüncü motor üzerine binen tork değerleri birbiriyle kıyaslandırılmış olup robot kolun hareket ettiği süre boyunca bu motorlar üzerine tork seyrinin nasıl olduğu ve maksimum yükün ne kadar olduğu elde edilmiştir.

Bu tezin temel amaçları içinde yer alan ve iki modelin hareketleri kıyaslandırılarak bu hareketler sonucunda hangi modelin ne derecede enerji açısından avantaj sağlandığı konusu irdelenmiştir. Şekil 4.25. de görüldüğü gibi çizgisel harekette tork değerleri düşük görünmektedir. Bunun nedeninin bu motora gelen yük miktarının dönme yönünde gerçekleşmesi ve dönme işlevinin rulmanlar tarafından rahatlıkla yapması olarak açıklanabilmektedir.

Motorlar üzerinde oluşan tork kuvvetleri incelendiğinde açısal hareket modelin daha fazla enerji sarf ettiği, çizgisel hareket modelinin daha az tork kuvvetine ihtiyaç duyduğu böylece açısal hareket modeline göre daha az enerji ihtiyacı duyduğu görülmektedir. Elde edilen bu verilerin

sonucunda çizgisel hareket modeli yani vidalı mil aktuatör modelin enerji sarfiyatı açısından daha avantajlı olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.

Yukarıda zorlanmış titreşim analizi açısından robot kol ucunda meydana gelen titreşim artıkları incelenmiş ve titreşim artıkları açısından da açısal hareket modelin daha avantajlı olduğu saptanmıştı. Dolayısıyla bu iki tespit sonucunda bu çalışma bizlere endüstriyel robotik kol kullanımının, çalışma ihtiyaçlarının önceliğine göre seçim yapılması sonucunu doğurmaktadır. Başka bir deyişle daha hassas bir iş yaratımı gerçekleştirilmesi durumunda titreşim artıklarının az olduğu açısal hareket modeli yani motorların tahrik noktasına yakın bir şekilde konumlandırılmış ve kayış kasnağı yardımıyla motora (hareket ettiricisine) bağlantı sağlanması önerilmektedir. Eğer enerji açısından bir ihtiyacının daha ön planda olduğu çalışma alanı söz konusu ise çizgisel hareket modeli yani vidalı mil aktuatörü yardımıyla itici tahrik gücün oluşturulduğu yöntem tercih edilebilir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuç

Üç serbestlik derecesine sahip endüstriyel robot kol üzerinde ansys workbench ara yüzü ile sırasıyla rijit dinamik analiz, modal analiz ve harmonik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler açısal hareket model (tahrikler kayış kasnağı yardımıyla iletilen) ve çizgisel hareket model (tahrikler vidalı mil ile iletilen) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Rijit dinamik analizde robot kolun hareket sağlaması için belli sayısal değerler manuel olarak data verisi olarak girilmiştir.

Rijit dinamik hareket sonucunda;

- 1) Hareket esnasında robot kol ucunda oluşan maksimum ivme verileri,
- 2) Hareket esnasında motorlar üzerine binen maksimum yük verileri,
- 3) Yukarıdaki veriler ışığında iki modelin enerji verimliliğinin kıyaslanması,

gibi amaçlanan veriler elde edilmiştir.

Modal analizde yapının deformasyon açısından 6 mod şeklinde incelenmiştir. Modal analiz sonucunda;

- 1) Yapıda deformasyon genlikleri,
- 2) Yapıdaki doğal frekanslar,
- 3) Doğal frekanslara bağlı serbest titreşim oranları,
- 4) Yapının en küçük doğal frekans cevabının yaklaşık 36 Hz olduğu,

gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Rijit dinamik hareket analizi sonucunda motor üzerine binen maksimum kuvvet değerleri ve elde edilen ivme değerleri harmonik analiz için kullanılmıştır. Zorlanmış harmonik analiz sonucunda;

- 1) Her iki modelin yük altındayken oluşan titreşim oranları,
- 2) Modellere binen farklı yükler sonucunda oluşan deformasyon oranları,
- 3) Modellere binen farklı yükler sonucunda oluşan stress oranları,

gibi amaçlanan veriler elde edilmiştir. Her iki model için elde edilen bu veriler birbiriyle kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.

Yapılan tüm analizlerin sonuçlarına göre;

Çizgisel hareket modelinin açısal hareket modelinden daha fazla istenmeyen titreşimin oluşturduğu, enerji verimliliği açısından ise çizgisel hareket modelinin daha avantaj sağladığı bilgisine ulaşılmıştır. Ayrıca yapıda motorlardan çıkan titreşimler sonucunda doğal frekans ile

yapının frekansı çakışmadığı ve titreşim frekanslarının rezonans durumundan uzak bir değerde olduğu tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu deneylerde uygulanmış olan yöntemler benzer metot kullanılarak ve farklı iskelet yapısına sahip sistemler üzerinde farklı tür hareket modelleri ile tecrübe edilebilir. Bu tezde kanıtlanmak istenen asıl durum aynı yapıdaki bir endüstriyel robot kol üzerinde farklı bölgelerde tahrik motorları yerleştirmek ve buna bağlı olarak tahrik yönteminin hem artık titreşim açısından hem de enerji tasarruf avantajının tespit edilmesi için belli sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Rijit dinamik analizinde gerçekleştirilen hareket sonrasında enerji verimliliği motorlara binen tork yoluyla incelenip değerlendirilmiştir. Bu analiz Ansys programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma benzer analiz programları üzerinden de gerçekleştirilebilir. Böylece verilerin kıyaslanma ve güvenilirliği konusunda daha bilimsel açıklamalar ortaya konabilir.

6. KAYNAKLAR

Alp, O. E., 2012, Genel amaçlı robot kolu tasarımı, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Armağan, E., Ayhan, O., Yannier, S., Erbatur, K., Yeşilyurt, S. ve Göktuğ, G., 2004, İki Eksenli Scara Robotun Modellenmesi ve Statik, Dinamik, Titresim Analizleri – 2, *Türkiye’de ve Dünya’da Otomasyon*, 120-125.

Bingöl, Z ve Küçük, S., 2015, Robot Kinematığı, *Umuttepe yayın evi*, İstanbul.

Brynjolfsson, E., and McAfee, A., 2014, The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant Technologies, *WW Norton & Company*, New York, ss 306.

Caner, U. ve Eroğlu, M., 2004, Robot Kol Denetim Tasarımı İçin Durum Değişkenleri Geri Beslemeli ve Tümlümlü Denetimci Yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(3), 335-342.

Chen, F., Zhao, H., Li, D., Chen, L., Tan, C. and Ding, H., 2019, Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 57, 391-403.

Çelebi, A., Korkmaz, A., Yılmaz, T. ve Tosun, H., 2019, 3 Boyutlu Yazıcı İle 6 Eksenli Robot Kol Tasarım Ve İmalatı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 269-278.

Dilibal, S. ve Şahin, H., 2018, İşbirlikçi endüstriyel robotlar ve dijital endüstri. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1), 86-96.

Dirilmiş, M., ve Karagülle, H., 2013, İki Kollu Esnek Bir Manipülatörün Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellemesi Ve Titreşim Analizi, 16. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, UMTS-2013, Erzurum, 624-632.

Garcia-Perez, O. A., Silva-Navarro, G. and Peza-Solis, J. F., 2019, Flexible-link robots with combined trajectory tracking and vibration control. *Applied Mathematical Modelling*, 70, 285-298.

Hız, O., 2019, Cisimleri renklerine göre seçen PLC kontrollü robot kol tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.

Ivanov, S. H., 2017, Robonomics-principles, benefits, challenges, solutions, Yearbook of Varna University of Management, 10, 283-293.

Kant, Y., 2009, Bir robot manipulatörün bilgisayar destekli mühendislik araçları ile çalışma uzayı analizi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Kapsalas, C.N., Sakellario, J.S., Koustoumpardis, P.N. and Aspragathos, N.A., 2018, Endüstriyel robotlar tarafından manipüle edilen esnek kırımların titreşim kontrolü için ARX tabanlı bir yöntem. *Robotik ve Bilgisayarla Bütünleşik İmalat*, 52, 76-91.

Kapucu, S., ve Kaplan, M., 2005, Hafif Sönümlmeli Esnek Sistemlerin Girdi Komutu Biçimlendirme Tekniği ile Artık Titreşimlerinin Azaltılması, 12. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu UMTS-2005, Kayseri, 347-354.

Kurt, D. ve Bozoklu, Ü., 2019, Robot Ekonomisinin Yükselişi. *Sosyal Bilimler Metinleri*, 2019(1), 25-47.

Malgaca, L., Akdağ, M., Karagülle, H. ve Yavuz, Ş., 2013, Üç Eksenli Seri Esnek Manipülatörün Titreşim Analizi. 16. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu UMTS 2013, Erzurum, 282-287.

Meng, D., Lu, W., Xu, W., She, Y., Wang, X., Liang, B. and Yuan, B., 2018, Vibration suppression control of free-floating space robots with flexible appendages for autonomous target capturing. *Acta Astronautica*, 151, 904-918.

Oaki, J., and Chiba, Y., 2017, Simple physically parameterized observer for vibration suppression control of SCARA robot with elastic joints. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 6085-6092.

Özer, A. and Semercigil, S. E., 2008, An event-based vibration control for a two-link flexible robotic arm: Numerical and experimental observations. *Journal of Sound and Vibration*, 313(3-5), 375-394.

Öztürk, P., 2019, 3 Boyutlu yazıcıların tasarımcı-kullanıcı kapsamında değerlendirilmesi ve endüstriyel ürünlerin kişiselleştirilmesine Etkisi, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Sahu, S., Choudhury, B. B. and Biswal, B. B., 2017, A vibration analysis of a 6 axis industrial robot using FEA. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2403-2410.

Telli, S., and Kopmaz, O., 2000, Two Different Methods to Investigate Dynamic Motion of Flexible Link That Rotates About Fixed Axes. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24(3), 127-134.

Tso, S. K., Yang, T. W., Xu, W. L. and Sun, Z. Q., 2003, Vibration control for a flexible-link robot arm with deflection feedback. *International journal of non-linear mechanics*, 38(1), 51-62.

Wildhaber, I., 2016, Die Roboter kommen – Konsequenzen für Arbeit und Arbeitsrecht. *Zeitschrift für Schweizerisches Recht. Band 135 I, Heft 4*, 315-351.

Yetkin, S. ve Koca, G.O., 2021, Esnek Robotların Tasarım, Kontrol ve İmalat Çalışmaları. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13 (1), 74-86.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İdris
Uyruğu : ŞANİ

EĞİTİM

Üniversite	: Dicle üniversitesi Makina Mühendisliği	Bitirme Yılı
Yüksek Lisans	: -	06.06.2018
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009-2012	TMO	Memur
2012-çalışıyor	AFAD	Memur

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

YAYINLAR