

**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**HAVASIZ TEKER TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ**

**Rukiye COŞAR**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Davut Erdem ŞAHİN**

**Yozgat 2019**



**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**HAVASIZ TEKER TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ**

**Rukiye COŞAR**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Davut Erdem ŞAHİN**

**Yozgat 2019**



## YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

### TEZ ONAY FORMU

T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110913002 numaralı öğrencisi Rukiye COŞAR 'nın hazırladığı "Havasız Teker Tasarımı Ve Dinamik Analizi" başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 29/08/2019 perşembe günü saat 13:30'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

**Başkan** : Doç.Dr.Necmi DÜŞÜNCELİ

**Jüri Üyesi (Danışman)** : Dr.Öğr.Üyesi Davut Erdem ŞAHİN

**Jüri Üyesi** : Dr.Öğr.Üyesi Sertan OZAN

#### ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 17/09/19 tarih ve 44 sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

17/09/2019

Prof. Dr. Mustafa SACMACI

Müdür



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>ii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2.HAVASIZ TEKER</b> .....	<b>3</b>
2.1. Tekerin Tarihçesi .....	3
2.2. Havasız Tekerlerin Üretim Yöntemi .....	6
2.2.1. Dolgu Teker Üretim .....	6
2.2.2. 3D Yazıcı ile Teker Üretim.....	7
2.2.3. Makaslama Yöntemi : .....	7
2.3. Havasız Tekerlerde Bulunması Gereken Özellikler.....	8
2.4. Havasız Teker Kullanım Alanları .....	9
2.4.1. İş Makinaları .....	10
2.4.2. Tekerlekli Sandalyeler .....	10
2.4.3. Uzay Araştırma Araçları .....	11
2.4.4. Askeri Araçlar .....	12
<b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>14</b>
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>18</b>
4.1. Çeyrek Taşıt Deney Düzeneginin Tasarımı ve Konstrüksiyonu.....	18
4.2. Deney Düzeneginin İmalatı ve Montajı .....	21
4.3. Havasız Tekerin Modellenmesi.....	22
4.4. Havasız Teker Modelinin Üretilmesi .....	23
<b>5. MODELLEME VE DENEYLER</b> .....	<b>25</b>
5.1. Direngelik Katsayısının Bulunması (k1) .....	27
5.2. Doğrusal Yatak ve Alt Plakanın Sönüm Katsayısının Bulunması (b <sub>1</sub> ).....	29
5.3. Tekerin Sönüm Katsayısının Bulunması (b <sub>2</sub> ).....	33

<b>6. HAVASIZ TEKERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODAL ANALİZİ</b> .....	<b>47</b>
6.1 Sonlu Elemanlar Modeli .....	51
6.2 Sonlu Elemanlar Modal Analiz Bulguları.....	53
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>63</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>69</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>71</b>



# HAVASIZ TEKER TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ

**Rukiye COŞAR**

**Yozgat Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**2019; Sayfa: 71**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Davut Erdem ŞAHİN**

## ÖZET

Teker, kullanıldığı taşıtı hareket ettiren, taşıt güvenliğini sağlayan ve farklı yol şartlarında araç süspansiyonuna yardımcı olan, aracın en önemli parçalarından biridir. Uzay araştırmaları ve savunma gibi stratejik sahalarda basınçlı havayla desteklenen günümüz teker kullanımı, hava ihtiva etmesinden dolayı, iş akışını uzatıp, zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle havasız teker fikri geliştirilmiştir. Havasız tekerlerde hava bulunmadığından dolayısıyla havanın sönüm özelliği de olmadığından: bu yeni tekerlerin de tasarlanıp modellemesi, üretim yöntemlerinin belirlenmesi, üzerinde oluşan kuvvet ve momentlerin incelenmesi ve karşılaştırılması taşıt güvenliği açısından oldukça önemlidir. Havasız teker (HZT), pnömatik lastiğin havası yerine işlev gören tekerlek desenini kullanan lastikler olarak tanıtılmıştır. Poliüretan malzeme kullanılarak farklı basit desenlerle ve eşit ağırlıkta 3 tip havasız teker imal edilmiştir. Desenler, dairesel, kare ve beşgen olarak seçilmiştir. Çeyrek taşıt modeli tasarlanmıştır. Her tip teker için sayısal ve deneysel olarak modal analiz yapılmıştır. Sırasıyla beşgen, kare ve dairesel desenlerin artarak sönümlenme özelliği gösterdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Havasız Teker, Modal Analiz, Çeyrek Taşıt Modeli.

# DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF NON- PNEUMATIC TIRE

**Rukiye COŞAR**

**Yozgat Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
Master of Science Thesis**

**2019; Page: 71**

**Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Davut Erdem ŞAHİN**

## **ABSTRACT**

The wheel is one of the most important parts of the vehicle that moves the vehicle in which it is used, ensures vehicle safety and assists vehicle suspension in different road conditions. The use of today's wheel, supported by compressed air in strategic fields such as space exploration and defense, can prolong and complicate the workflow due to the fact that it contains air. Therefore, the idea of airless wheels was developed. Since there is no air in the airless wheels and therefore there is no damping feature of the air: the design and modeling of these new wheels, determination of production methods, examination and comparison of the forces and moments formed on them are very important in terms of vehicle safety. Airless wheels (HWT) are described as tires that use the wheel pattern that functions instead of the pneumatic tire's air. 3 types of airless casters are produced with different simple designs and equal weight by using polyurethane material. The patterns were selected as circular, square and pentagonal. The quarter car model is designed. Numerical and experimental modal analysis was performed for each type of wheel. Pentagonal, square and circular patterns have been found to show increased damping characteristics, respectively.

**Key Words:** Airless Tire, Modal Analysis, Quarter Car Model.



## TEŞEKKÜR

Her Őeyden önce gerek yüksek lisans eğitimim süresince ve gerekse tüm tez çalışmalarımın başından sonuna her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile her konuda yardımcı olan tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Davut Erdem ŞAHİN' e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitim süresi boyunca sağladıkları kolaylıklardan dolayı Yozgat Belediyesi Etüt Proje Müdürlüğü'nde bulunan müdürüme ve çalışma arkadaşlarıma, deneysel çalışmalarımın tamamında yardımcı olan Dr. Öğr. Gör. M.Akif DÜNDAR hocama teşekkür ederim.

Tez çalışmam esnasında her zaman yanımda olup, destek veren ve çalışmam sırasında büyük sabır gösteren Sevgili Annem Őengül COŞAR' a, her konuda destek olan Babam Bekir COŞAR' a ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Yozgat, AđUSTOS 2019

Rukiye COŞAR

## TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 5.1.</b> Eşdeğer Model Parametreleri .....	26
<b>Tablo 5.2.</b> Örnek Yükleme-Esneme Ölçümü .....	28
<b>Tablo 5.3.</b> Yük-Sehim Ölçüm Değerleri .....	29



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Robert Thompson ve Charles Goodyear Kauçuk Teker [6] .....	4
Şekil 2.2. Mansell Tekerleği Buckinghamshire Demiryolu [7] .....	5
Şekil 2.3. Ford T Modeli 12 Parmaklı Teker [8] .....	5
Şekil 2.4. Poliüretan Dolgu Teker Modeli [9] .....	6
Şekil 2.5. 3D Yazıcıyla Üretilmiş Teker Modeli [10] .....	7
Şekil 2.6. Poliüretan Tellerle Üretilmiş Teker Modeli [13].....	8
Şekil 2.7. Poliüretan Havasız Teker [9] .....	9
Şekil 2.8. İş Makinası Poliüretan Havasız Teker [14] .....	10
Şekil 2.9. Tekerlekli Sandalyeler de Havasız Teker Kullanımı [15] .....	11
Şekil 2.10. Apollo Lunar Seyyar Araç Teker [16].....	11
Şekil 2.11. Şekil Hafızalı Akıllı Teker [18].....	12
Şekil 2.12. Askeri Zırhlı Araçlarda Havasız Teker Kullanımı [19].....	13
Şekil 3.1. Yükleme Altında HZT Modeli [30].....	16
Şekil 3.2. Resilient Technologies Firmasının Petek Desenli HZT' ler de Dinamik Test Görüntüleri [31].....	17
Şekil 4.1. Çeyrek Taşıt Deney Düzeneği Tasarımı .....	19
Şekil 4.2. Doğrusal Kaymalı Yataklar .....	20
Şekil 4.3. Taşıyıcı Helezon Yay .....	20
Şekil 4.4. Deney Düzeneğinin Karşıdan (a), Üstten Görüntüsünün (b) Son Durumu	22
Şekil 4.5. Poliüretan Teker .....	22
Şekil 4.6. HZT Daire (D), Kare (K), Beşgen(B) AutoCad Çizimi .....	23
Şekil 4.7. HZT Daire (D), Kare (K), Beşgen(B) SolidWorks Çizimi.....	23
Şekil 4.8. Su Jetiyle Desen Verilmiş Poliüretan Tekerler.....	24
Şekil 4.9. Poliüretan Tekerlerden Çıkartılan Desenler .....	24
Şekil 5.1. Çeyrek Deney Düzeneğinin Gerçeği (a) ve Eşdeğer Modeli (b).....	25
Şekil 5.2. Deney Düzeneğinin Yük - Çökme Ölçümüne Hazırlanması (a), Ağırlıkların Ölçülmesi (b).....	27
Şekil 5.3. Yük-çökme ölçümü .....	28

<b>Şekil 5.4.</b> Şehim-Yük Diyagramı.....	29
<b>Şekil 5.5.</b> Doğrusal Yataklar ve Tahrik Plakasının Sönüm Katsayısının Bulunması	30
<b>Şekil 5.6.</b> Deneyde Kullanılan Ayarlar .....	30
<b>Şekil 5.7.</b> Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi. Zamana Bağlı Kuvvet (üst) ve Frekansa Bağlı Kuvvet (alt) FFT Analizleri. ....	31
<b>Şekil 5.8.</b> Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi Zamana Bağlı Titreşim (üst) ve Frekansa Bağlı Titreşim (alt) Grafikleri.....	32
<b>Şekil 5.9.</b> Zamana (üst) ve Frekansa (alt) Bağlı Titreşim Değişimlerinin Büyük Ölçekli Gösterimi .....	33
<b>Şekil 5.10.</b> 15 Hz de Tekrarlanan Titreşim Deneyi .....	34
<b>Şekil 5.11.</b> Deneyde Kullanılan Pulse Yazılım Programına Ait Ayarlar.....	35
<b>Şekil 5.12.</b> Alt Plaka İçin Orijinal Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri. ....	36
<b>Şekil 5.13.</b> Üst Plaka İçin Orijinal Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri. ....	36
<b>Şekil 5.14.</b> Alt Plaka İçin Daire Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri. ....	37
<b>Şekil 5.15.</b> Üst Plaka İçin Daire Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri. ....	37
<b>Şekil 5.16.</b> Alt Plaka İçin Kare Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.	38
<b>Şekil 5.17.</b> Üst Plaka İçin Kare Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.	38
<b>Şekil 5.18.</b> Alt Plaka İçin Beşgen Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri. ....	39
<b>Şekil 5.19.</b> Üst Plaka İçin Beşgen Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri. ....	39
<b>Şekil 5.20.</b> Orijinal, Kare, Beşgen ve Dairesel Desenli Tekerlerin 0 – 200 Hz Aralığında Titreşim Grafikleri .....	40
<b>Şekil 5.21.</b> Orijinal, Kare, Beşgen ve Dairesel Desenli Tekerlerin 0 – 30 Hz Aralığında Titreşim Grafikleri .....	41
<b>Şekil 5.22.</b> Orijinal, Kare, Beşgen ve Dairesel Desenli Tekerlerin Sönüm Grafikleri .....	42

<b>Şekil 5.23.</b> Alt Plakaya Ait Orijinal Tekerde İvme Genliklerini Zamanla Sönümlenmesi.....	43
<b>Şekil 5.24.</b> Alt Plakaya Ait Daire Tekerde İvme Genliklerinin Zamanla Sönümlenmesi.....	44
<b>Şekil 5.25.</b> Alt Plakaya Ait Kare Tekerde İvme Genliklerinin Zamanla Sönümlenmesi.....	45
<b>Şekil 5.26.</b> Alt Plakaya Ait Beşgen Tekerde İvme Genliklerinin Zamanla Sönümlenmesi.....	46
<b>Şekil 6.1.</b> Dairesel Delikli Tekerin Sonlu Elemanlar Modeli, İzometrik Görünüş (a), Ön Görünüş (b).....	51
<b>Şekil 6.2.</b> Kare Delikli Tekerin Sonlu Elemanlar Modeli, İzometrik Görünüş (a), Ön Görünüş (b).....	52
<b>Şekil 6.3.</b> Beşgen Delikli Tekerin Sonlu Elemanlar Modeli, İzometrik Görünüş (a), Ön Görünüş (b).....	53
<b>Şekil 6.4.</b> Dairesel Delikli Tekerin İlk Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	54
<b>Şekil 6.5.</b> Dairesel Delikli Tekerin İkinci Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	55
<b>Şekil 6.6.</b> Dairesel Delikli Tekerin Üçüncü Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	56
<b>Şekil 6.7.</b> Kare Delikli Tekerin İlk Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	56
<b>Şekil 6.8.</b> Kare Delikli Tekerin İkinci Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	57
<b>Şekil 6.9.</b> Kare Delikli Tekerin Üçüncü Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	58
<b>Şekil 6.10.</b> Beşgen Delikli Tekerin İlk Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	59
<b>Şekil 6.11.</b> Beşgen Delikli Tekerin İkinci Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	59
<b>Şekil 6.12.</b> Beşgen Delikli Tekerin Üçüncü Mod Şekli ve Doğal Frekansı.....	60
<b>Şekil 7.1.</b> Doğal Frekansların Değişik Şekiller için Karşılaştırılması.....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>HZT</b>	:	Havasız Teker
<b>PÜ</b>	:	Poliüretan
<b>FE</b>	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>m<sub>1</sub></b>	:	Tahrik Plakası Kütlesi
<b>m<sub>2</sub></b>	:	Aks-Tekerlek-Jant Kütlesi
<b>k<sub>1</sub></b>	:	Taşıyıcı Yayların ve Tahrik Plakasının Toplam Yay Sabiti
<b>k<sub>2</sub></b>	:	Tekerleğin Yay Sabiti
<b>b<sub>1</sub></b>	:	Tahrik Plakasındaki (Alt Tabla) Kayan Bilyalı Yatakların Toplam Sönüm Sabiti
<b>b<sub>2</sub></b>	:	Tekerleğin Sönüm Etkisini Temsil Eden Sönüm Sabiti
<b>b<sub>3</sub></b>	:	Aks-Tekerlek Plakasındaki ( Üst Tabla) Kayan Bilyalı Yatakların Toplam Sönüm Sabit
<b>y<sub>1</sub></b>	:	Yol Girişi Değişkeni
<b>y<sub>2</sub></b>	:	Aks-Tekerlek Kütlesinin Çıkış Hareketi Değişkeni
<b>F(t)</b>	:	Tekere Gelen Dış Kuvvet

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler taşıt hızlarının artması taşıtların güç ve performans alanlarında ilerlemesine paralel olarak, taşıt güvenliği ve dengenin önemi, konforlu seyahat taleplerinin oluşması, dolayısı ile akıllı kontrol yöntemleri üzerine çalışmalar yapılması ve bu sürecin devamında daha gelişmiş araçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yol ile temas eden tek bileşen teker olduğundan, teker titreşimlerinin analizi ve kontrolü, bu gelişim döngüsü içinde araştırma ve geliştirme gündemindeki yerini ve önemini gün geçtikçe arttırmaktadır.

Uzay araştırmaları ve savunma gibi stratejik sahalarda basınçlı havayla desteklenen günümüz tekerlerin kullanımı, belirli basınçta hava ihtiva etmesinden dolayı, iş akışını uzatıp, zorlaştırmaktadır. Bu nedenle havasız teker fikri geliştirilmiştir. Havasız lastiklerde hava bulunmadığından, dolayısıyla havanın sönüm özelliği de olmadığından: üretilen yeni tekerlerin de tasarlanıp modellenmesi, üretim yöntemlerinin belirlenmesi, teker üzerinde oluşan kuvvet ve momentlerin incelenmesi ve karşılaştırılması taşıt güvenliği açısından oldukça önemlidir.

Havasız tekerler (HZT); Pnömatik lastiğin sahip olduğu havanın yerine işlev gören tekerlek desenlerini kullanan lastikler olarak tanıtılmıştır. Bu çalışmada, yüksek yorulma direnci için çeşitli tekerlek desenleri tasarlanarak, tek eksenli yüklem altında farklı bölgesel gerilime sahip olan eşit hacimli desenler arasında incelenme yapılmıştır. Sayısal çalışmadan sonra deneysel çalışma için farklı statik çökmeye neden olacak farklı tekerlek desenleri, eşit hacimli olacak şekilde tasarlanıp prototipleri elde edilmiştir. Havasız teker tiplerinin sönüm davranışları incelenmiştir. Desenler modellenerek, farklı teker desenlerine sahip HZT'lerin sayısal deneyleri yapılmıştır. Sonra deneysel çalışma için havalı tekerlerin yerini alacak olan HZT desenleri, Poliüretan (PÜ) malzeme kullanılarak elde edilmiştir. Çeyrek taşıt modeli tasarlanarak üretilen farklı desenlerdeki teker tiplerinin sönümlenme yetenekleri ve yük taşıma kapasiteleri iki boyutlu düzlemde incelenmiştir. Sonunda deneysel ve sayısal veriler karşılaştırılarak, hangi desenin performansının daha yüksek olacağı belirlenmiştir.

Havasız teker modelleri tasarlanırken çoğu zaman sonlu elemanlar (FE) analizi, malzemenin doğrusal olmayan özelliğiyle geometriyi birleştiren, karmaşık yapısal davranışları çözebilmesinden dolayı teker modeli simülasyonun da yoğun olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada poliüretan tekere eşit sayıda, sabit ağırlıkta farklı desenler kullanılarak tasarım yapılmıştır. Desenler, dairesel, kare ve beşgen olarak seçilmiştir. Çeyrek taşıt modeli tasarlanmıştır. Her tip teker için sayısal ve deneysel olarak modal analiz yapılmıştır. Tasarımların kıyaslamaları yapılarak incelenmiştir





## 2.HAVASIZ TEKER

Tekerlek veya teker; merkezde bulunan, bir eksenin çevresinde dönebilen çember olarak tanımlanmaktadır [1]. Tekerleğin temelini, merkezinde bulunan eksen etrafında yaptığı dönme hareketi oluşturmaktadır. Tekerleğin yere her temas noktası bir kaldırıcının dayanak noktası gibi çalışmakta olup sonsuz sayıda kaldırıcının birleştiği bir sistem gibi çok az bir kuvvetin uygulanmasıyla kendi eksenini etrafında dairesel hareket sağlamaktadır. Tekerleğin bu dairesel hareketi günümüzde birçok hareket sisteminin temelini oluşturmaktadır. Dönen miller, makara sistemleri, çarklar, kasnaklar, dişliler, volanlar, türbinler, içten yanmalı motorlar ve elektrik motorları gibi karmaşık düzenler bu uygulama alanlarından bazılarıdır [2]. Bu sistemler bu gün milyonlarca makinada kullanılarak insan yaşamını kolaylaştırmaktadır. Taşıtlarda kullanılan tekerler tek parça, çok parçalı yada merkezden dışarıya parmaklıklıklı yapıda olmaktadır. Çalışma prensibi, en basit şekliyle, bir dingil ile birlikte yaptığı dönme hareketi sayesinde sürtünme kuvvetini yenmek olarak tanımlanır. Tekerleğin bir yüzey üzerinde dönme hareketini yapabilmesi için, mutlaka yer çekimine ya da yüzeye temasını sağlayacak bir başka dış kuvvete maruz kalması gerekir [3].

### 2.1. Tekerin Tarihçesi

Taş, tahta, metal ve kauçuktan imal edilen tekerler zaman içerisinde üretim malzemelerinde değişiklik göstermiştir. Birçok farklı şekillerde kullanılan tekerin zamanın şartlarına göre gelişerek günümüzde kullanılan formuna ulaşmış ve gelişimine devam etmektedir.

**Kütük Destekleyiciler:** Neolitik dönem insanları, kütüklerden yapılmış silindirlerin üzerinde yüklerini taşıyorlardı [4]. Kütükler, her zaman homojen şekil yapısına sahip olmadığından aynı hizaya tutmak sorun olduğu için verimsiz bir yöntemdir.

**Çömlekçi Tekerleği:** MÖ 3500 lü yıllarda Güney Mezopotamya'da çömlekçiler, tekerleğin ilk kez endüstriyel işlerin makineleştirilerek kullanılmasını öncülük etmiştir. Ağır olmasına rağmen hızlı dönebilen taş tekerlekler, kilin şekillendirilerek çömlek yapımı için kullanılmıştır [4].

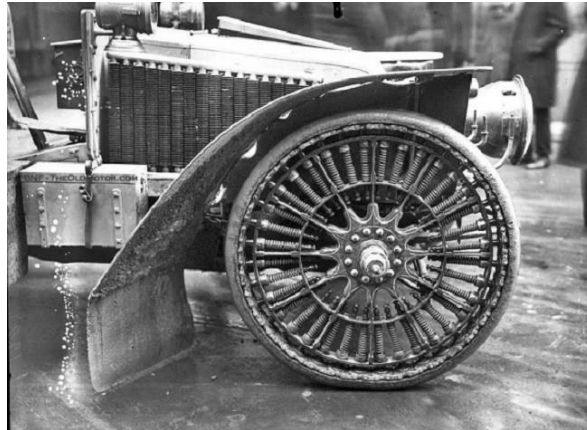
**Tekerlek Diski:** MÖ 2500 lü yıllarda taşımacılık için kullanılan ilk tekerlekler, dingille bağlı tahta diskler olarak Balkanlar ve Mezopotamya'da geliştirildi. Sümerliler bu tekerlekleri savaş arabalarında kullanılmıştır [5].

**Frenli Diskler:** Frenli tekerlekler rahatlıkla bir atın çekebileceği ağırlıkta olup at arabasının, savaş arabası olarak da kullanılmasına olanak vermektedir. Orta Asya'nın bozkırlarında MÖ 2000 yıllarında geliştirildi ve MÖ 1600 yıllarında Mısır'a yayılmıştır [6].

**Demir Çerçeveseli Tekerlekler:** Keltler, MÖ 750 li yıllarda savaş arabalarının; pürüzlü yüzeylere dayanıklılıklarını artırmak için tahta tekerleklerine demir çerçeveler eklediler [6]. Bu işlemi soğudukça yerine oturan sıcak demir şeritlerini tahta tekerleğe çivileyerek yapılmıştır.

**Su Tekerleği:** Yunanlılar MÖ 300 lü yıllarda akan suyun gücünü iş yapan duruma getiren su tekerleklerini keşfettiler . Su tekerlekleri, hem kovalardaki suyu sulama için daha yüksek seviyelere çıkartılmasında, hem de öğütme makinesini işleten milin çalıştırması için kullanıldı [5].

**Sertleştirilmiş Kauçuk Araba Tekerleği:** Robert Thomson 1845 yılında, daha hafif ve yıpranmalarına karşı daha dayanıklı pnömatik bir teker yapabilmek için, Charles Goodyear' ın keşfettiği sertleştirilmiş kauçuğu kullandı. Şekil 2.1' de görülen Robert Thomson ve Charles Goodyear' ın bu buluşu ulaşımı hızlandırdı. Tekerleğin icadı ve gelişimi ile ilgili en ciddi değişim buraya başlıyor [6].



**Şekil 2.1.** Robert Thomson ve Charles Goodyear Kauçuk Tekerleri [6]

**Mansell Tekerleği:** 1848 Yılında Richard Mansell tarafından tasarlanarak patenti alınan, dönemin tekerleklerine göre daha sessiz ve daha esnek olan Mansell demiryolu tekerleği, 16 adet meşe parmaklıklardan oluşmuş katı bir disk halindedir. Dayanımın arttırılması için çelik çerçeve ve çelikten merkezi bir göbek eklenmiştir. Zaman içerisinde meşe parmaklıklarda oluşan hasarlar, parmaklıkların değiştirilmesiyle ortadan kaldırılıp kullanımına devam edilmiştir. Şekil 2.2’de görülen Mansell Tekerleği restore edilerek Bluebell Demiryolu Müzesinde sergilenmektedir [7].



**Şekil 2.2.** Mansell Tekerleği Buckinghamshire Demiryolu [7]

**İlk Frenli Tekerleğe Sahip Araba:** 1910 Yılında üretilen ilk seri üretim araba özelliğini taşıyan Şekil 2.3’ de görülen Ford T Modelinde kullanılan, 12 ahşap parmaklıklı dar lastiğe uygun fakat çarpmaya ve çatlamaya karşı dayanıksız olan eski otomobil tekerleği olup tahta frene sahiptir [8].



**Şekil 2.3.** Ford T Modeli 12 Parmaklı Teker [8]

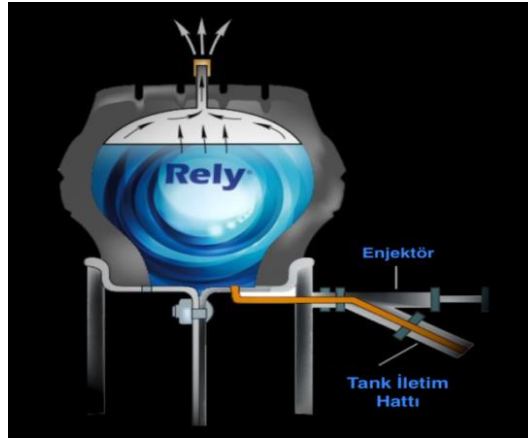
**Radyal Araba Tekerleği - 1915 Yılı:** Patenti Arthur William Savage' e ait araba tekeri, kauçuk kaplı çelik ya da polyester şeritlerden oluşuyor. Aynı zamanda günümüz radyal tekerin temelini oluşturmaktadır [6].

## 2.2. Havasız Tekerlerin Üretim Yöntemi

Gelişen teknolojinin ve havalı tekerlerin ihtiyacı karşılama yetersiz kalmasının etkisiyle farklı şirketler tarafından havasız teker üretilmeye yönelik çalışmaları bulunmaktadır. Firmalar havasız teker seri üretimine henüz geçilmemiş olmasına rağmen sorunların çözümü için tasarlanan havasız tekerler araçların özellikleri ve kullanım alanlarına göre farklılıklar göstermektedir.

### 2.2.1. Dolgu Teker Üretim

Dünyanın darbe emici malzeme üreticilerinden Carpenter'dan Endüstriyel firması teker patlamalarının önüne geçmek için Rely Flat Proofing Polymers (Teker patlamalarını önleyecek polimer) sistemleri ŞDL Zincir Sanayi ile üretimine çalışmaktadır. Teker patlamalarını önleyecek polimer teknolojisinde, Şekil 2.4'de tekerin içindeki havanın yerine esnek sıvı bileşik olan poliüretan enjekte edilerek ve yumuşak kauçuk hale getirildiği gösterilmiştir. Böylelikle tekerler kaya, çürük, çivi, cam gibi delici kesici cisimler hatta mermiye karşı bile etkilenmez yapıdadır. Teker patlamalarına son vererek, duruş sürelerini kısaltır ve masraflı onarımları ortadan kaldırılmasına yardımcı olurken aynı zamanda iş makinalarında düzenli ve sık sık yapılması gereken havalı teker bakımları ortadan kaldırır [9].



• Şekil 2.4. Poliüretan Dolgu Teker Modeli [9]

### 2.2.2. 3D Yazıcı ile Teker Üretim

Michelin markasının 3D yazıcı ile ürettiği tekerin şekil yapısı, akciğerde bulunan alveollere benzer mimaride olmasına rağmen havasız teker olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.5' de görülen 3D yazıcıda üretilen teker biyolojik ve organik olarak parçalanabilen geri dönüşüm malzemelerinden üretilmektedir. Ham maddesi portakal kabuğu, kâğıt, karton, hurda metal, pekmez ve çeşitli atık materyallerden oluşmaktadır. Tekerin bir diğer etkileyici özelliği araca takılı iken teker üzerinde bulunan izler 3D yazıcıya bağlanarak hızlı şekilde değiştirilebiliyor olmasıdır. Bu durum özellikle, hızlı bir şekilde yazlıktan, kışlık teker konseptine geçirilebilir ve hatta teker dişleri gidilecek bölgenin yol ve mevsim şartlarına göre optimize edilebilir. Teker 3D yazıcıyla hızlı üretimi olduğundan depolama ve istif gereksinimini ortadan kaldırmaktadır [10].



Şekil 2.5. 3D Yazıcıyla Üretilmiş Teker Modeli [10]

### 2.2.3. Makaslama Yöntemi :

İlk havasız tekeri 2005 yılında Michelin teker firması Tweel olarak isimlendirilen X Tweel Airless Radial Tire modelini geliştirmiştir. İngilizce "tire" ve "wheel" kelimelerinin birleşiminden oluşan Tweel isimli bu tekerlerde hava basıncı bulunmamaktadır [11]. Şekil 2.6' da görülen teker, kalıplaşmış teker sırtı olan bir lastik banttan ve teker sırtının hemen altına uygun bir temas yaması, bir dizi kiriş olan enerji emici poliüretan parmaklıklardan oluşturulmaktadır [12]. Sert bir göbeğe

bağlı, esnek ve kolay şekil değiştirebilen poliüretan parmaklıklar bir makaslama çubuğuna bağlı halde bulunmaktadır. Bu aksamlar tek bir ünite olarak işlev gören bir iplik bandından oluşur. Poliüretan parmaklıklar enerjiyi emer ve ardından iş makinası yada bağlı olduğu aracın zıplamadan kararlı bir şekilde durmasını sağlar. Bu kararlılık sürücü güvenlik ve konforunu arttırmaktadır [13].



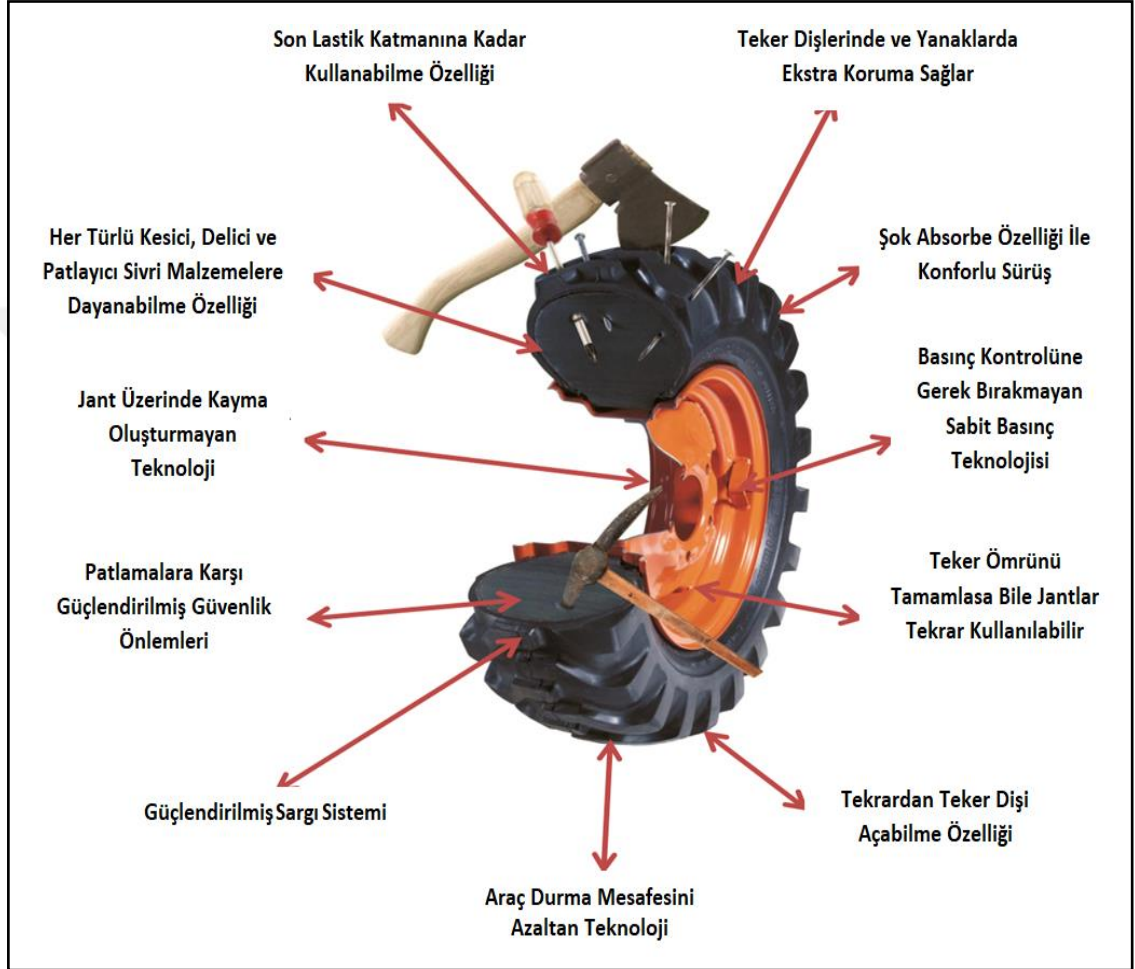
Şekil 2.6. Poliüretan Tellerle Üretilmiş Teker Modeli [13]

### 2.3. Havasız Tekerlerde Bulunması Gereken Özellikler

Havalı tekerlerle havasız tekerler kıyaslandığında havalı tekerlerde bulunan riskli durumlar havasız tekerlerle aşılmaya çalışılmıştır. Bu alandaki çalışmalar zaman içerisinde geliştirilmeye devam edilmiştir. HZT'lerin elastikliği havalı tekerle aynı yada daha fazla olmaktadır [9]. Tekerin içinde hava olmadığı için teker patlamaz ve hava kaybetmez yapıda olmalıdır [9]. Teker hava basıncı kontrolüne gerek kalmadığında, teker sürekli aynı basınçta kalmalı ve hava şartlarından etkilenmemelidir. Teker ömrünü garanti ederken, tekerin en son katmanına kadar çalışmasını sağlar tekrar dış açılabilir olması maliyeti düşüren önemli bir özelliği olmalıdır. HZT modellerinde parmaklıklar hasar görse bile çalışmaya devam eder ve eksik yada hasarlı parmaklıklar değiştirilebilir. Tekerin tümü eşit basınçta olduğundan yakıt sarfiyatını, erken aşınmayı ve ısınmayı önlemeli ve yüksek dayanıklı, dengeli ve rahat sürüş hâkimiyeti sağlamalıdır. Ağırlığı ve dengesi sayesinde lastiğin yere tutunma, itme ve kayma direnci artar. Tekerin ömrünü uzatarak bakım ve işletme giderlerinden tasarruf sağlanmalıdır. Esnekliği, temas



yüzeyinde bir artış sağlayarak, zeminle olan tutuşu artırır. Sürücü konforu ve emniyeti üst seviyede olduğundan aracı daha verimli kılar. Uzun ömürlü olması ve geri dönüşümü kolay malzemelerden üretilmesi HZT'lerin çevreci bir özellikte olmasını sağlar[10]. Şekil 2.7'de Poliüretan tekerlere ait özellikler sıralanmıştır.



Şekil 2.7. Poliüretan Havasız Teker [9]

#### 2.4. Havasız Teker Kullanım Alanları

Havalı tekerler gelişen hızlı teknolojiye ayak uydursa da sahip olduğu dezavantajları beraberinde getirmektedir. Bu yüzden havasız teker farklı sektörlerde inşaat, çiftlik, peyzaj, taş ocağı, maden, acil servis müdahalesi, parklar, avcılık, askeri operasyonlar, üniversiteler, sahil devriyesi, kamp, afet durumunda enkaz alanlarındaki araçların kullanımı için uygundur kısaca patlayan tekerlerin ciddi problemlere neden olduğu yerlerde bulunan araçlarda havalı tekerin yerini havasız teker almaktadır. Bu araçların bazıları aşağıdadır:

- İş Makinaları
- Tekerlekli Sandalyeler
- Uzay Araştırma Araçları
- Askeri Araçlar
- Arabalar
- Hava Taşıtları

#### 2.4.1. İş Makinaları

Pnömatik olmayan tekerler, tüm arazi koşullarına tırmanabilmeleri için, Şekil 2.8' de görülen iş makinalarına yüksek sağlamlık ve dayanım sağlamaktadır. Mükemmel darbe emilimi sayesinde pnömatik bir tekerden daha yumuşak bir sürüş konforuna sahiptir. Araç ağır olsa bile, teker yüzeyine zarar vermez. Havasız teker, hasarlara karşı geleneksel tekerlere göre çok dirençlidir, bu yüzden daha uzun dayanım sağlamaktadır [14].



Şekil 2.8. İş Makinası Poliüretan Havasız Teker [14]

#### 2.4.2. Tekerlekli Sandalyeler

Havasız tekerler, Şekil 2.9' da görülen merdiven çıkabilen motorlu tekerlekli sandalyelerde de kullanılmaya başlandı. İlk önce Michelin firması tarafından tanıtımı yapıldı. Havasız tekerin sönümlenme özelliği sayesinde tekerlekli sandalyedeki süspansiyon sisteminin ortadan kaldırılması söz konusudur [15].

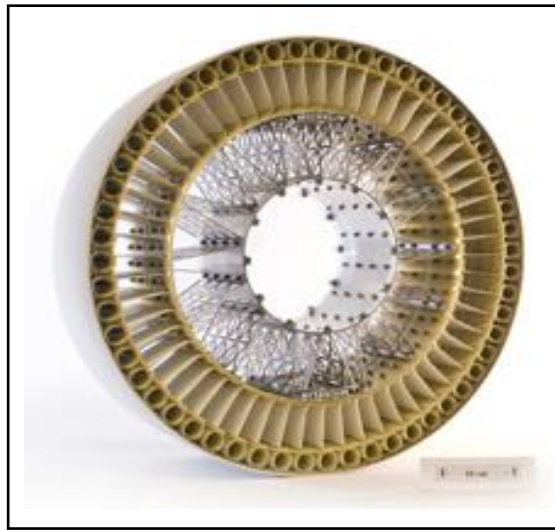




**Şekil 2.9.** Tekerlekli Sandalyeler de Havasız Teker Kullanımı [15]

### **2.4.3. Uzay Araştırma Araçları**

Havasız bir lastik üretilmesine yönelik ilk büyük girişim 1970’te NASA’nın ürettiği Apollo Lunar Rover Aracı oldu [16]. Şekil 2.10’daki teker, şekli oluşturmak üzere bir araya getirilmiş çelik tellerden yapılmıştır ve daha sonra çinko ile kaplanmıştır. Çekiş elde etmek için dış yüzeye titanyum köşebentler eklenmiştir. Bu tasarım, sürücülerin konforunu düşünülerek üretilecek olursa yeryüzünde kullanımı çok pratik olamaz. Aynı zamanda tasarım ortalama bir tüketici için ve ortalama bir otomobil için çok pahalı olur [17].



**Şekil 2.10.** Apollo Lunar Seyyar Araç Teker [16]

NASA tarafında tasarlanan diğerk titanium-nikel havasız teker Şekil Hafızalı Akıllı Teker (Shape Memory Allow Tire) (SMA) adlı Şekil 2.11’de görülen devrim niteliğinde bir gelişme olarak görülmektedir. NASA'nın mühendisleri 2000’li yılların başında Goodyear ile birlikte geliştirdiği kuruluşunun ilk aşamalarında, lastikleri çamur dahil her türlü karmaşıklıkta, kumlu ve kayalık arazilerde iyi çalışan çelik yayları kullanmaya çalıştılar. Bununla birlikte, yayların zamanla bükülüp ve kırılmaları etki altında plastik deformasyona uğramaları sorunlarıyla karşılaşıldığından; Stokiyometrik bir titanium ve nikel alaşımı olan nitinol’ e geçti. Nitinol, sıradan malzemeler gibi deforme olmaz. Tipik olarak, gerilme üst seviyede kimyasal bağları gerer, ancak şekil hafızasına sahip olan bu yeni alaşım deformasyonun etkilerini eski haline getirmek için atomik yeniden düzenleme yapar. İnanılmaz yüklemeler altında plastik deformasyon sorununu çözen ekip, yeni icatlarını test etmeye başladı. SMA teker, Dünya üzerinde Mars yüzeyine benzer, benzer koşullar ve şartlar altında test edildi [18].



**Şekil 2.11.** Şekil Hafızalı Akıllı Teker [18]

#### **2.4.4. Askeri Araçlar**

Zırhlı askeri araçlarında da havasız teker kullanılmaktadır. Bu tekeri kullanan askeri araçların en büyük avantajı, düzenli bakım gerektirmemesidir. Teker üzerindeki bazı teker parmaklıkları, hasar görmüş veya kayıp olmuş olsa bile hala hareketline devam

etmesidir [15]. HZT' nin sađlamlıđını test etmek için teker 50 kalibrelik mermilerle vurulup, 5000 saatlik sűrűşe tabi tutuldu. Deđiřik arazilerde denenen teker, çivi nedeniyle zarar gűrse de, 1500 km daha yol almayı bařarmıřtır [19].



**şekil 2.12.** Askeri Zırhlı Araçlarda Havasız Teker Kullanımı [19]

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sanayi devriminden sonra özellikle 20 yy. başlarında ulaştırma sektöründe ivmeli bir gelişme olmuştur. Dünya savaşlarının da katkısının çok büyük olduğu bu gelişmede ulaşım araç bileşenlerinin yeniden tasarlanması ve iyileştirilmesi firmalar için bir rekabet unsuru olmuştur. Daha uzun ömürlü malzeme kullanılarak daha hızlı ve daha güvenli araçların imalatında teker teknolojisindeki ilerlemenin payı büyüktür. İnsanlık tarihinin ilk dönemlerinde basit yöntemlerle ve basit malzemelerle üretilen tekerler, günümüzde geçmişe kıyasla çok daha karmaşık yöntemlerle üretilmektedir.

İlk ticari pnömatik teker, Dunlop tarafından 1888'de piyasaya sürülmesinden bu yana, dünya teker pazarında pnömatik teker kullanılmaktadır [20]. Bunun nedeni; sert bir jant üzerindeki pnömatik tekerleklerin oldukça önemli avantajlara sahip olmasıdır. Bu avantajlar; pürüzlü yüzeyler üzerinde düşük enerji kaybı, düşük dikey sertlik, düşük temas basıncı ve hafif kütleli olmasıdır. Fakat pnömatik tekerin dezavantajları da vardır. Bunlar; taşıt hareket halindeyken tekerin patlaması durumunda oluşması muhtemel büyük hasarlar, iç hava basıncı için düzenli bakım gerekmesi ve karmaşık üretim sürecinin olmasıdır [21].

Havasız tekere sahip olmak, patlama olasılığının olmaması; bu da, otoyol kazaları sayısının önemli ölçüde azalacağı anlamına gelir. Özellikle askeri araçlardaki en zayıf nokta tekerlektir ve genellikle delici, patlayıcılar tarafından hedeflenirler. Bu araçlarda havasız teker kullanılsaydı, bu durum endişe verici olmazdı. Havasız teker kullanımının birçok çevresel faydası vardır. Elastik olmaları, uzun ömürlü olmaları havasız tekerlerin, pnömatik tekerler kadar sık değiştirilmesi gerektirmeyecektir. Bu, depolama ve istif hacmini önemli ölçüde azaltacaktır.

1920'lerin başından itibaren, pnömatik teker güvenliğini garanti etmek için tekerlek desenindeki tellere ilave yapılarak, tekerlek esnekliğini geliştirme çalışmaları yapılmıştır [22]. 1970'li yıllarda Dunlop lastiğin delinmesi veya hava kaçırmaları hallerinde dahi sürücülere uzun yol ve yüksek hız kontrolü sağlayan, dünyanın ilk arıza yapmayan lastiği Denovo' yu üretti [23]. O zamandan beri mühendisler, pnömatik tekerin havası yerine geçebilecek elastik madde doldurularak ya da çokgen benzeri tekerlek deseni kullanarak pnömatik olmayan teker (HZZ) geliştirmeye

çalışılmıştır [24]. Pnömatik teker için yapılan çalışmaların, havasız teker için de tekrarlanması ve bu yeni teker tipinin ana karakterlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir.

Tonuk E. ve ark. 2001 yılında, radyal bir otomobil lastiğinin ayrıntılı bir sonlu eleman modelini inşa etmiş ve özellikleri çalışılmıştır [25]. Kauçuğun gerilme gerilimi ilişkisi modellenmiştir. Çeşitli sadeleştirmelerin geçerliliği kontrol etmiştir.

Balawi S ve ark. (2008), petek yapısının farklı özelliklerini araştırmıştır [26]. Bu bal peteği şekillerinin etkili özelliklerinin modellenmesi, sandviç yapıların genel mekanik tepkisini öngörmek için kilit öneme sahiptir. Özellikle, düzlem içi elastik modüller analitik ve sayısal yollarla çalışılmış ve alüminyum altıgen veya normal peteklerin deneysel sonuçları ile ilişkilendirilmiştir. Bal peteğinin esnekliğinin hücre açısı ile arttığı bulunmuştur.

Stefano Gonella ve ark. (2008), homojenleştirilmiş süreklilik modelleri ile ilişkili kısmi diferansiyel denklemlerin analizi yoluyla, altıgen ve yardımcı kafesler için eşdeğer düzlemsel özellikler hakkında bir çalışma yürütmüştür [27]. Kabul edilen homojenleştirme tekniği, ayırık kafes denklemlerini sonlu farklar formalizmine göre yorumlar ve kafes ünite hücresinin sonlu eleman tanımlaması ile birlikte uygulanır.

G. Sasi Sekhar ve arkadaşları, 2014 yılında, bakım ihtiyacını azaltan düzlemsel bir teker modeli hazırlayarak ANSYS programında analizlerini yapmıştır [28]. Yapılan analizler sonucunda malzeme kullanımı minimize ederek, amortisör ihtiyacı, bakım gereksinimi ve patlama riskini ortadan kaldırmıştır.

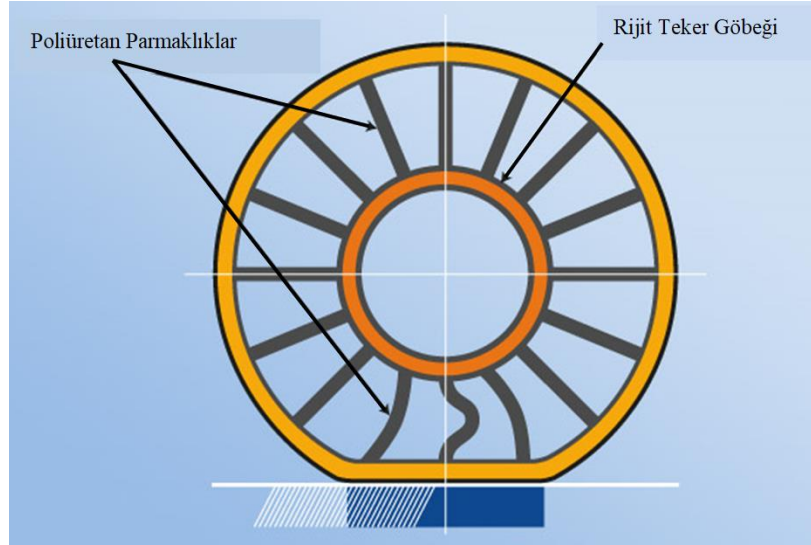
S. Karthick ve arkadaşları, 2017 yılında, havasız tekerin dikey direngenlik, temas basıncı ve yuvarlanma direnci üzerine odaklanarak bir havasız teker modeli tasarlanmıştır [29]. Geometrik ve malzeme parametrelerinin kayma bandı kalınlığı ve kayma modülü ile birlikte yuvarlanma direnci üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Havasız tekerlerle ilgili son zamanlarda yenilikler olmuştur. Bu yenilikler; HZT' ler çokgen tekerlek desenlerinden, iç ve dış halkalara sahip elastik bir madde katmanından meydana gelmiştir. HZT yapısı göz önüne alındığında tekerlek deseni;

tekerleğin dönmesiyle birlikte sıkıştırılmış, tekrarlayan yükleme altında gerilmelere maruz kalmıştır. Bu nedenle, taşıt kullanılırken tekrarlı yükleme altında tekerlek deseninin bölgesel gerilmeleri en aza indirmek önemlidir. Başka bir deyişle, tekerlek deseni yorulma direnci için önemlidir.

Havasız tekerde, geleneksel bir tekerlek göbeği tertibatı kullanılmaz. Sağlam bir iç göbek üzerine ve düzenli dizilmiş poliüretan parmaklıklarla çevrilerek monte edilir (Şekil 3.1.). Makaslanan kasnağın üzerine tekerin dış kenarını oluşturmak için kauçuk kayma bandı gerilir. Geleneksel tekerlerin içine hapsolmuş havanın oluşturduğu baskı, yerini kayma bandının gerginliğini oluşturan tekerlek parmaklıkları kuvvetine bırakır.

Şekil 3.1’ de görülen tekerin çalışırken; bası- çeki gerilimlerinin döngüsel değişmesi sırasında parmaklıkların büküldükçe geçici deformasyona uğrayıp, hızla başlangıç şekline geri dönmesi nedeniyle tekerin yüksek sertlik ve yüksek esnekliğe sahip malzemenin yapılması gerekir. İstenen malzemenin elde edilmesi genellikle çok zaman aldığından teker malzemesi araştırılması yerine teker geometrisine müdahale etmek daha kolay ve ucuz bir yoldur.



**Şekil 3.1.** Yükleme Altında HZT Modeli [30]



Resilient Technologies tarafından geliştirilen prototip lastikler, Şekil 3.2’ de görülen tekerlerin dayanımlarını test edebilmek için laboratuvar ortamında farklı hızlarda binlerce mil aşınmayı simüle edebilen yol tekerleri de dahil olmak üzere farklı alanlar için tasarlanan tekerler bir dizi performans testine tabi tutulur [31].



**Şekil 3.2.** Resilient Technologies Firmasının Petek Desenli HZT’ ler de Dinamik Test Görüntüleri [31]

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Çeyrek Taşıt Deney Düzeneginin Tasarımı ve Konstrüksiyonu

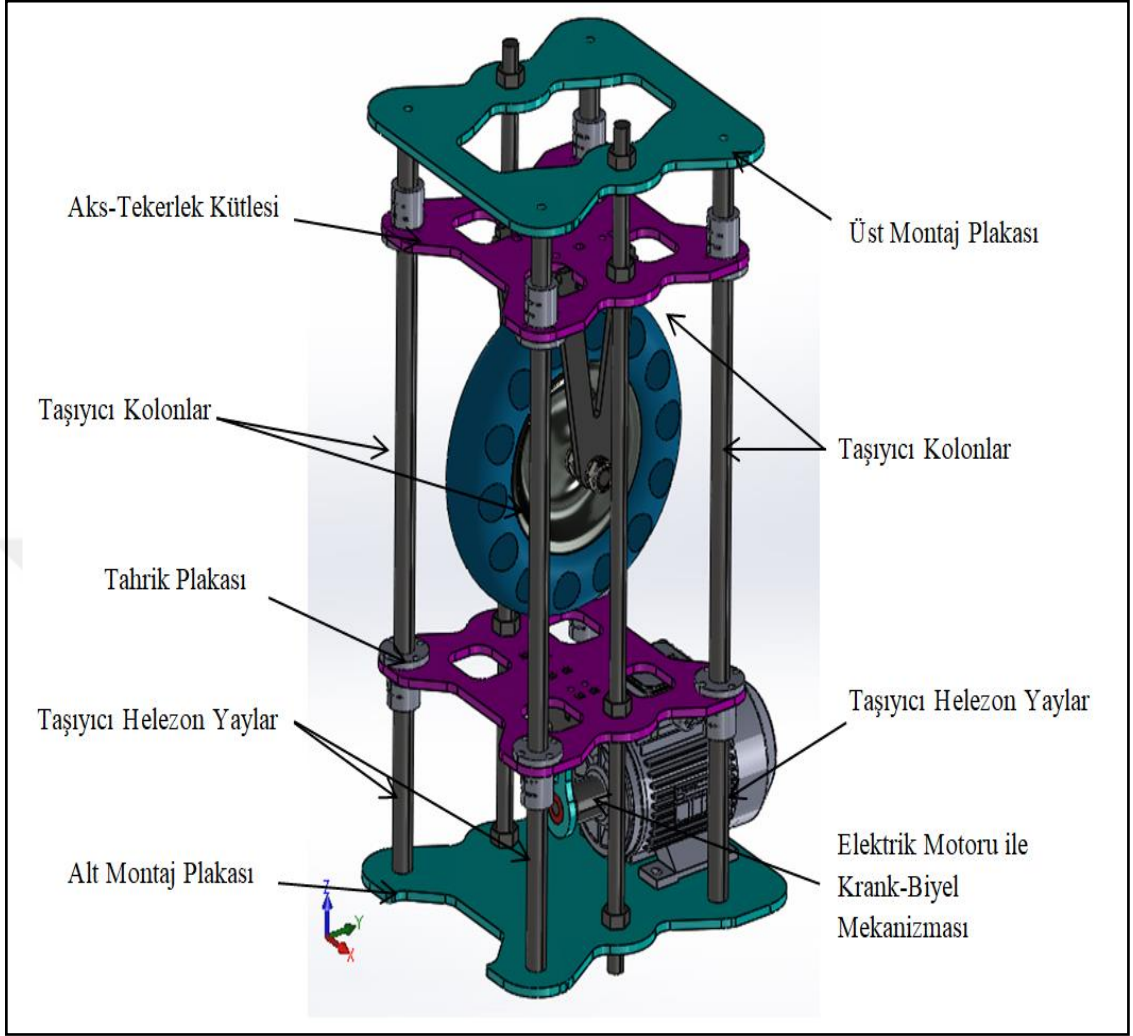
Çeyrek taşıt modeli; çeyrek taşıt ana kütlesi, aks-tekerlek kütlesi, süspansiyon sistemi elemanları ve tekerleğin katılığına eşit bir yay elemanının bir araya gelmesinden meydana gelmektedir. Bu model, taşıt ana kütlesi ile aks-tekerlek kütlelerinin düşey eksen hareketleri yol pürüzlülüğünden meydana gelen titreşimlerin etkisi ile oluşmaktadır. Bu titreşim hareketi, modelin hareket denklemlerinin elde edilmesi ve sayısal çözümünün yapılmasıyla incelenebilmektedir [32].

Çeyrek taşıt modeli göz önüne alınarak tasarlanan deney düzeneginde; modeli oluşturan kütlelerin aksel hareket serbestliğinin sağlanması ve yol pürüzlülüğünün oluşturduğu titreşimlerin, uygun mekanizma ve cihazlarla oluşturulması gerekmektedir. Bununla birlikte tasarımında dikkat edilmesi gereken özellikler; deney düzenegi montaj ve demontajın kolay yapılabilmesi, modüler olması, parçaların taşınabilir ağırlık da ve farklı donanımlarla uyumlu çalıştırılabilmesidir.

Yukarıda verilen veriler çerçevesinde deney düzenegi; Şekil 4.1' de görülen yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla ayrılabilir plakaların birleşiminden meydana gelen çeyrek taşıt üst montaj plakası, aks-tekerlek kütlesi, tahrik plakası, taşıyıcı helezon yaylar, alt montaj plakaları ve taşıyıcı kolonların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Şekil 4.1' de görülen deney düzenegi katı modeli bilgisayar destekli bir tasarım programı olan SolidWorks çizim programında tasarlanmıştır.

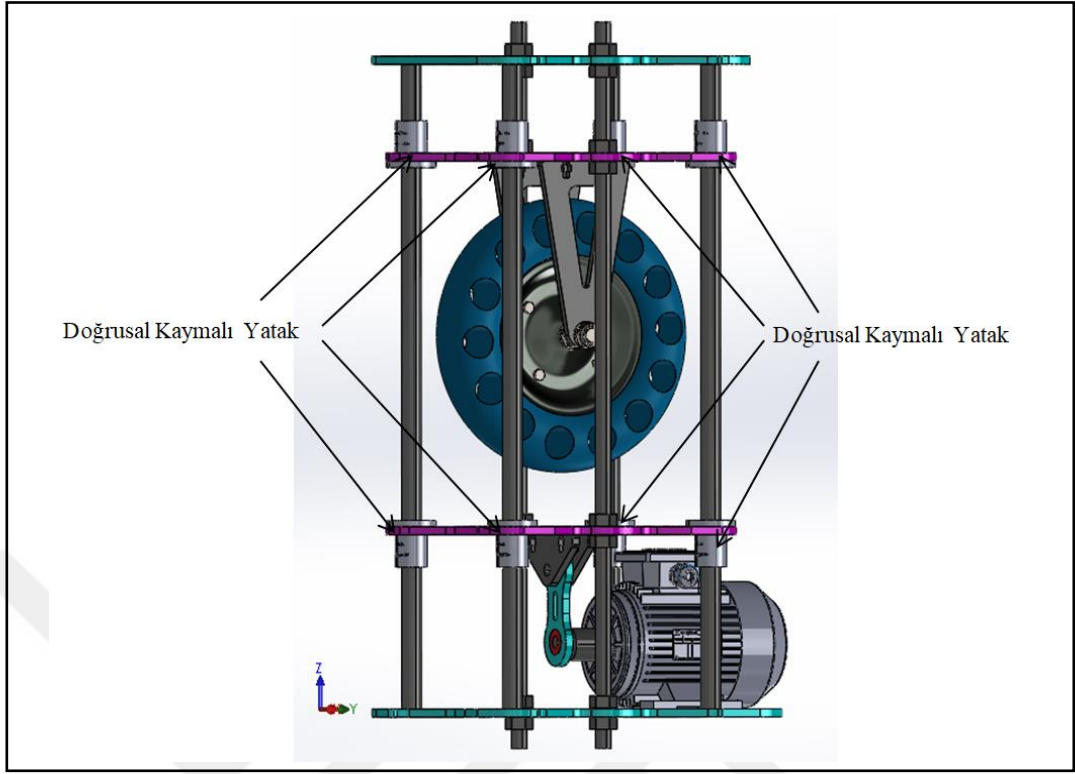
Yol pürüzlülüğünden kaynaklanan titreşimleri oluşturmak için elektrik motoru ile krank-biyel mekanizması kullanılması düşünülmüştür. Elektrik motoru kullanılarak harmonik hareket ile titreşim oluşturulması istendiğinden tahrik plakasından çubuk bağlantısının ayrılması, eksantrik milli krank-biyel mekanizması ile yol girişi oluşturulmuştur. Tahrik plakasından çubuk bağlantısının ayrılması ve krank-biyel mekanizması bağlantısı ile hareket oluşturulması tasarlanmıştır.





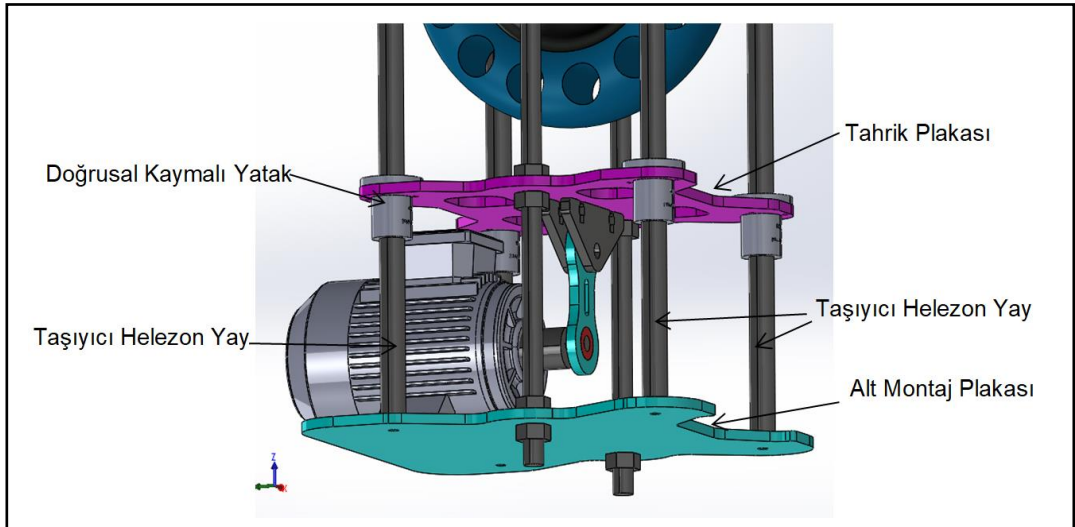
**Şekil 4.1.** Çeyrek Taşıt Deney Düzeneği Tasarımı

Deney düzeneği Şekil 4.2’ de görülen düşey hareket kabiliyetine sahip kütlelere; aks-tekerlek kütlesi ve tahrik plakasına dörder adet doğrusal kaymalı yatak montajı yapılarak düşey ekseninde hareket serbestliği sağlandı.



**Şekil 4.2.** Doğrusal Kaymalı Yataklar

Hazırlanan deney düzeneğinde tahrik plakası ile alt montaj plakası arasında, eksenel hareket yaparak titreşim oluşturmak için eksantrik milli krank biyel mekanizması yerleştirilmiştir. Tahrik plakasının üzerine doğrudan yük gelmesine engel olunması için dörder adet taşıyıcı helezon yay tasarlanarak yerleştirilmiştir. Şekil 4.3’ de çeyrek taşıt modelinin tahrik plakası ile alt montaj plakası gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** Taşıyıcı Helezon Yay

## 4.2. Deney Düzeneginin İmalatı ve Montajı

Deney düzeneginin imalatı farklı aşamalardan meydana gelmektedir. İlk aşamada düzenekte kullanılan doğrusal kaymalı yataklar, rulmanlar, tekerlek, elektrik motoru, çeşitli kalınlıklarda plakalar ve krom kaplı miller ile cıvata, somun gibi kalıp hazır malzeme ve elemanlar tedarik edildi.

Tasarlanan deney düzenegi parçaları AutoCad çizim programında ölçülendirilmiştir. İkinci aşamada plakaların ve millerin işlenmesiyle çalışmaya devam edildi. Deney düzenegindeki temel parçaları ağırlıklı olarak plakalar olduğu için öncelikle plakaların işlenmesi ile imalata başlandı. Sabit kalınlıktaki plakalar Ek 1’ de görülen ana ölçülerinde bilgisayar kontrollü oksijen kaynağı ile hassas olarak kestirildi. Bu işlemler tamamlandıktan sonra yüzeyleri temizlenen plakalar birleştirilip eş merkezli delikler işleme merkezinde delinmesi ile montaja hazır hale getirildi.

İşleme merkezinde yuvaları açılan plakalara doğrusal kaymalı yatakların montajı yapıldı. Plakaların montaja hazır hale gelmesinin ardından taşıyıcı kolonların işlenmesi ile deney düzeneginin ana hatları ortaya çıkartıldı. Taşıyıcı helezon yayların imalatının yaptırılması, krank-biyel mekanizması montajı ve tekerlek - aks kütesine montajı ile deney düzenegi son haline getirildi. Gerekli parçalar galvaniz ile kaplanarak paslanmaya karşı önlem alındı. Şekil 4.4’ de bulunan deney düzeneginin imalatın bitmesi ile deney düzenegi Bozok Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü K18 No’ lu laboratuvarında çalışma için tahsis edilen alana montajı yapılarak yerleştirildi.



**Şekil 4.4.** Deney Düzenekinin Karşından (a), Üstten Görüntüsünün (b) Son Durumu

### 4.3. Havasız Tekerin Modellenmesi

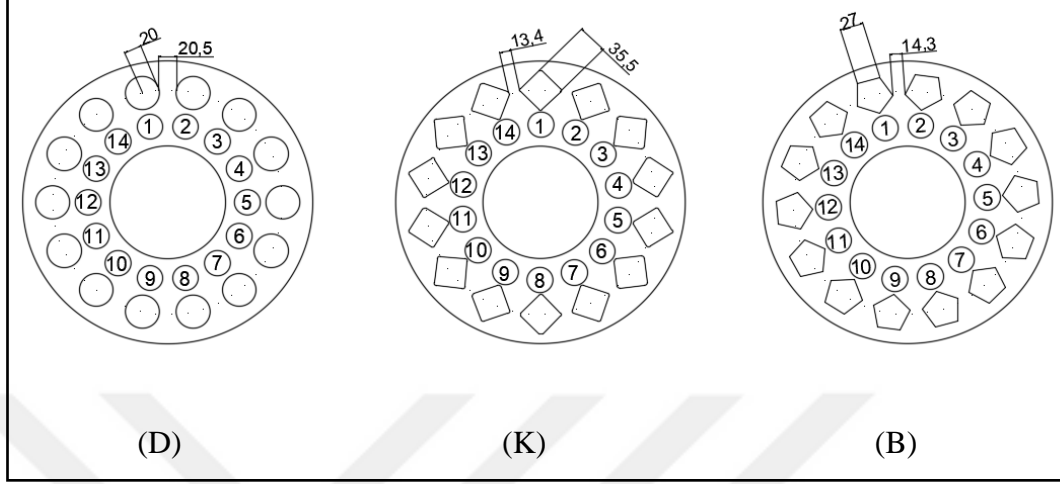
Çeyrek taşıt modelinde kullanılacak Şekil 4.5’ de görülen prototif orijinal teker, patlamaya ve aşınmaya karşı dirençli poliüretan köpük malzemedен üretilmiştir. Seçilen tekerin yarıçapı 350 mm, kalınlık 89 mm ve ağırlığı 2.52 kg dır.



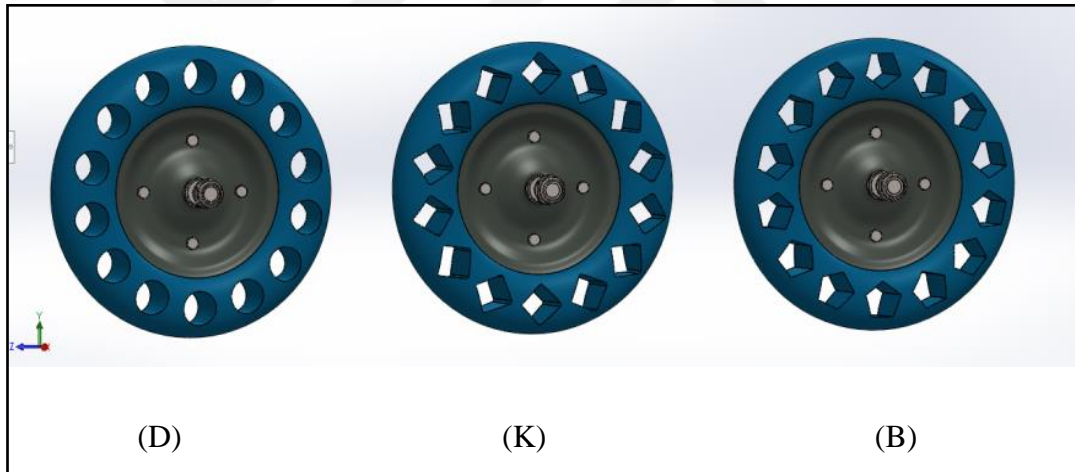
**Şekil 4.5.** Poliüretan Teker

AutoCad ve SolidWorks çizim programıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’ de gösterilen üç farklı desende tasarlanmıştır. HZT’ de kullanılacak desenler sırasıyla daire, üçgen ve

beşgen geometrik yapıdadır. Poliüretan tekerlerin HZT desenleri eşit ağırlık, hacim ve eşit sayıda olacak şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. HZT Daire (D), Kare (K), Beşgen(B) AutoCad Çizimi



Şekil 4.7. HZT Daire (D), Kare (K), Beşgen(B) SolidWorks Çizimi

#### 4.4. Havasız Teker Modelinin Üretilmesi

Basınçlı su ile kesme yöntemi olarak bilinen su jeti, en verimli kesme yöntemlerinden biri olup poliüretan tekere HZT desenlerini oluşturmak için kullanılmıştır. Kesici takımı olmadığından hiç aşınmayan, köşelerde hiç çapak bırakmayan, kesme sırasında malzemeyi deformasyona uğratacak kuvvetler oluşturmayan, sıcaklık etkisi olmayıp böylelikle; yapısal bozulma, kararma, erime, damlama oluşmaması ve yanma sorunları asla söz konusu olmayan; bir kesici takım olan su en karışık biçimleri dahi, yüksek hassasiyet ile elde edilebilmektedir. Lastik



ve plastik ile kaplanmış çeliklerde ve çok katlı kompozit malzemelerde yanma ve ergime sıcaklıkları farklı olduğundan, su jeti sorunsuz kesmede için kullanılabilen tek yöntemdir.

Şekil 4.6 da gösterilen AutoCad programında hazırlanan çizime göre PÜ tekerler su jetiyle kesme işlemi yapılarak deney için kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Şekil 4.8’ de hazır olan tekerler tasarlanırken ağırlığın sabit kalması amaçlanmıştır. Eşit geometrik yapıda tasarlanan 14’ er adet beşgen, kare ve daire teker desenler elde edilmiştir.



**Şekil 4.8.** Su Jetiyle Desen Verilmiş Poliüretan Tekerler

Poliüretan tekerlerden çıkartılan malzemelerin ağırlıkları hassas terazide ölçülerek Şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Hazırlanan HZT modelleri Bozok Üniversitesi laboratuvarına getirilmiştir.



**Şekil 4.9.** Poliüretan Tekerlerden Çıkartılan Desenler

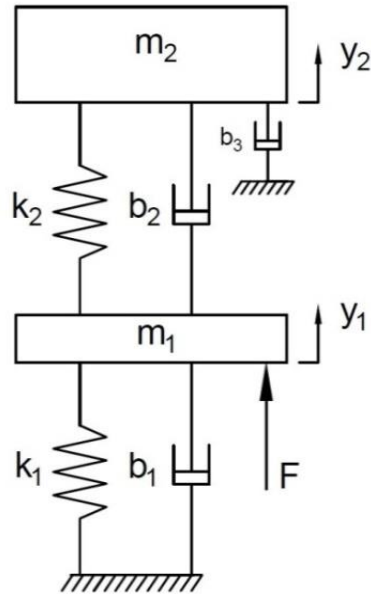
## 5. MODELLEME VE DENEYLER

Çeyrek taşıt deney düzeneği ve eşdeğer modeli tasarlanırken klasik çeyrek taşıt modeli göz önünde bulunduruldu. Çeyrek taşıt modelini oluşturan ana kütle ve aks-tekerlek kütleleri ile yol girişini temsil eden kütle, aksel hareket kabiliyetinin sağlanabilmesi için dörder adet doğrusal kaymalı yatak ve dört adet taşıyıcı kolon üzerine kuruldu.

Çeyrek taşıt deney düzeneği; yol girişi ve bir taşıtın dörtte bir yapısını temsil eden bir tekerlek, bir aks kütleleri, süspansiyon sistemi (helezon yay) ve taşıtın gövdesinin dörtte bir kütlelerini temsil eden ana kütle meydana gelmektedir. Şekil 5.1 (a)'da kaymalı yatakların bağlı bulunduğu plakalar fiziksel modeli, deney düzeneğinin gerçeği Şekil 5.1 (b)'de yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla aks-tekerlek kütleleri ve bu sisteme yoldan gelen pürüzlülükleri aktaran yol girişi tahrik plakası kütleleri olarak görülmekte olan eşdeğer modeli bulunmaktadır. Yoldan gelen etkileri oluşturan tahrik sistemi ise bir tahrik plakası, taşıyıcı yaylar ve krank-biyel mekanizmasından meydana gelmektedir. Çeyrek taşıt deney düzeneğinin gerçeği ve eşdeğer modeli deney düzeneğini oluşturan parçaların etkileri incelenerek oluşturuldu.



(a)



(b)

Şekil 5.1. Çeyrek Deney Düzeneğinin Gerçeği (a) ve Eşdeğer Modeli (b)

Sonuç olarak çeyrek taşıt deney düzeneği hareket denklemleri bu eşdeğer model dikkate alınarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$m_2\ddot{y}_2 + b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + b_3\dot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) = 0 \quad (5.1)$$

$$m_1\ddot{y}_1 + b_1\dot{y}_1 + b_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1y_1 + k_2(y_1 - y_2) = F(t) \quad (5.2)$$

Tablo 5.1’ de deney düzeneği eşdeğer modelinin parametreleri görülmektedir. Bu parametre değerlerinin tespit edilmesiyle çeyrek taşıt deney düzeneğinin gerçeği üzerinde yapılan deneysel çalışma sonuçları ile bilgisayar simülasyonu sonuçları karşılaştırılabilir hale gelecektir.

**Tablo 5.1.** Eşdeğer Model Parametreleri

m <sub>1</sub>	Tahrik plakası kütlesi
m <sub>2</sub>	Aks-tekerlek-jant kütlesi
k <sub>1</sub>	Taşıyıcı yayların ve tahrik plakasının toplam yay sabiti
k <sub>2</sub>	Tekerleğin yay sabiti
b <sub>1</sub>	Tahrik plakasındaki (alt tabla) kayan bilyalı yatakların toplam sönüm sabiti
b <sub>2</sub>	Tekerleğin sönüm etkisini temsil eden sönüm sabiti
b <sub>3</sub>	Aks-tekerlek plakasındaki (üst tabla) kayan bilyalı yatakların toplam sönüm sabiti
y <sub>1</sub>	Yol girişi değişkeni
y <sub>2</sub>	Aks-tekerlek kütesinin çıkış hareket değişkeni
F(t)	Tekere gelen dış kuvvet



### 5.1. Direngenlik Katsayısının Bulunması ( $k_1$ )

Deney düzeneğinin tespit edilen parametreleri Tablo 5.1’ de bulunmaktadır. Kütleler, yay sabitleri ve sönüm sabitlerinden oluşmaktadır. Parametre değerleri, tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi elektronik terazi ile ölçülmektedir. Yay sabiti; yay özelliğine sahip parçanın yük-çökme diyagramının oluşturulması ile elde edilen doğrunun eğiminden ve sönüm sabiti de; tek serbestlik dereceli sistemin serbest titreşimlerinin ölçülmesi sonucu elde edilen zaman cevabının logaritmik azalma yöntemi ile incelenmesi sonucunda belirlenmektedir. Tahrik plakası, taşıyıcı helezon yaylar ve kaymalı yataklardan meydana gelen tek serbestlik dereceli deney düzeneği ve bu düzeneğin fiziksel modeli Şekil 5.2’ de görülmektedir.



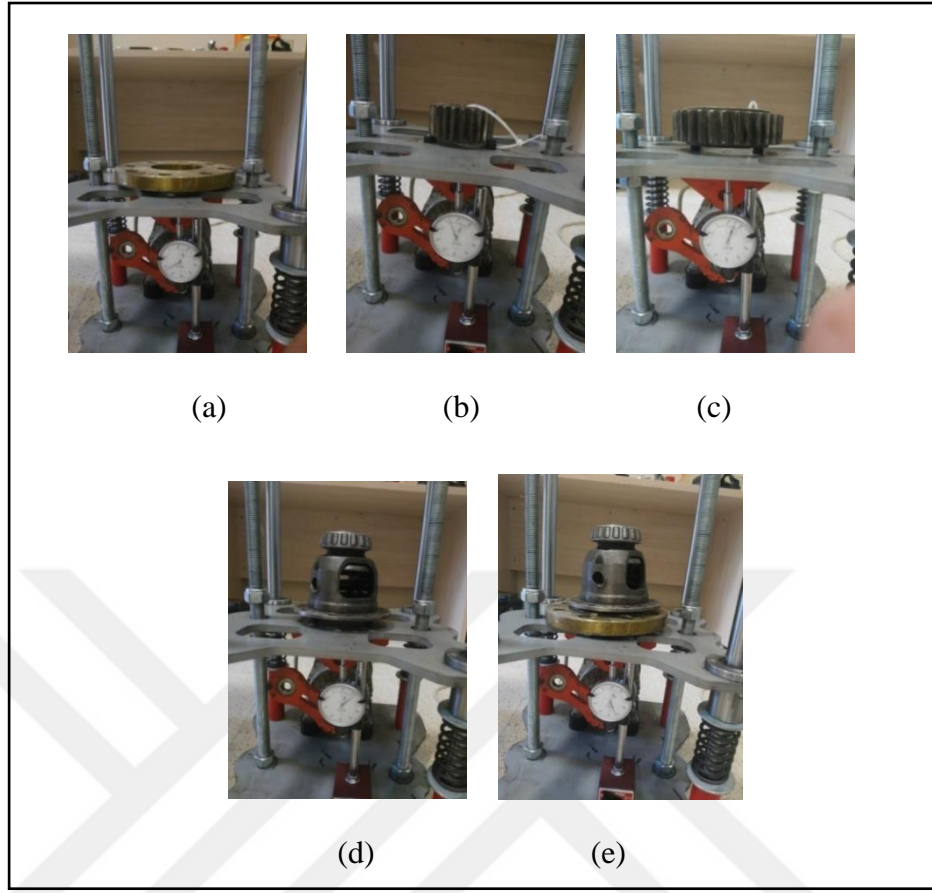
(a)



(b)

**Şekil 5.2.** Deney Düzeneğinin Yük - Çökme Ölçümüne Hazırlanması (a), Ağırlıkların Ölçülmesi (b)

Tahrik plakasının üzerine konulacak flanş değerleri elektronik terazi ile ölçüldükten sonra şekil 5.3’ de görülen komparatör yardımıyla helezon yaylar ve tahrik plakasının sehim değerleri ölçülmüştür. Bu değerleri elde etmek için beş farklı ağırlık kullanılmıştır.



**Şekil 5.3.** Yük-çökme ölçümü

Alt tahrik plakasının esnemesinde kullanılan flanş malzemelerinin Şekil 5.3’ de ölçülen ağırlıkları ve komparatörden alınan değerlerle Tablo 5.2’ de görülen örnek yükleme-esneme ölçüm tablosu hazırlanmıştır.

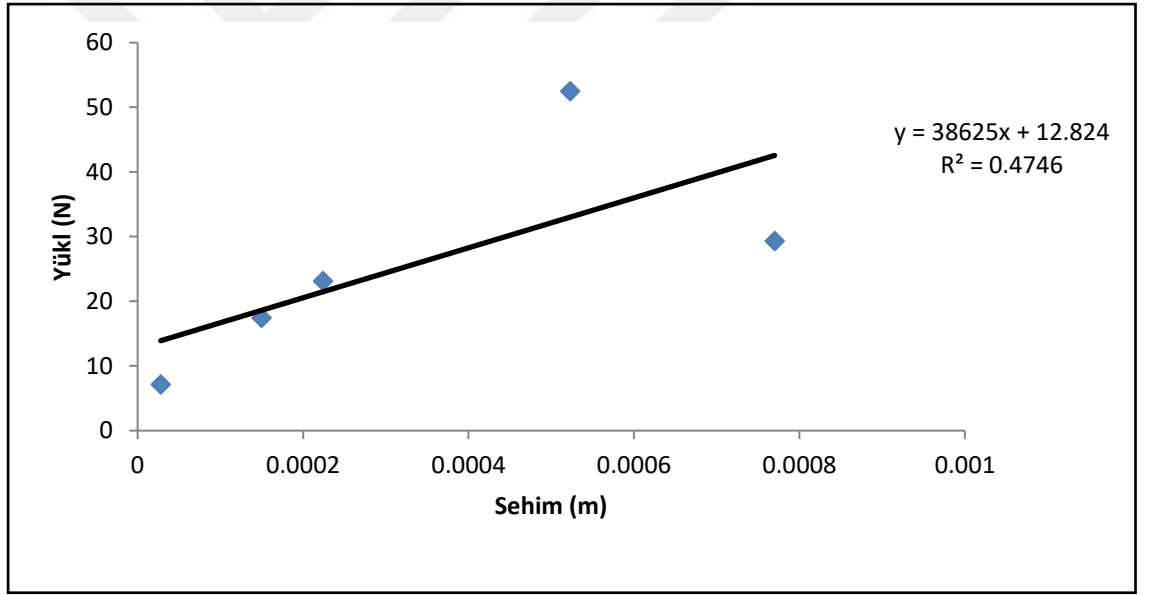
**Tablo 5.2.** Örnek Yükleme-Esneme Ölçümü

Yük Tipleri					
Yük (kg)	2,99	1,78	0,73	2,36	5,35
Sehim ( $10^{-2}$ mm)	77	15	2,8	22,4	52,3

Şekil 5.4' de Tablo 5.3' de verilen değerlerin ortalamasını gösteren bir doğru ve denklemi verilmiştir. Doğrunun eğimi doğrusal yayın, direngenlik katsayısıdır.

**Tablo 5.3.** Yük-Sehim Ölçüm Değerleri

Sehim ( $10^{-5}$ m)	Yük (N)
77	29.3319
15	17.4618
2.8	7.1613
22.4	23.1516
52.3	52,4835



**Şekil 5.4.** Sehim-Yük Diyagramı

Şekil 5.4' de bulunan Sehim-Yük Diyagramı, doğrunun eğiminden tahrik plakasının ve altında yer alan dört adet helezon yayların toplam yay sabiti değeri Direngenlik Katsayısı,  $k_1 = 38.625$  N/m olarak tespit edildi.

## 5.2. Doğrusal Yatak ve Alt Plakanın Sönüm Katsayısının Bulunması ( $b_1$ )

Tahrik plakası Şekil 5.5' de parametre değerlerini elde etmek amacıyla oluşturulan deney düzeneği görülmektedir. Aksenal titreşim oluşturucunun üzerine büyük yükler etkilemesi için üzerinde bulunan plakanın altına helezon yaylar ile destek

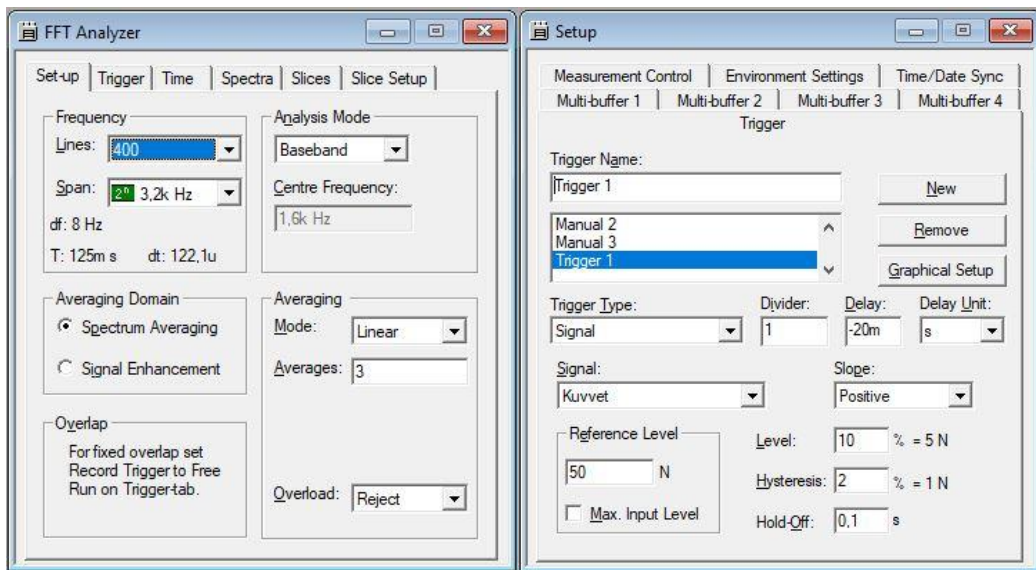
oluşturulduktan sonra bu plakanın üzerine, frekans cevabı aranan tahrik plakası, helezon yaylar ve kaymalı yataklardan oluşan sistem yerleştirildi.

Doğrusal yataklar ve tahrik plakasının sönüm katsayısının bulunması sırasında tek eksenli ivme ölçer tahrik plakasının orta noktasına yerleştirilerek, çekiçle anlık darbe etkisi Şekil 5.5' de uygulanmıştır.



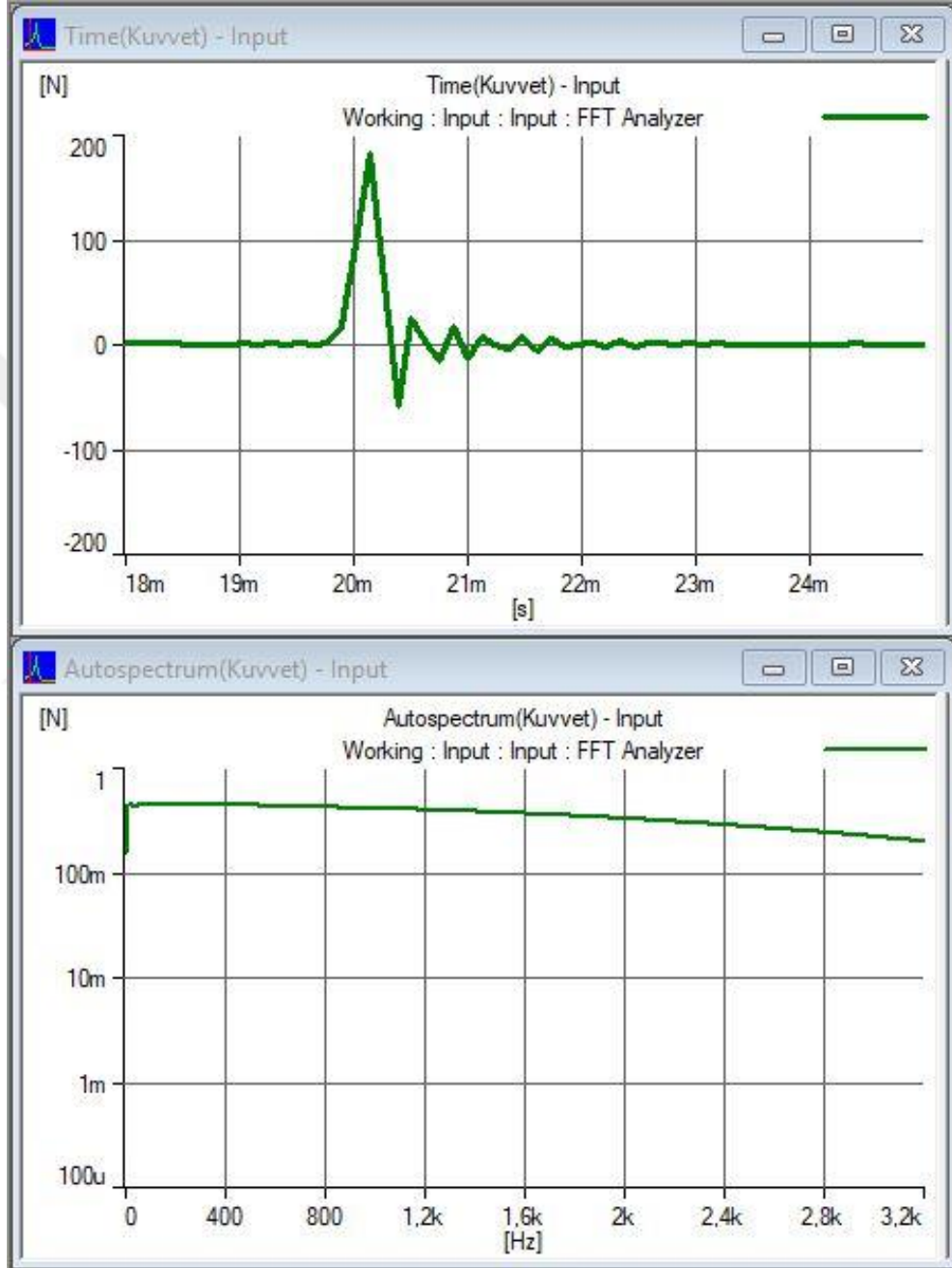
**Şekil 5.5.** Doğrusal Yataklar ve Tahrik Plakasının Sönüm Katsayısının Bulunması

Sensörden gelen değerler Pulse programında kullanılan ayarlar Şekil 5.6' da gösterildiği gibi seçilmiştir Veriler, 3.2 kHz frekans üst değeri esas alınarak örnekleme zamanı 125 ms için kayıtl edilmiştir..



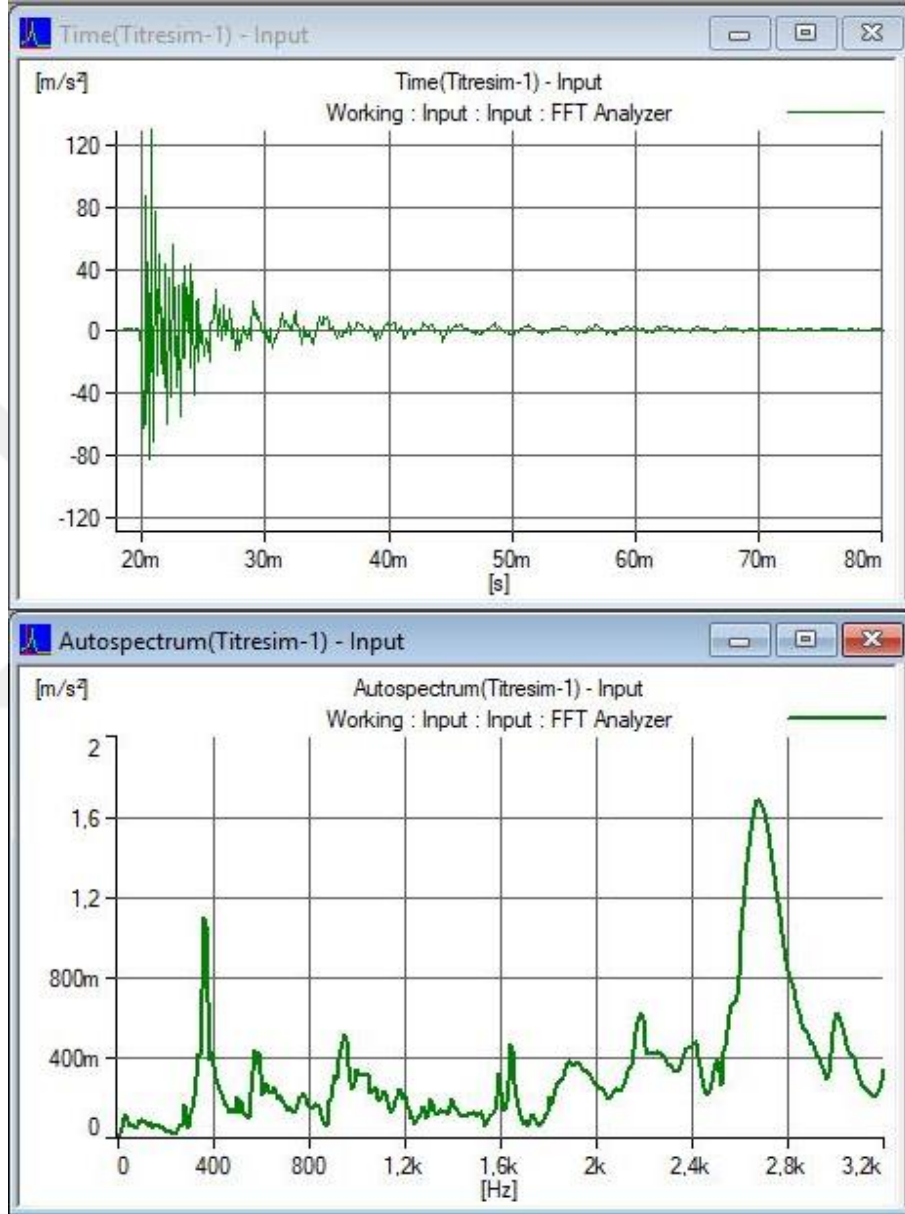
**Şekil 5.6.** Denede Kullanılan Ayarlar

Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi Titreşim testinde kullanılan zamana bağlı kuvvet analiz grafiği üstte ve frekansa bağlı kuvvet analiz grafiği altta, Şekil 5.7' de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi. Zamana Bağlı Kuvvet (üst) ve Frekansa Bağlı Kuvvet (alt) FFT Analizleri.

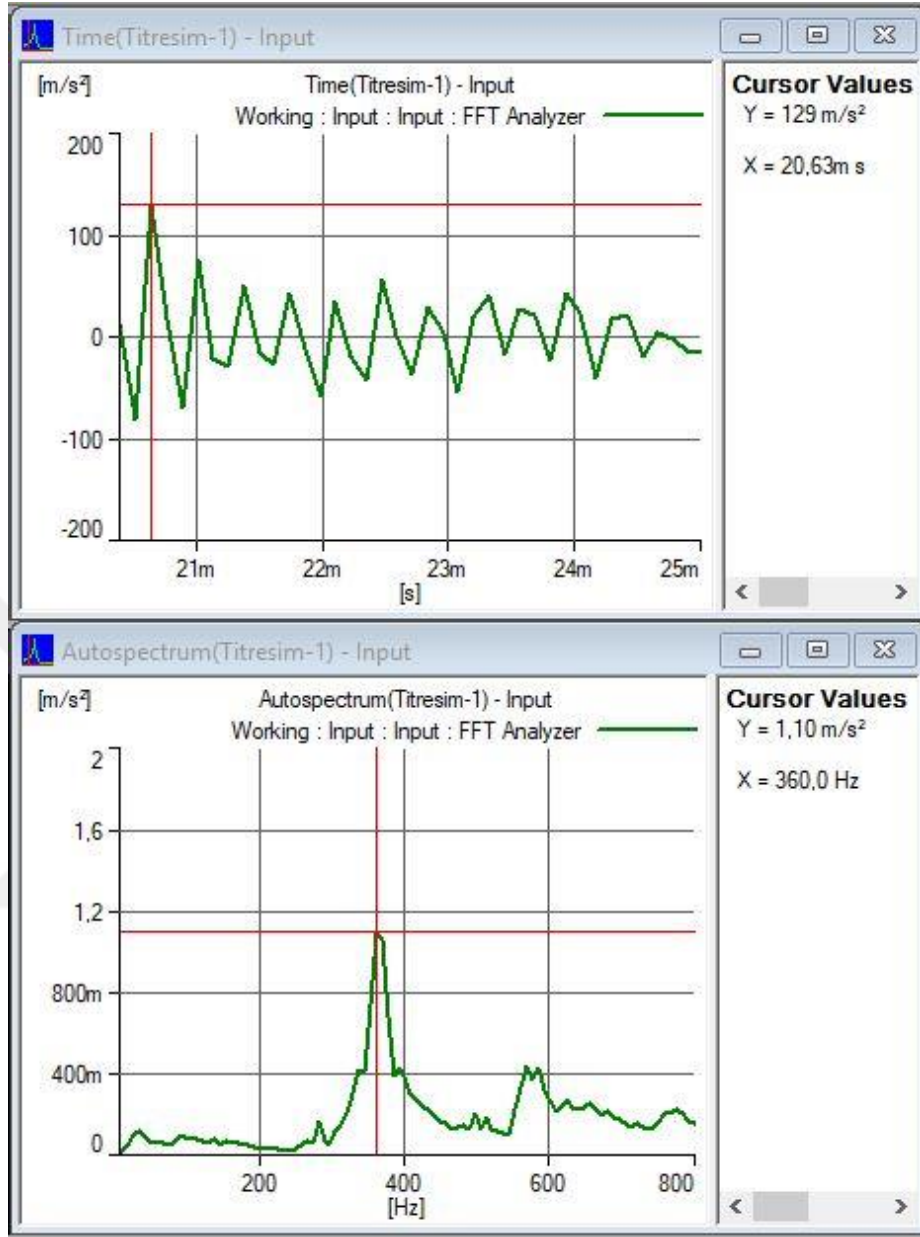
Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi Titreşim testinde kullanılan zamana bağlı titreşim analiz grafiği üstte ve frekansa bağlı titreşim analiz grafiği altta, Şekil 5.8' de gösterilmiştir.



**Şekil 5.8.** Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi Zamana Bağlı Titreşim (üst) ve Frekansa Bağlı Titreşim (alt) Grafikleri

Tahrik Plakasına Uygulanan Çekiç Deneyi Titreşim testinde kullanılan zamana bağlı titreşim analiz grafiği üstte ve frekansa bağlı titreşim analiz grafiği altta, Şekil 5.9' de gösterilmiştir.



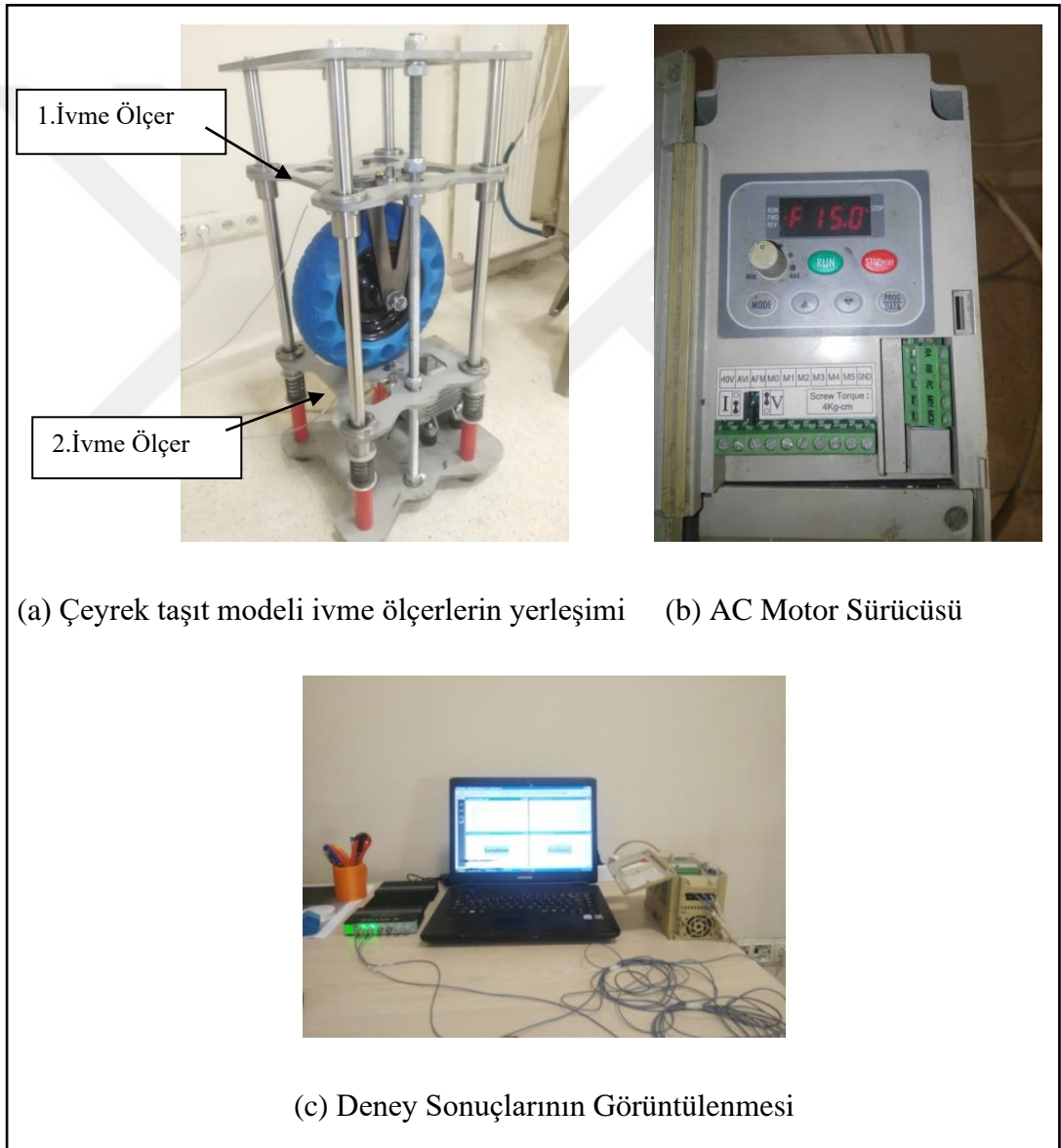


**Şekil 5.9.** Zamana (üst) ve Frekansa (alt) Bağlı Titreşim Değişimlerinin Büyük Ölçekli Gösterimi

### 5.3. Tekerin Sönüm Katsayısının Bulunması ( $b_2$ )

Eksenel titreşim oluşturucunun bağlı olduğu plaka üzerine, frekans cevabı aranan ana kütle, süspansiyon sistemi elemanları ve kaymalı yataklardan oluşan sistem yerleştirildi. Eksenel titreşim oluşturucunun üzerine büyük yükler etkimemesi için bağlı olduğu plakanın altına helezon yaylar ile destek oluşturulduktan sonra plaka ile bağlantısı yapıldı. Şekil 5.10' da görüleceği üzere eksenel titreşim üretici yardımıyla sinüs süpürmesi yöntemi ile 15 Hz frekans taranarak 2 no'lu ivmeölçerin bulunduğu

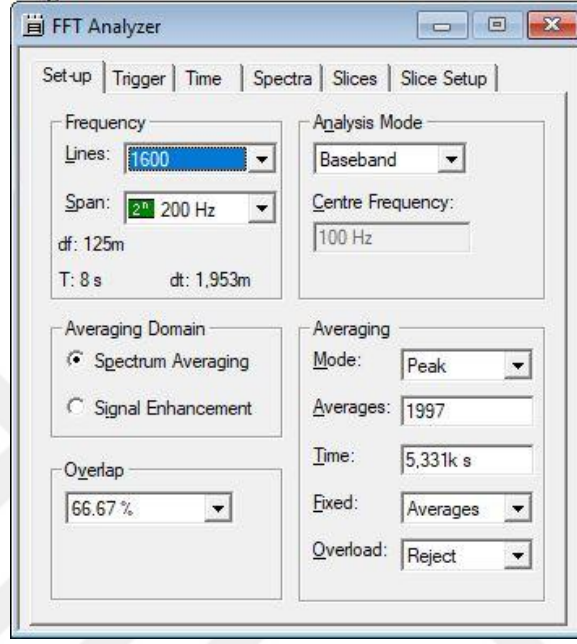
plaka ve 1 no'lu ivmeölçerin bulunduğu tek serbestlik dereceli sistemin ivme değerleri kayıt edildi. Bu ölçümlerden elde edilen veriler işlenerek frekans cevabı fonksiyonu elde edildi. Bu işlem orijinal teker hariç diğer üç tip tekerin 14 desen noktası için on dörder defa tekrarlanarak bütün frekans cevabı fonksiyonlarının ortalamasından doğrusal frekans cevabı fonksiyonu oluşturuldu. Eşit yük miktarını elde edilmesi için kaçık motor mili alt konumunda iken tekerin bağlı olduğu üst tabla sabitlendi. Dolayısıyla 2 mm olan kaçıklık ile teker harmonik zorlamaya maruz bırakıldı.



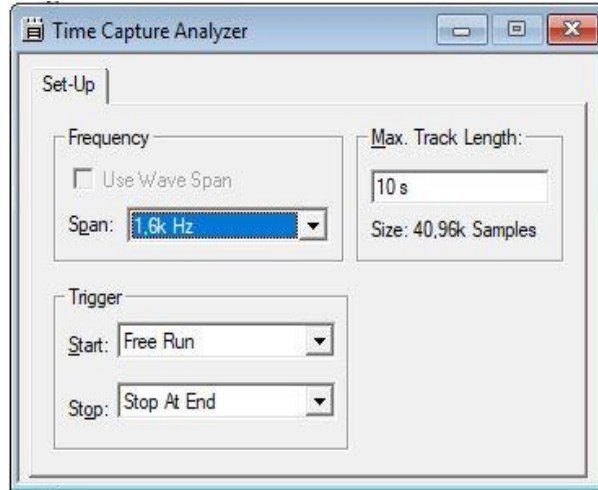
Şekil 5.10. 15 Hz de Tekrarlanan Titreşim Deneyi



Deneyde kullanılan Pulse yazılımına ait Titreşim testinde kullanılan frekans (a) ve zaman (b) analiz ayarları Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Frekans aralığı 200 Hz, 1,953 ms örnekleme zamanı, %66,67 bindirme değerleriyle 10 saniye süreli ölçümler alınmıştır.



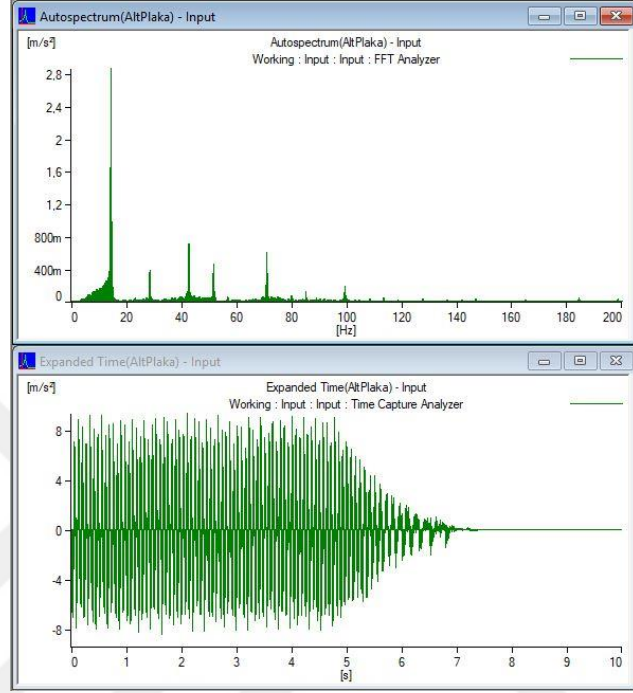
(a)



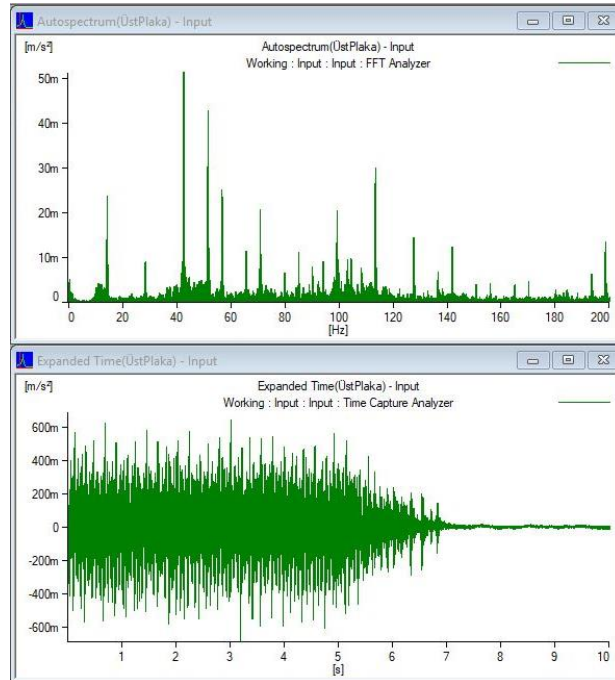
(b)

Şekil 5.11. Deneyde Kullanılan Pulse Yazılım Programına Ait Ayarlar

Orijinal tekere ait çeyrek taşıt deney modeli üzerindeki ivmeölçerler yardımıyla frekansa bağlı ivme ve zamana bağlı ivme grafikleri alt ve üst plaka için ayrı ayrı çizilerek Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’ de eklenmiştir.

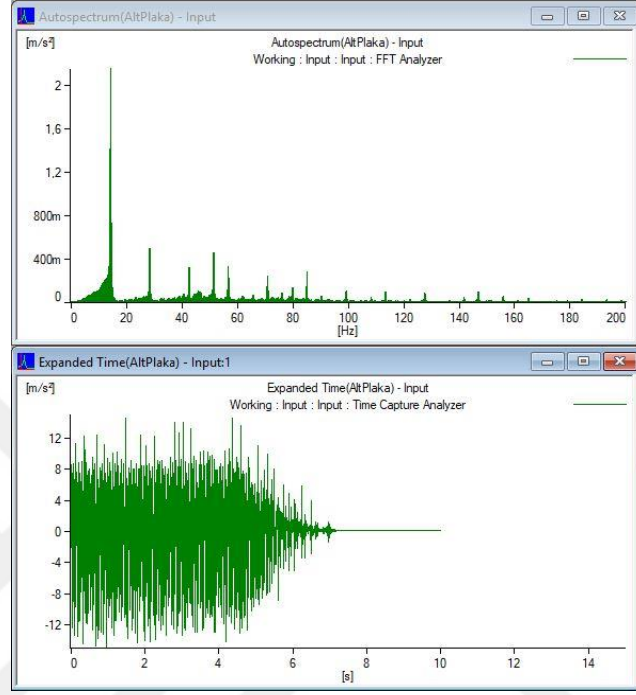


Şekil 5.12. Alt Plaka İçin Orijinal Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

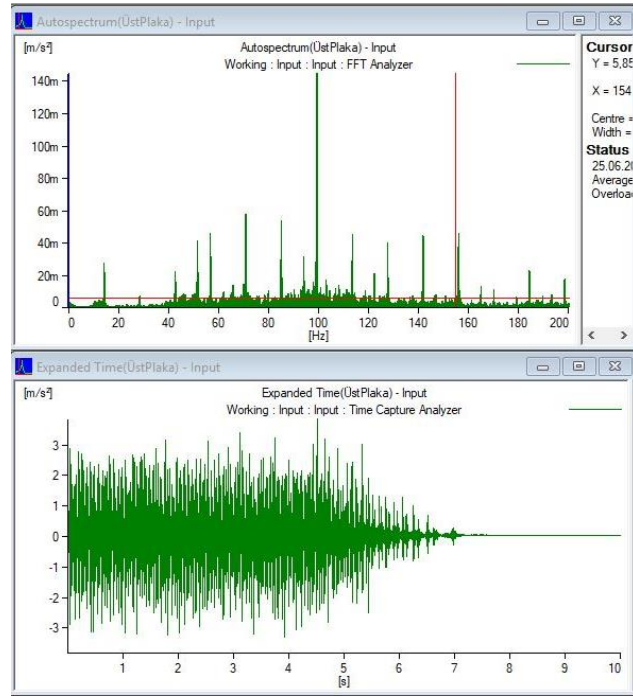


Şekil 5.13.Üst Plaka İçin Orijinal Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

Daire desenli tekere ait çeyrek taşıt deney modeli üzerindeki ivmeölçerler yardımıyla frekansa bağlı ivme ve zamana bağlı ivme grafikleri alt ve üst plaka için ayrı ayrı çizilerek Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’ de eklenmiştir.

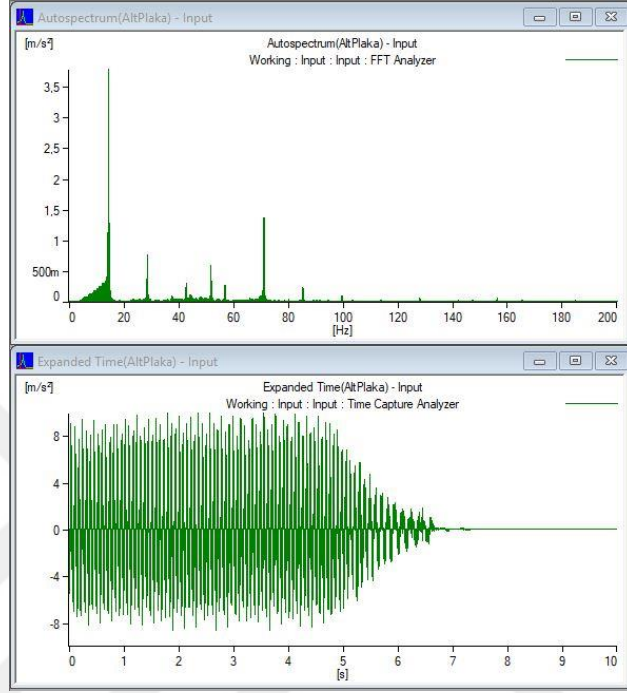


Şekil 5.14. Alt Plaka İçin Daire Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

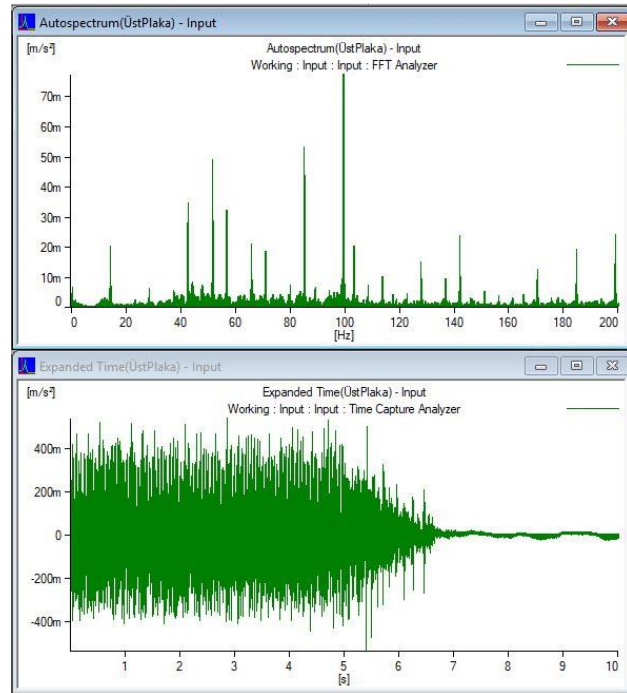


Şekil 5.15. Üst Plaka İçin Daire Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

Kare desenli tekere ait çeyrek taşıt deney modeli üzerindeki ivmeölçerler yardımıyla frekansa bağlı ivme ve zamana bağlı ivme grafikleri alt ve üst plaka için ayrı ayrı çizilerek Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ de eklenmiştir.

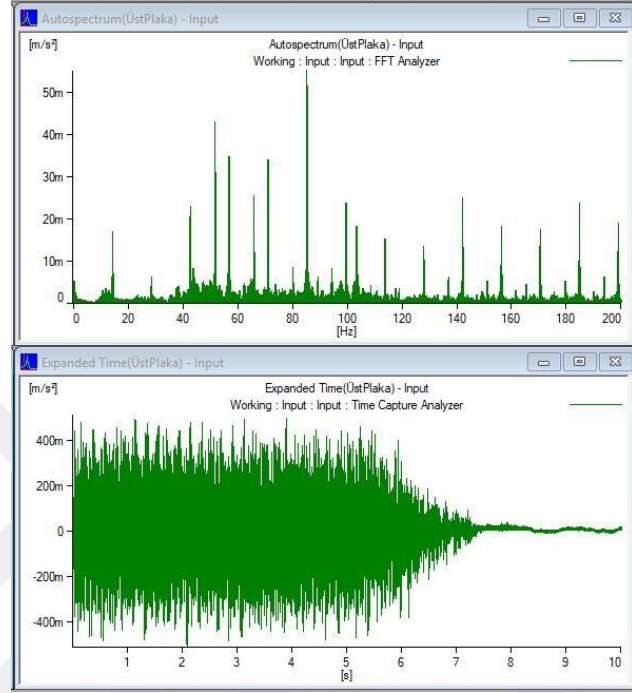


Şekil 5.16. Alt Plaka İçin Kare Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

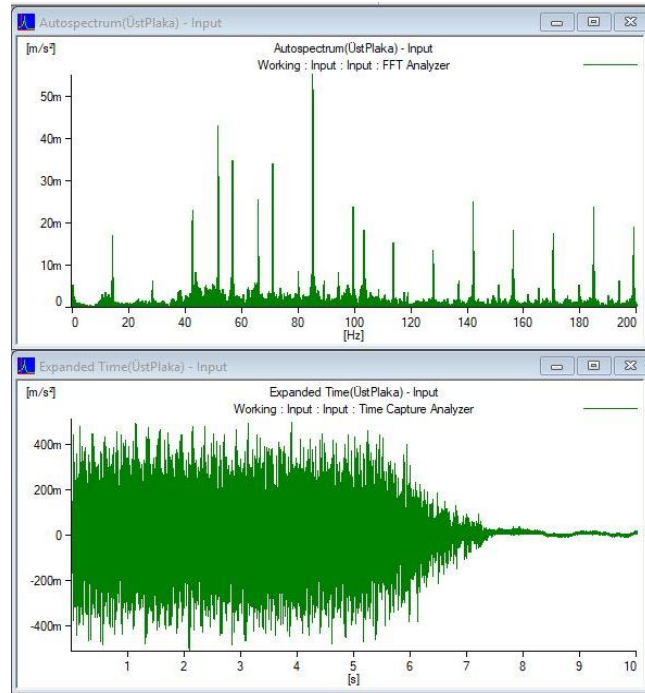


Şekil 5.17. Üst Plaka İçin Kare Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

Beşgen desenli tekere ait çeyrek taşıt deney modeli üzerindeki ivmeölçerler yardımıyla frekansa bağlı ivme ve zamana bağlı ivme grafikleri alt ve üst plaka için ayrı ayrı çizilerek Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’ de eklenmiştir.

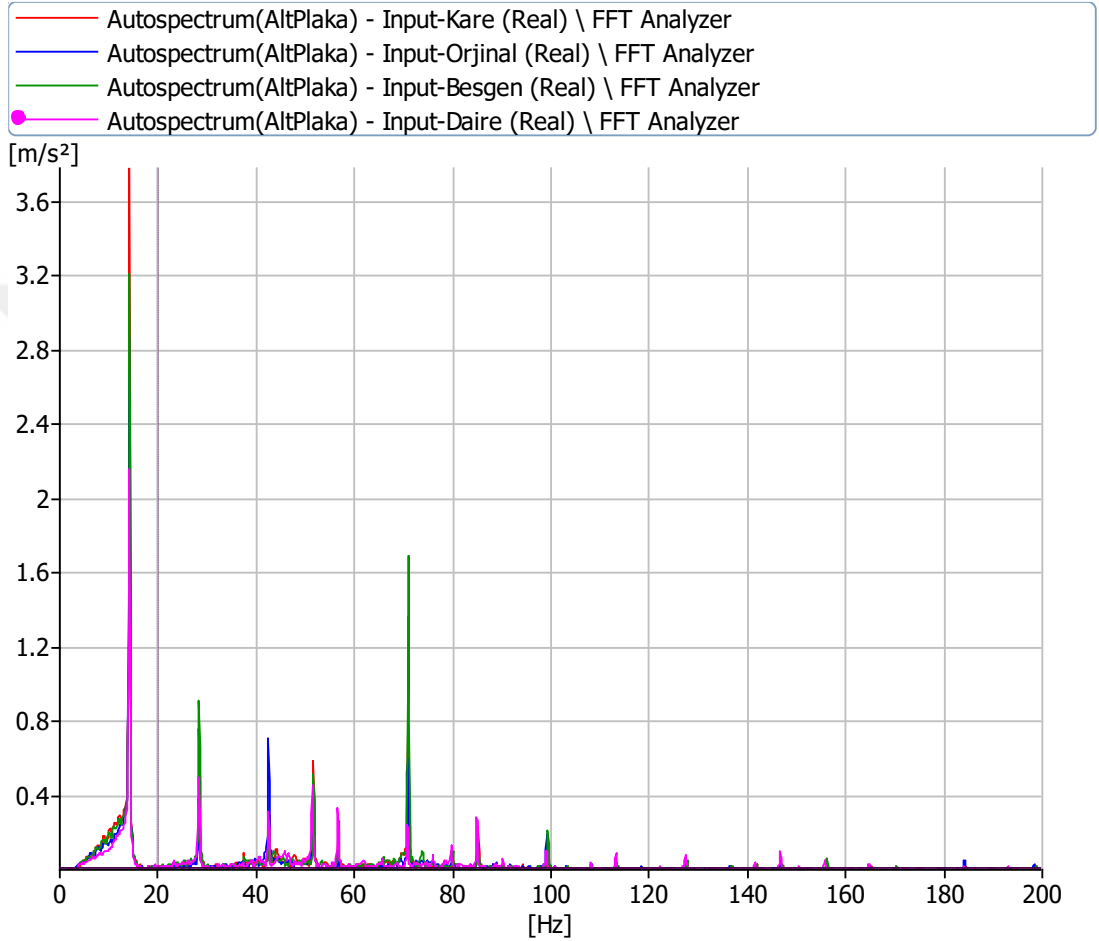


Şekil 5.18. Alt Plaka İçin Beşgen Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.



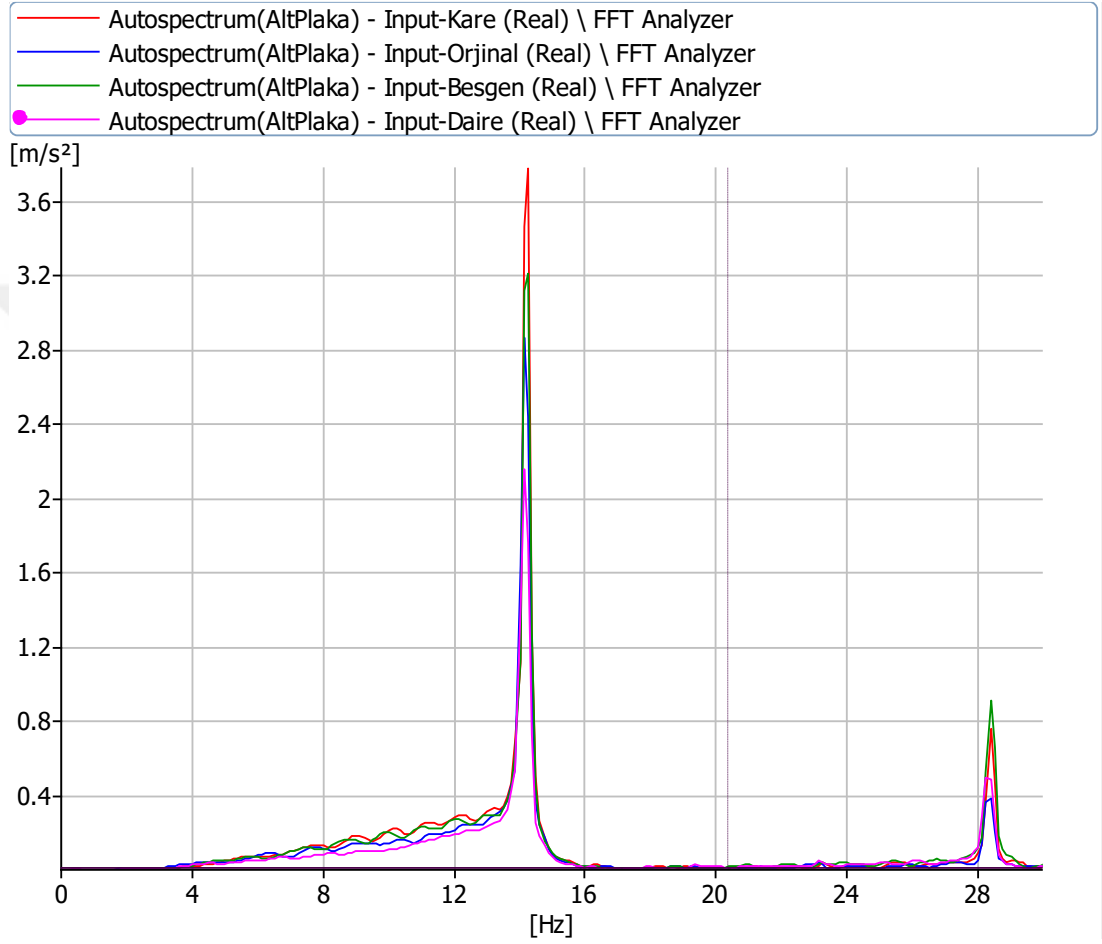
Şekil 5.19. Üst Plaka İçin Beşgen Tekere Ait Frekans (üst) ve Zaman (alt) Grafikleri.

Alt plakaya ait orjinal, kare, daire ve beşgen desenli tekerler AC motor sürücü harmonik zorlama 0 – 200 Hz aralığında titreşim grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.20’ de gösterilen kırmızı kare, mavi orjinal, yeşil beşgen, pembe daire desenli teker veri renklerini temsil etmektedir.



**Şekil 5.20.** Orjinal, Kare, Beşgen ve Dairesel Desenli Tekerlerin 0 – 200 Hz Aralığında Titreşim Grafikleri

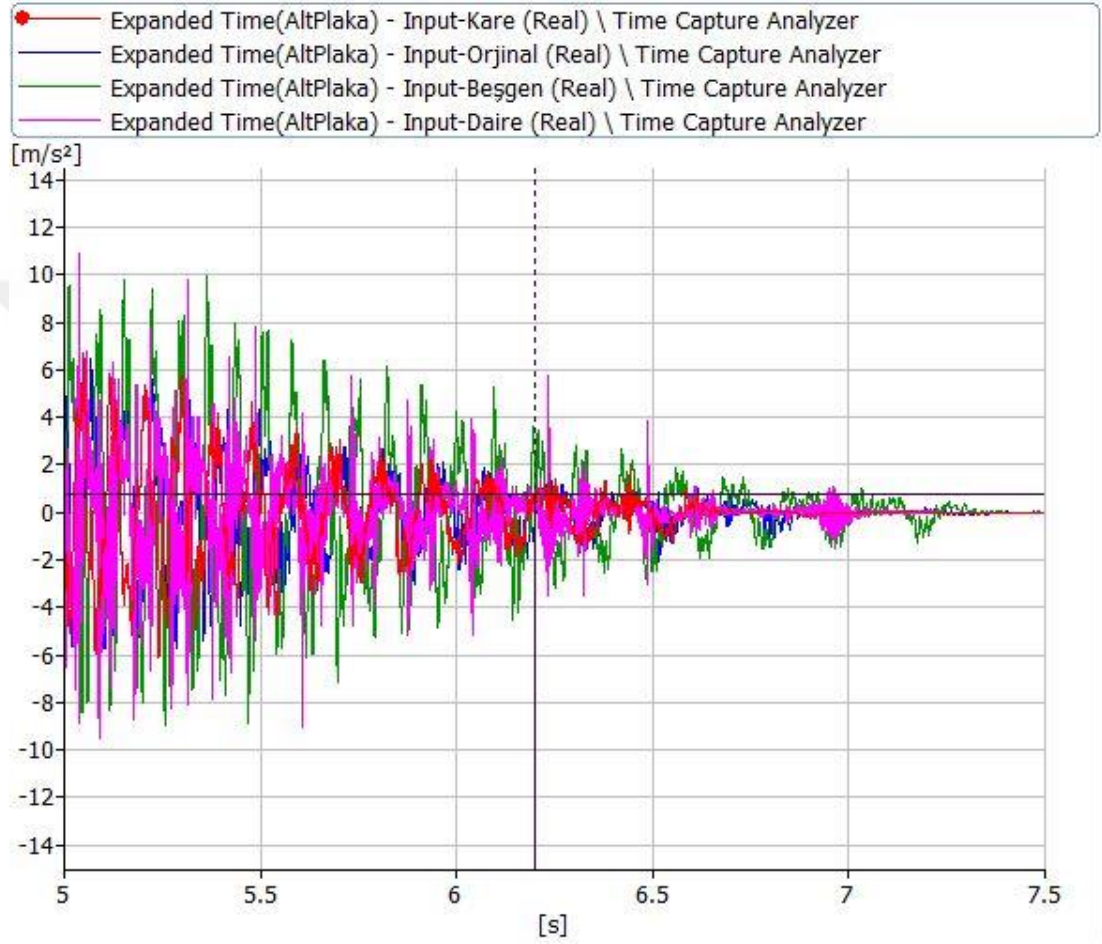
Alt plakaya ait orjinal, kare, daire ve beşgen desenli tekerler AC motor sürücü harmonik zorlama 0 – 30 Hz aralığında titreşim grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.21’ de gösterilen kırmızı kare, mavi orjinal, yeşil beşgen, pembe daire desenli teker veri renklerini temsil etmektedir.



**Şekil 5.21.** Orjinal, Kare, Beşgen ve Dairesel Desenli Tekerlerin 0 – 30 Hz Aralığında Titreşim Grafikleri



Alt plakaya ait orjinal, kare, daire ve beşgen desenli tekerler AC motor sürücü harmonik zorlama sonrasında 5 – 7,5 s aralığında titreşim grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.22’ de gösterilen kırmızı kare, mavi orjinal, yeşil beşgen, pembe daire desenli teker veri renklerini temsil etmektedir.



Şekil 5.22. Orjinal, Kare, Beşgen ve Dairesel Desenli Tekerlerin Sönüm Grafikleri



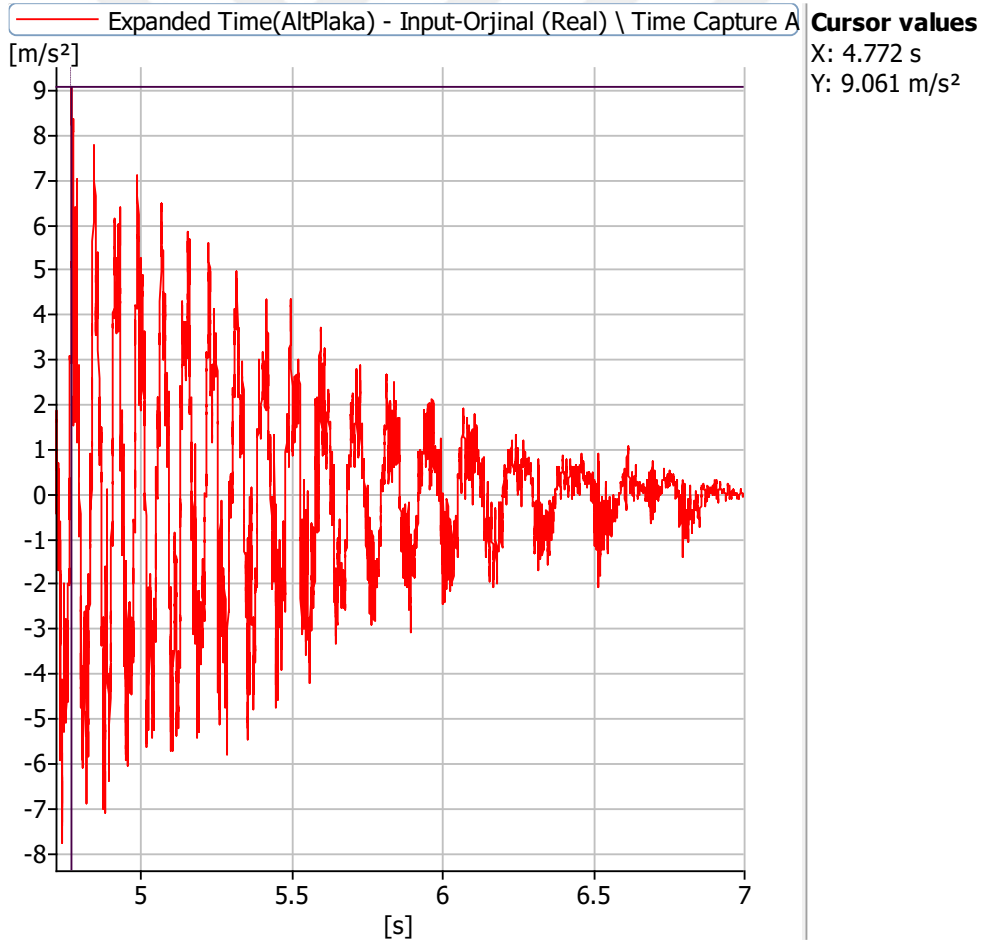
$$\ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right) = 2\pi/\zeta\sqrt{1-\zeta^2} = \delta \quad (5.3)$$

$\delta$  logaritmik azalma olarak isimlendirilir. Buradan sönüm sabiti,

$$b = 2\zeta\sqrt{k.m} \quad (5.4)$$

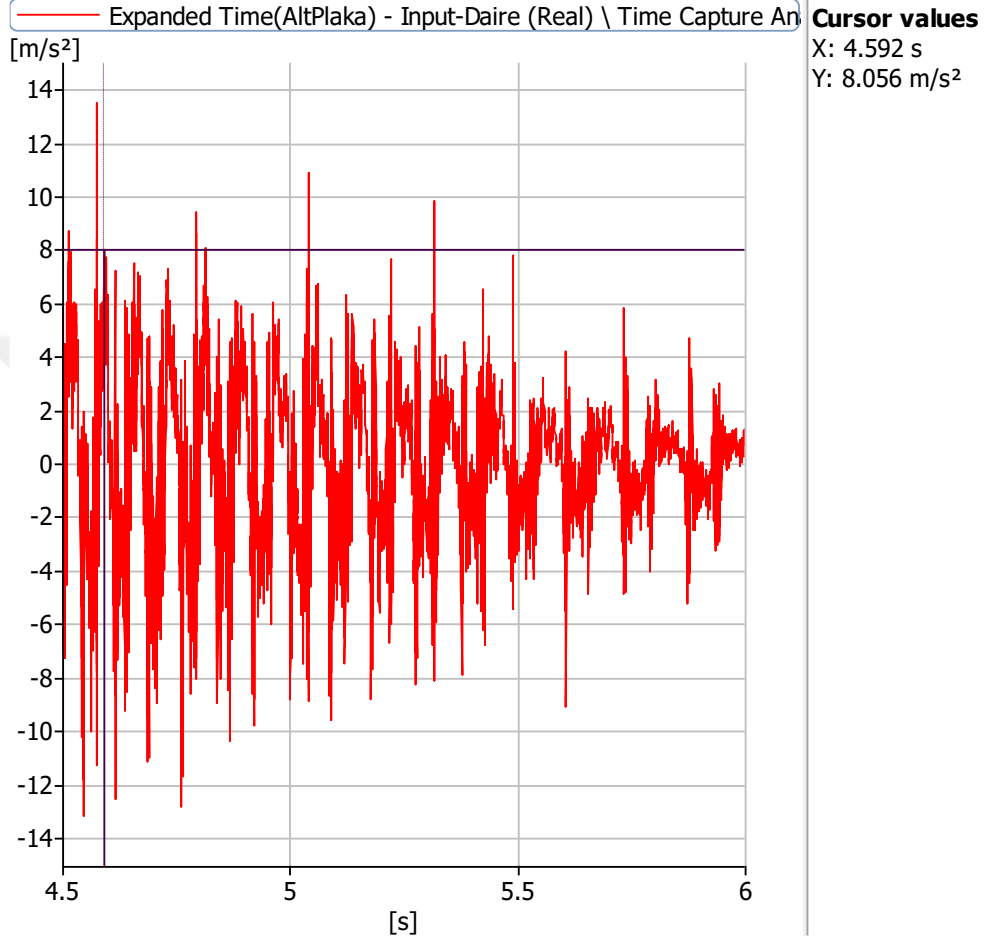
olarak elde edilir.

Alt plakaya ait Şekil 5.23' de gösterilen kırmızı renkli çizgiler orjinal tekere, AC motor sürücü harmonik zorlama sonrasına 5 – 7 s aralığında ivme genliklerini zamanla sönümlemesini temsil etmektedir.



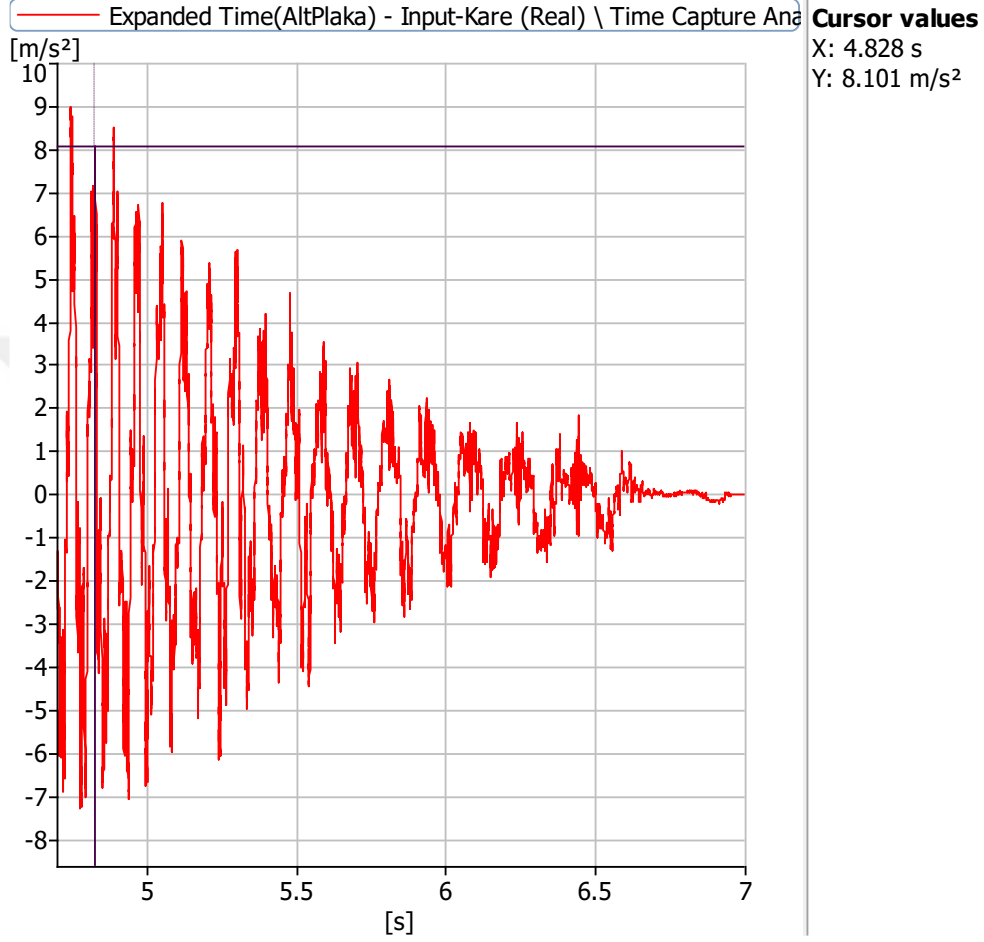
**Şekil 5.23.** Alt Plakaya Ait Orjinal Tekerde İvme Genliklerini Zamanla Sönümlemesi.

Alt plakaya ait Şekil 4.24' de gösterilen kırmızı renkli çizgiler daire desenli tekere, AC motor sürücü harmonik zorlama sonrasında 5 – 7 s aralığında ivme genliklerini zamanla sönümlemesini temsil etmektedir.



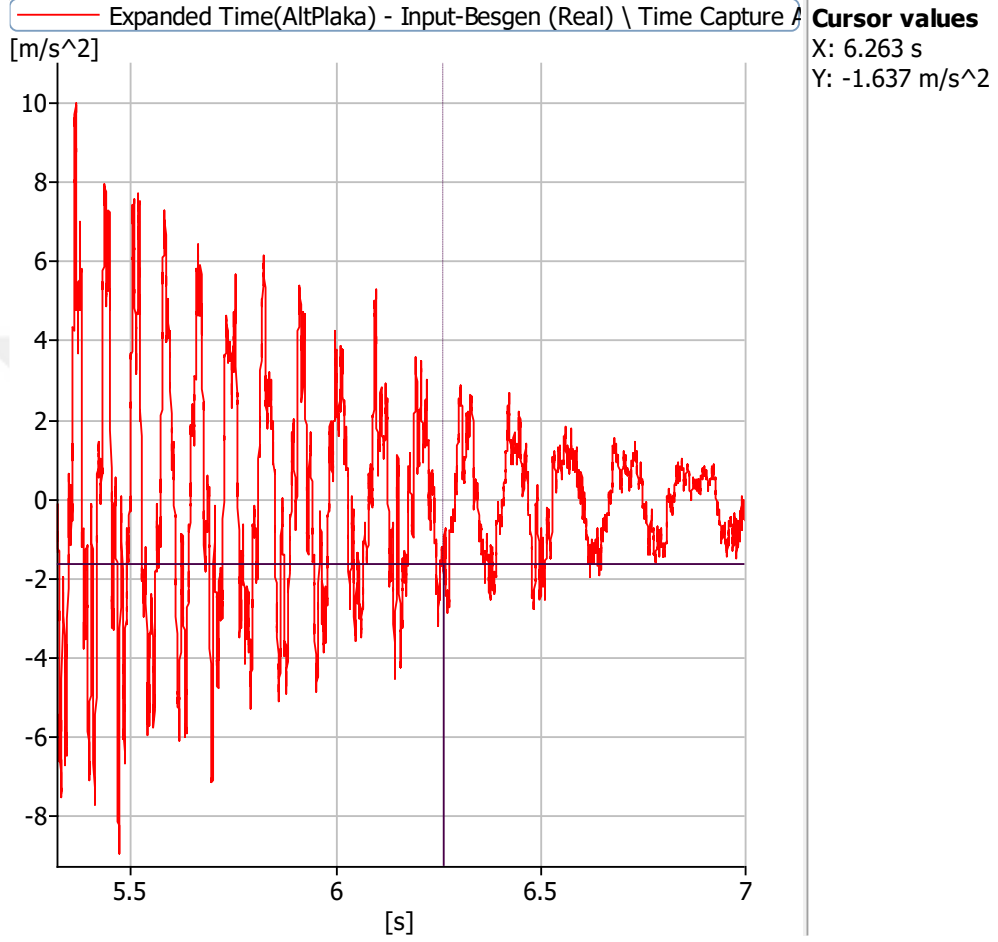
**Şekil 5.24.** Alt Plakaya Ait Daire Tekerde İvme Genliklerinin Zamanla Sönümlenmesi.

Alt plakaya ait Şekil 5.25’ de gösterilen kırmızı renkli çizgiler kare desenli tekere, AC motor sürücü harmonik zorlama sonrasında 5 – 7 s aralığında ivme genliklerini zamanla sönümlemesini temsil etmektedir.



Şekil 5.25. Alt Plakaya Ait Kare Tekerde İvme Genliklerinin Zamanla Sönümlenmesi

Alt plakaya ait Şekil 5.26’ da gösterilen kırmızı renkli çizgiler beşgen desenli tekere, AC motor sürücü harmonik zorlama sonrasında 5 – 7 s aralığında ivme genliklerini zamanla sönümlemesini temsil etmektedir.



Şekil 5.26. Alt Plakaya Ait Beşgen Tekerde İvme Genliklerinin Zamanla Sönümlenmesi

## 6. HAVASIZ TEKERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODAL ANALİZİ

Çok karmaşık geometrilere sahip cisimlerin doğal frekans ve doğal frekanslarına karşılık gelen mod şekillerinin hesaplanması teorik olarak çok mümkün olmadığından dolayı sonlu elemanlar yöntemi doğal frekansların ve bunlara karşılık gelen mod şekillerinin belirlenmesi noktasında geniş kapsamlı olarak kullanılmaktadır [33-38]. Üzerinde çalışılan ve çeşitli geometrilere sahip cisimlerin doğal frekanslarını belirlemek ve bu cisimlerin kullanıldığı uygulama alanları noktasında rezonans olgusundan uzak durabilmek güvenli tasarım açısından çok büyük önem arz etmektedir [39-40]. Bunların yanında titreşim ve gürültünün azaltılması yada asgari seviyeye düşürülmesi noktasında çok önemli bilgiler sağlamaktadır [41, 42]. Günümüzde kullanılan mühendislik modelleme programları doğal frekans ve mod şekillerinin belirlenmesi noktasında değişik hesaplama yöntemlerine sahip modal analiz yöntemleri kullanılmaktadır [43-48]. Bu kullanılan modal analiz yöntemleri içerisinde karşımıza Lancsoz, Subspace(Alt Uzak) ve Power Dynamics (Güç Dinamiği) olarak bilinen 3 tane değişik yöntem en fazla kullanılan yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [44-48]. Doğal frekans ve mod şekli gibi modal karakteristiklerinin belirlenmesi noktasında kullanılan bu 3 yöntem içerisinde de Lancsoz yöntemi sahip olduğu daha hızlı hesaplama ve yakınsama hızlarının yanında modal karakteristiklerinin hesaplanması noktasında daha yüksek oranlarda doğruluk sağladığı için diğer yöntemlere kıyasla araştırmacılar tarafından daha fazla kullanılmaktadır [49-53]. Modal karakteristikleri belirleme noktasında Lancsoz yöntemi 3 tane değişik yinelemeli matematiksel formül kullanılmaktadır[54-56]. Bu yinelemeli matematiksel formüller sırasıyla ortonormal özvektör oluşturulması, özgün simetrik matris' in üçgensel matris' e dönüştürülmesi ve üçgensel matris' in çözümlenmesi sonucunda da özgün vektör ve değerlerin elde edilmesi işlevlerini görmektedir [57, 58]. Lancsoz yöntemi tarafından kullanılan bu yinelemeli matematiksel formüller aşağıda kapsamlı bir şekilde adım adım gösterilmiştir.

Titreşim teorisine göre “n” sayıda serbestlik derecesine sahip elastik bir sistemin fiziksel koordinatlara bağlı olarak hareket denklemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir [59].

$$F(t) = M\ddot{X} + C\dot{X} + KX \quad (6.1)$$

Burada, M kütle matrisi, C sönüm matrisi, K direngenlik matrislerini ifade ederken,  $X, \dot{X}$  ve  $\ddot{X}$  sırasıyla yer değiştirme, hız ve ivme sütun vektörlerini temsil etmektedir.  $F(t)$  ise uyarma kuvveti sütun vektörünü ifade etmektedir.

Serbest titreşim analiz bağlamında sönümlemenin çok düşük yada göz ardı edilebilecek seviyede olduğunu ve dışarıdan bir uyarma kuvveti uygulanmadığını varsaydığı noktada yukarıdaki denklem (6.1) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (6.2)$$

Yukarıda gösterilen denklem (6.1) ve denklem (6.2) fiziksel koordinatlarda tanımlanmıştır ve bu koordinatlar birbirleri ile birleşiktir. Modal karakteristikleri belirlemek için bu koordinatlar birbirlerinden ayrıştırılmalı ve modal koordinatlarda tanımlanmalıdır. Denklem (6.2) modal koordinatlarda tanımlandığı zaman aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(K - W_i^2 M)\varphi_i = 0 \quad (6.3)$$

Burada,  $W$  sistemin doğal frekanslarını ifade ederken  $\varphi$  sistemin ana titreşim vektörlerini ifade etmektedir ve  $i=1,2,\dots,n$  serbestlik derecelerini göstermektedir.

Yukarıda denklem (6.3)' de gösterilen  $\varphi_i$  ve  $W_i$ ' nin çözümlenmesi modal karakteristiklerin belirlenebilmesi noktasında modal analizin esas ve temel hedefidir. Daha öncede ifade edildiği gibi Lancsoz modal analiz yöntemi 3 değişik yinelemeli matematiksel formül kullanmaktadır ve bu matematiksel formüller  $\varphi_i$  ve  $W_i$ ' nin çözümü ve elde edilmesi noktasında kullanılmaktadır. Bu bilinmeyenlerin elde edilmesi noktasında Lancsoz modal analiz yöntemini izlediği yollar aşağıda adım adım gösterilmiştir.

Denklem (6.2) aynı zamanda aşağıdaki formda gösterildiği gibi yazılabilir.

$$K\Phi = W^2 M\Phi \quad (6.4)$$

$\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_n\}$  Burada olarak tanımlanmaktadır.

Denklem (6.4) genelleştirilmiş özdeğer problem denklemini gösterilmektedir. Burada  $K$  daha öncede ifade edildiği gibi direngenlik sütun matrisidir ve bu matris gerçek pozitif değerler içeren simetrik bir matristir ve bu matris karekök yöntemi kullanılarak Cholesky ayrıştırma yöntemi aracılığı ile çözümlenebilir ve denklem (6.4) bu bağlamda aşağıdaki gibi ifade edilebilir [61-63].

$$AY = \mu Y \quad (6.5)$$

Burada  $K = LL^T$ ,  $\mu = 1/\omega^2$ ,  $A = L^{-1}ML^{-T}$  ve  $Y = L^T\Phi$  olarak ifade edilebilir.

Ayrıca burada  $L$  alt üçgen matrisidir.

Çok serbestlik dereceli sistemler için burada kütle matrisi ( $M$ ) yarı tanımlı bir matristir. Bu yarı tanımlı matrisi tam tanımlı pozitif matris haline getirebilmek için yer değiştirme yöntemi kullanılır. Yer değiştirme yöntemi kullanıldıktan sonra Cholesky ayrıştırma yöntemi kullanılarak  $K$  ve  $\mu$  aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$K + \rho M = LL^T \quad (6.6)$$

$$\mu = 1 / (w^2 + \alpha) \quad (6.7)$$

Burada  $\rho$  ( $\rho > 0$ ) olarak tanımlanan bir sabittir.

Denklem (6.5)'de gösterilen  $A$  matrisi denklem (6.8) kullanılarak üçgen matrise dönüştürülebilir. Bu dönüştürme işleminde ilk Lancsoz yinelemeli vektör ( $V_i$ ),  $V_i^T V_i = I$  şartını sağlamak zorundadır. Burada  $I$  birim matrisidir [47].

$$V^T AVQ = \mu V^T VQ \quad (6.8)$$

Burada  $VQ = Y$  ve

$$V^T = V^{-1} \quad (6.9)$$

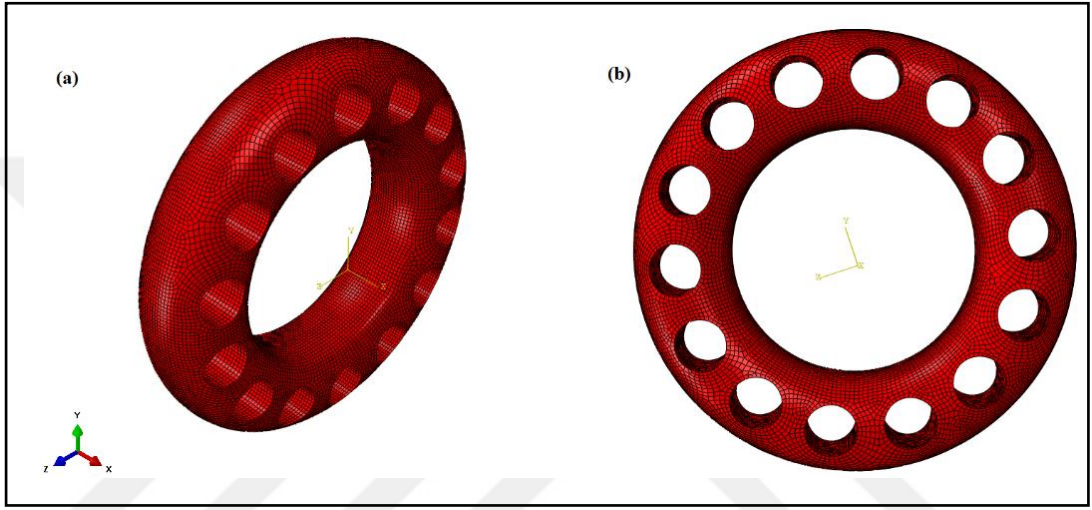
$V^T AV = T$  üç köşegen matristir ve  $V^T AV$  aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.





## 6.1 Sonlu Elemanlar Modeli

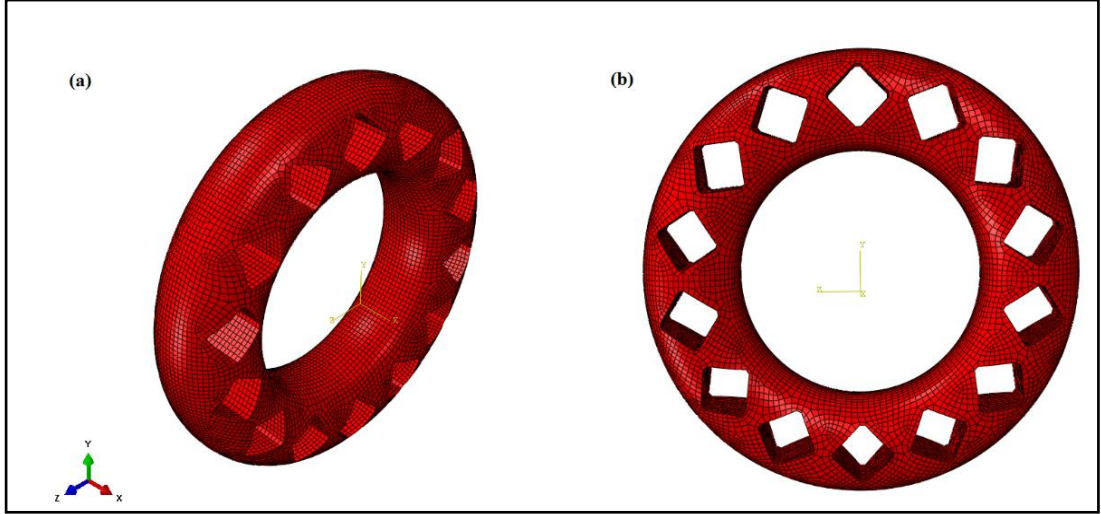
Şekil 6.1’ de dairesel delikli tekerin sonlu elemanlara ayrılmış sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Dairesel delikli tekerin katı modeli Solidworks çizim programında hazırlanmış ve elemanlara ayırabilmek için Hypermesh olarak adlandırılan programa aktarılmış ve bu programda Şekil 6.1’ de gösterildiği gibi sonlu elemanlara ayrılmıştır.



**Şekil 6.1.** Dairesel Delikli Tekerin Sonlu Elemanlar Modeli, İzometrik Görünüş (a), Ön Görünüş (b)

Dairesel delikli tekerin modal analizinde 670537 sonlu eleman ve 136216 düğüm kullanılmıştır. Eleman tipi olarak ta Abaqus/Standard 3D programında kullanılan element tiplerinden biri olan C3D8R element tipi kullanılmıştır [32]. Bu element tipi sürekli 3 boyutlu azaltılmış entegrasyon element tipi olarak bilinmektedir. Simülasyonlarda çok sayıda element (670537) kullanıldığından dolayı bu kullanılan element tipi hesaplama zamanının azaltılması noktasında bizlere yardımcı olmuştur. Dairesel tekerin nümerik modal analizlerinde hiçbir sönümleme katsayısı kullanılmamıştır ve serbest titreşim analizi yapıldığından dolayıda hiçbir sınır koşulu tanımlanmamıştır.

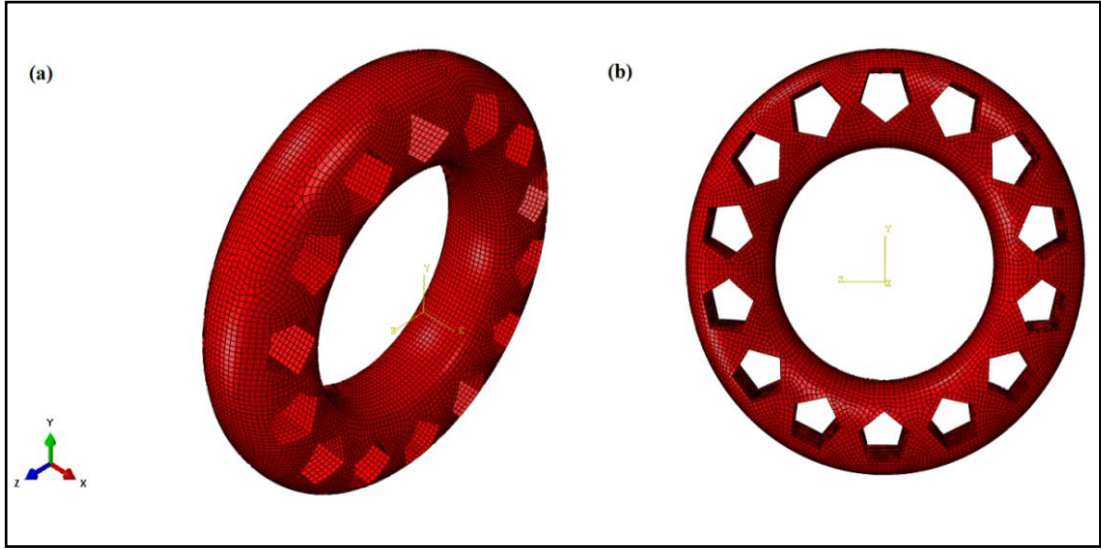
Dairesel tekerin sonlu elemanlar modal analizinde olduğu gibi kare delikli tekerin katı modeli Solidworks programında hazırlanmış ve sonlu elemanlara ayırabilmek için Hypermesh programına aktarılmış ve bu programda sonlu elemanlara ayrılmıştır. Şekil 6.2’de kare delikli tekerin sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir.



**Şekil 6.2.** Kare Delikli Tekerin Sonlu Elemanlar Modeli, İzometrik Görünüş (a), Ön Görünüş (b)

Kare delikli tekerin sonlu elemanlar modal analizlerinde 373878 sonlu eleman ve 77580 düğüm noktası kullanılmıştır. Dairesel delikli tekerde olduğu gibi C3D8R element tipi kullanılmıştır. Hiçbir sınır koşulu ve sönümlenme katsayısı kare delikli tekerin sonlu elemanlar modal analizlerinde göz önünde bulundurulmamıştır.

Daha önceki dairesel ve kare delikli tekerlerin sonlu elemanlar modellerinde izlenen aynı yol beşgen delikli tekerin sonlu elemanlar modelinde de izlenmiştir. Katı model SolidWorks programında hazırlandıktan sonra Hypermesh programına aktarılmış ve burada katı model sonlu elemanlara ayrılmıştır. Şekil 6.3' de beşgen delikli tekerin sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Element tipi olarak C3D8R seçilmiş ve simülasyonlarda 399299 sonlu eleman ve 82598 düğüm noktası kullanılmıştır. Daha önceki modellerde olduğu gibi hiçbir sınır koşulu ve sönümlenme katsayısı sonlu elemanlar modal analizlerine dahil edilmemiştir.

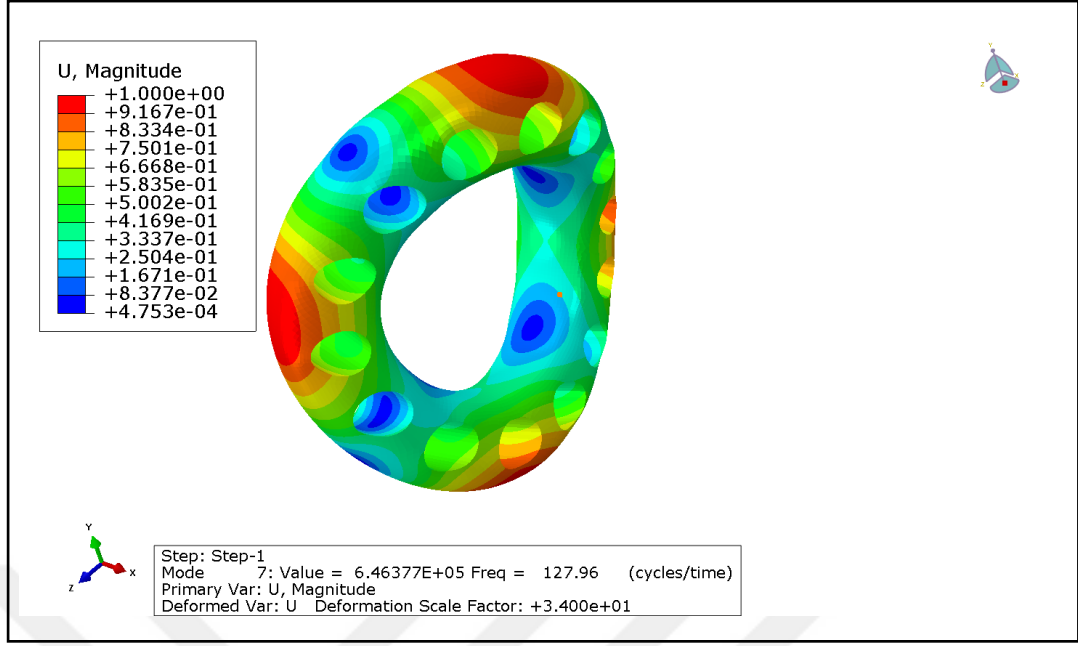


**Şekil 6.3.** Beşgen Delikli Tekerin Sonlu Elemanlar Modeli, İzometrik Görünüş (a), Ön Görünüş (b)

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de sırasıyla dairesel, kare ve beşgen delikli tekerlerin sonlu elemanlar modelleri sırasıyla gösterilmiştir. Abaqus/Standard 3D programında Lancsoz modal analiz yöntemi kullanılarak bu modellerin ilk 3 doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri nümerik olarak elde edilmiş ve çıkan sonuçlar doğal frekans ve mod şekilleri noktasında birbirleri ile kıyaslanmıştır.

## 6.2 Sonlu Elemanlar Modal Analiz Bulguları

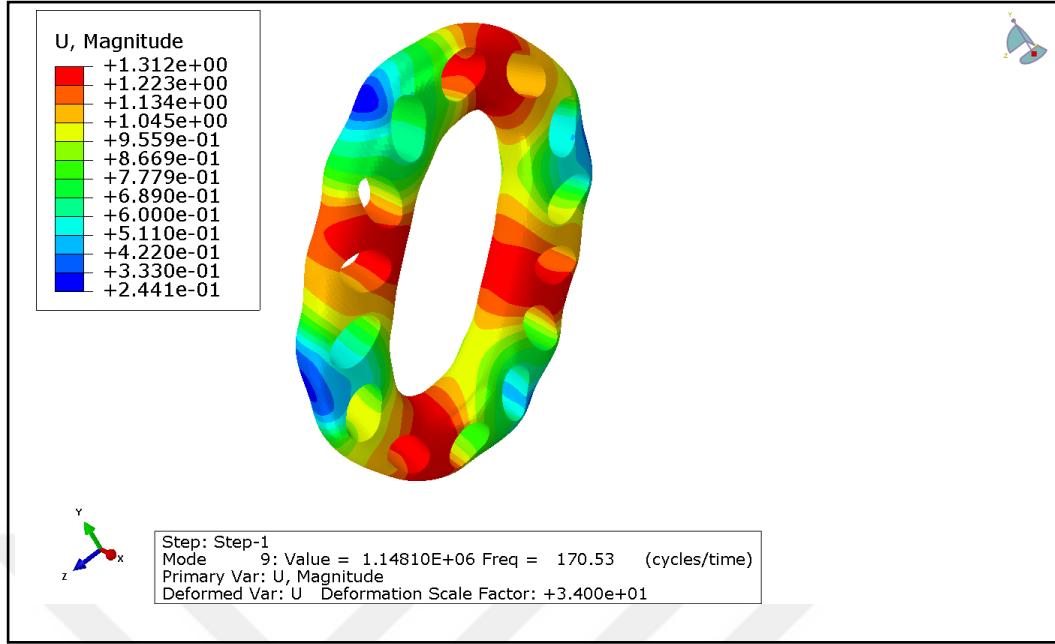
Şekil 6.4’ de dairesel delikli tekerin ilk doğal frekansı ve buna karşılık gelen mod şekli gösterilmiştir. Dairesel delikli teker için birinci doğal frekans 127.96 Hz olarak elde edilmiştir.



**Şekil 6.4.** Dairesel Delikli Tekerin İlk Mod Şekli ve Doğal Frekansı

Mod şekli grafikte U (Magnitude) ile gösterilen ortaya çıkan yer değiştirme bağlamında ele alınmıştır. Kırmızı renkler maksimum yer değiştirmenin olduğu bölgeleri gösterirken mavi renk en az yer değiştirmenin olduğu alanları göstermektedir. Şekil 6.4' den de anlaşılacağı gibi maksimum yer değiştirme 1 mm olarak hesaplanırken minimum yer değiştirme 0.0004753 mm olarak elde edilmiştir. 4 ayrı bölgede maksimum ve yine 4 ayrı bölgede minimum yer değiştirme gözlemlenmiştir ve bu bölgeler ve mod şekli noktasında tam bir simetriklik söz konusudur.

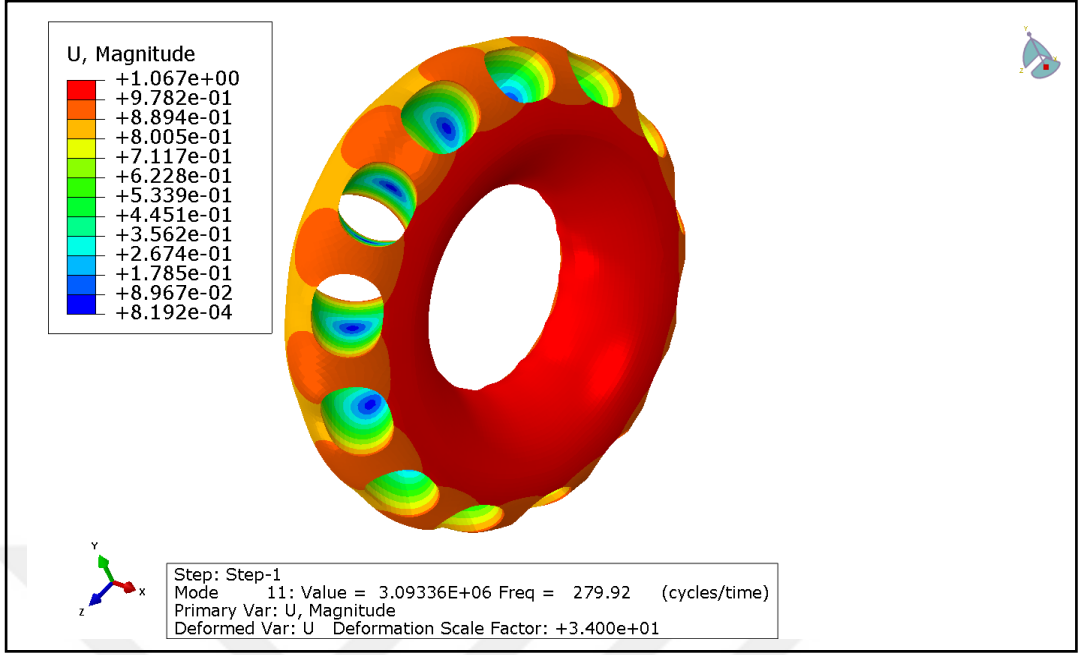
Şekil 6.5' de dairesel delikli tekerin ikinci mod şekli ve buna karşılık gelen ikinci doğal frekansı gösterilmiştir. İkinci doğal frekans 170.53 Hz olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 6.5.** Dairesel Delikli Tekerin İkinci Mod Şekli ve Doğal Frekansı

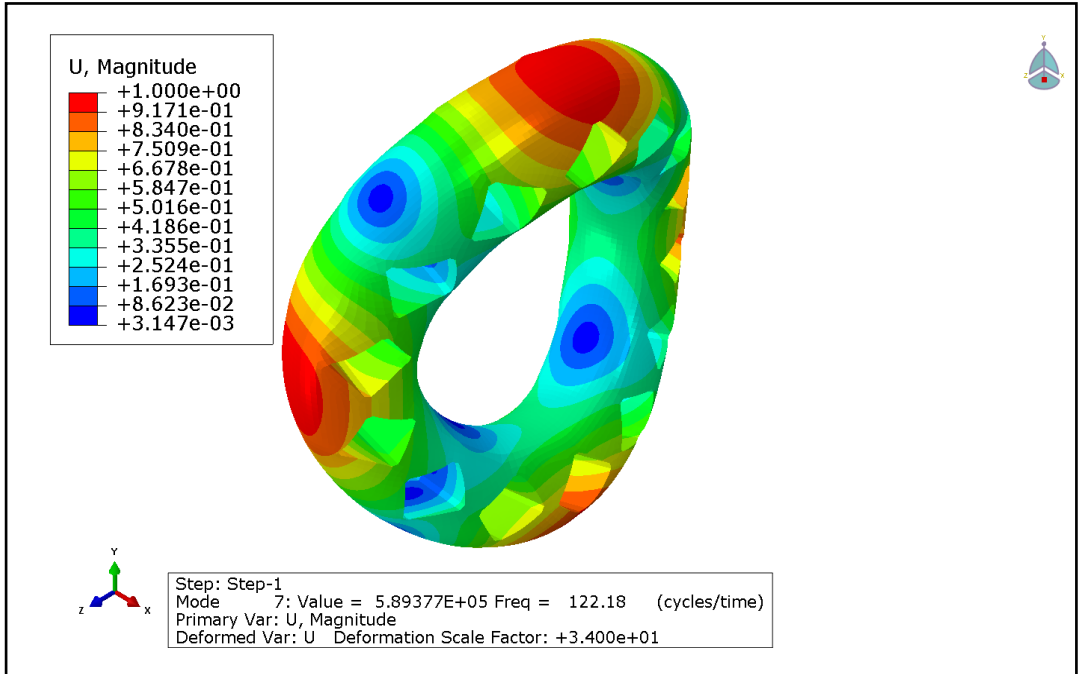
İkinci mod şekli ortaya çıkan yer değiştirme (U-magnitude) bağlamında ele alındığında maksimum yer değiştirme 1.312 mm olarak hesaplanırken minimum yer değiştirme 0.244 mm olarak belirlenmiştir. Birinci mod şeklinde olduğu gibi dairesel delikli tekerin ikinci mod şeklinde de kırmızı renk ile gösterilen maksimum yer değiştirmenin ve mavi renk ile temsil edilen minimum yer değiştirmenin olduğu 4 ayrı bölge gözlemlenmiştir. İkinci mod şekli birincide de olduğu gibi tam bir simetriklik arz etmektedir.

Şekil 6.6' da dairesel delikli tekerin üçüncü mod şekli ve üçüncü doğal frekansı gösterilmiştir. Üçüncü doğal frekans dairesel delikli teker için 279.92 Hz olarak kullanılan Abaqus/Standard 3D programı tarafından hesaplanmıştır. Diğer iki mod şeklinden farklı olarak burada maksimum yer değiştirmenin ayrı bölgeler halinde değil süreklilik arz eden ve tekerin merkezine doğru olan kısımda olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum yer değiştirme bu üçüncü mod için 1.067 mm, minimum yer değiştirmede 0.0008192 mm olarak Şekil 5.6' dan da görülebileceği gibi elde edilmiştir.



**Şekil 6.6.** Dairesel Delikli Tekerin Üçüncü Mod Şekli ve Doğal Frekansı

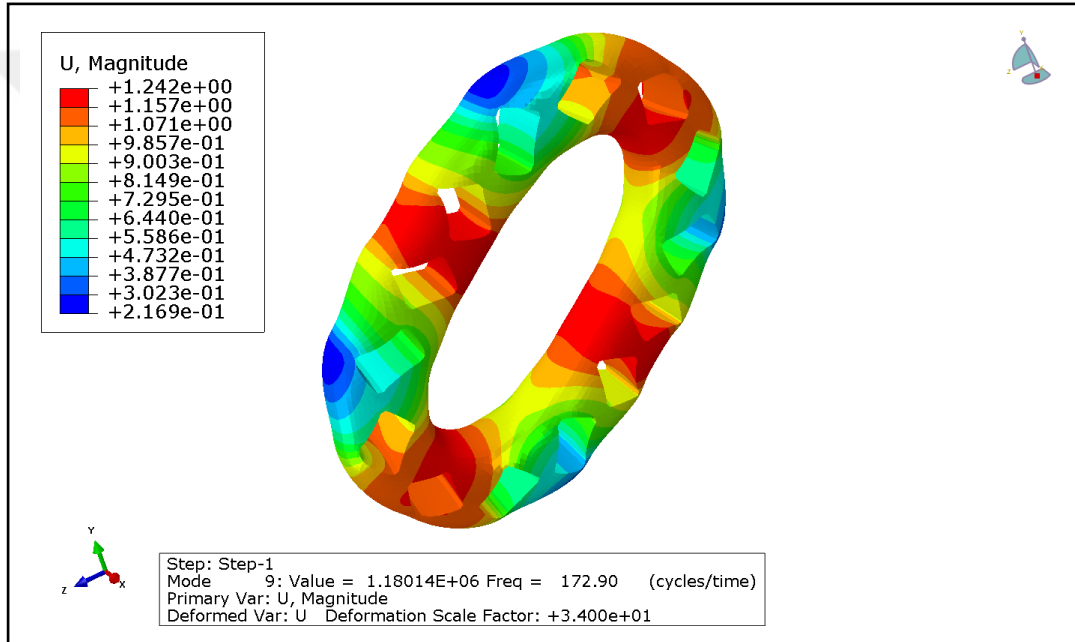
Şekil 6.7’ de kare delikli tekerin ilk mod şekli ve bu mod şekline karşılık gelen doğal frekansı gösterilmiştir. İlk doğal frekans bu kare delikli teker için Şekil 6.7’ den de görülebileceği gibi 122.18 Hz olarak elde edilmiştir.



**Şekil 6.7.** Kare Delikli Tekerin İlk Mod Şekli ve Doğal Frekansı

Dört ayrı bölgede maksimum yer değiştirmenin ve bu maksimum yer değiştirmenin 1 mm olduğu gözlemlenirken yine 4 ayrı bölgede minimum yer değiştirmenin ve bu minimum yer değiştirme değerinin de 0.003147 mm olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen mod şekli dairesel delikli tekerin ilk mod şekli ile benzerlik göstermektedir ve orada olduğu gibi bu mod şeklide içerisinde simetriklik göstermektedir.

Kare delikli tekerin ikinci mod şekli ve bu mod şekline karşılık gelen ikinci doğal frekansı Şekil 6.8’ de gösterilmiştir. Şekil 6.8’ den de görülebileceği gibi kare delikli tekerin ikinci doğal frekansı 172.9 Hz olarak hesaplanmıştır.



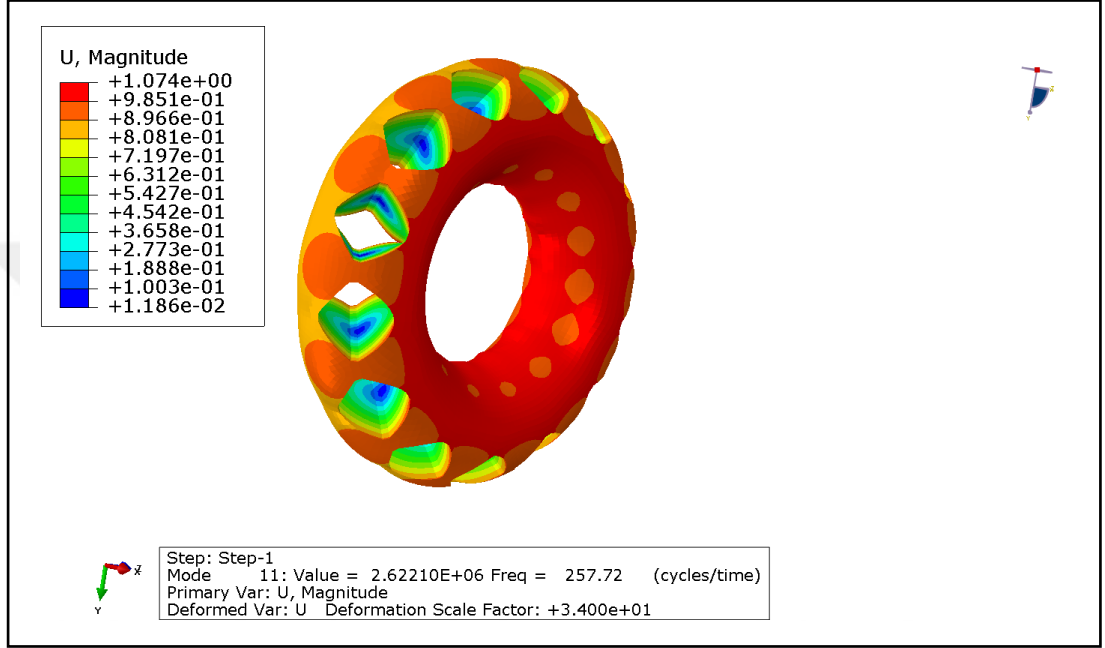
**Şekil 6.8.** Kare Delikli Tekerin İkinci Mod Şekli ve Doğal Frekansı

Mod şekli ortaya çıkan yer değiştirme (U-Magnitude) düzleminde değerlendirildiğinde kırmızı renk ile ifade edilen ve maksimum yer değiştirmenin olduğu 4 ayrı bölge gözlemlenmiştir. Maksimum yer değiştirme bu ikinci mod şekli için 1.242 mm olarak elde edilirken minimum yer değiştirmenin de 0.2169 mm olduğu gözlemlenmiştir. Minimum yer değiştirme maksimum yer değiştirmede olduğu gibi 4 ayrı bölgede gözlemlenmiştir.

Kare delikli teker için üçüncü mod şekli ve buna karşılık gelen üçüncü doğal frekansı Şekil 6.9’ da aşağıda gösterilmiştir. Bu üçüncü mod şekline karşılık gelen üçüncü doğal frekans Şekil 6.9’ dan da görülebileceği gibi 257.72 Hz olarak belirlenmiştir.



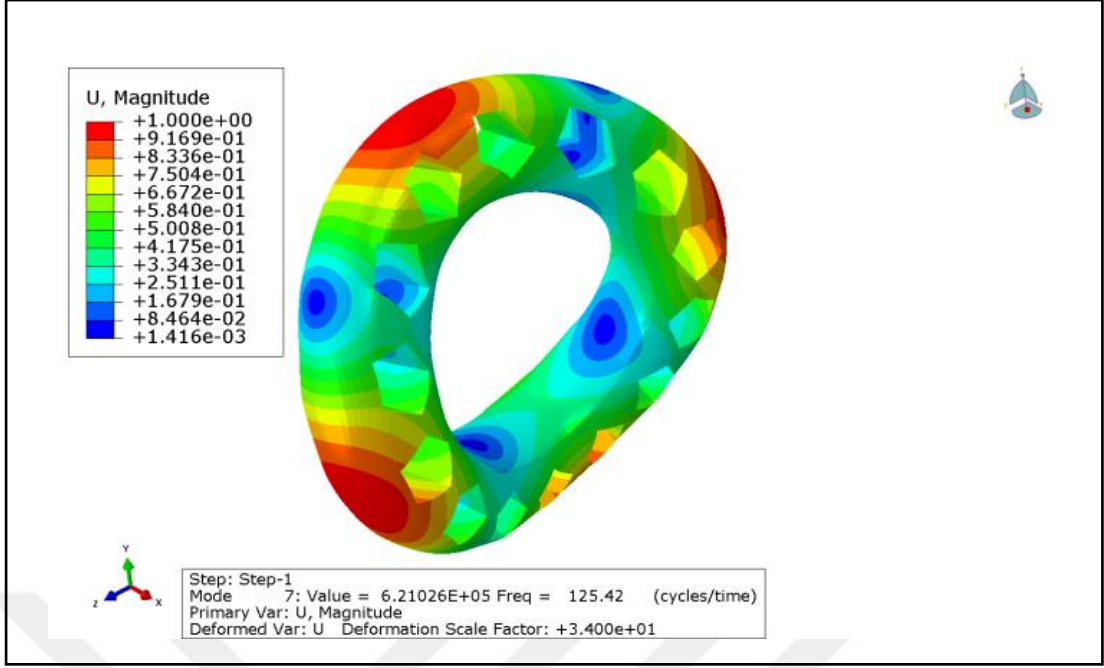
Diğer ilk iki mod şeklinin aksine burada maksimum yer değiştirmelerin süreksiz ayrı bölgelerde değil de tekerin merkezine doğru yoğunlaşan sürekli bir bölgede olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod şekli dairesel delikli teker için elde edilen üçüncü mod şekli ile benzerlik arz etmektedir. Maksimum yer değiştirme 1.074 mm iken minimum yer değiştirme 0.01186 mm olarak belirlenmiştir.



**Şekil 6.9.** Kare Delikli Tekerin Üçüncü Mod Şekli ve Doğal Frekansı

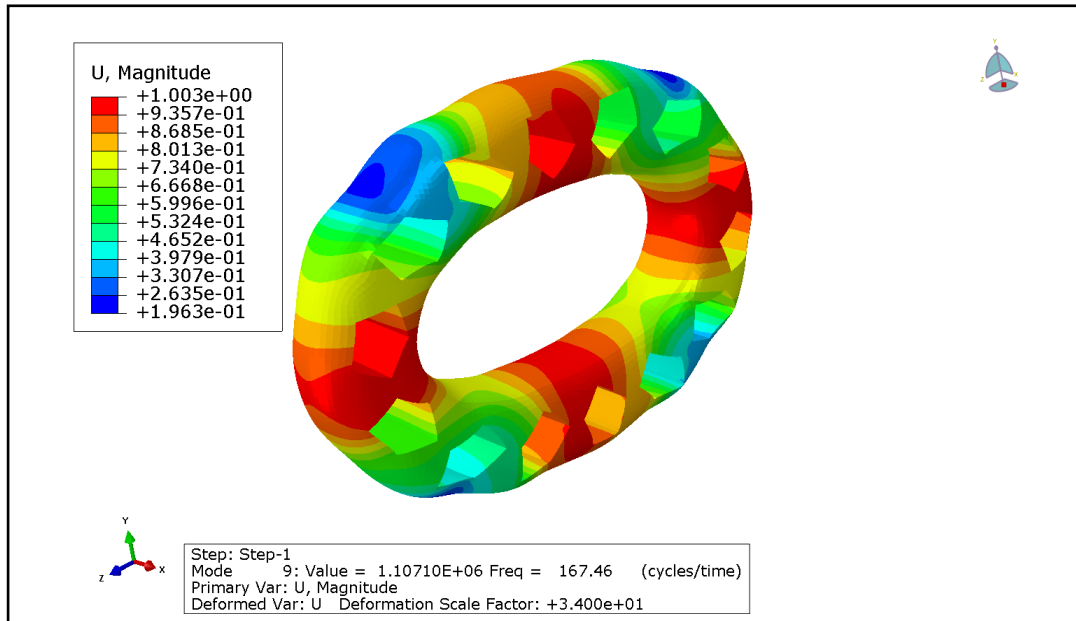
Şekil 6.10' dan anlaşılacağı gibi beşgen delikli tekerin ilk doğal frekansı 125.42 Hz olarak elde edilmiştir. Beşgen delikli tekerin ilk mod şekli önceden değerlendirdiğimiz daire ve kare delikli tekerlerin ilk mod şekilleri ile büyük benzerlik göstermektedir. Bu birinci mod şekli için maksimum yer değiştirme 1 mm olarak elde edilirken, minimum yer değiştirme 0.001416 mm olarak belirlenmiştir.





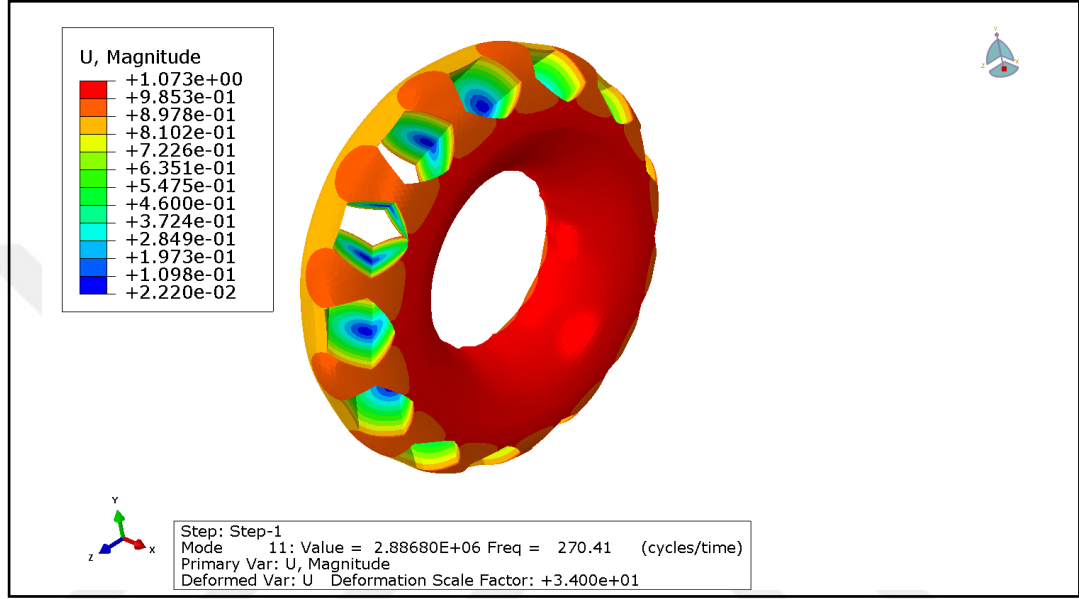
**Şekil 6.10.** Beşgen Delikli Tekerin İlk Mod Şekli ve Doğal Frekans

Beşgen delikli teker için elde edilen ikinci mod şekli ve buna karşılık gelen ikinci doğal frekansı Şekil 6.11’ de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabilceği gibi ikinci doğal frekans beşgen delikli teker için 167.46 Hz olarak belirlenirken maksimum yer değiştirme 1 mm olarak bulunmuştur. Bunun yanında minimum yer değiştirmenin de 0.1963 mm olduğu gözlemlenmiştir. Beşgen delikli tekerin ikinci mod şeklinin daha önce ele alınan daire ve kare delikli tekerlerin ikinci mod şekilleri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 6.11.** Beşgen Delikli Tekerin İkinci Mod Şekli ve Doğal Frekans

Şekil 6.12 beşgen delikli teker için elde edilen üçüncü mod şeklini ve buna karşılık gelen üçüncü doğal frekansı göstermektedir. Bu beşgen delikli teker için üçüncü doğal frekans şekilden de görülebileceği gibi 270.41 Hz olarak belirlenmiştir. Beşgen delikli tekerin üçüncü mod şeklinin daha önce ele alınan daire ve kare delikli tekerlerin üçüncü mod şekilleri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.

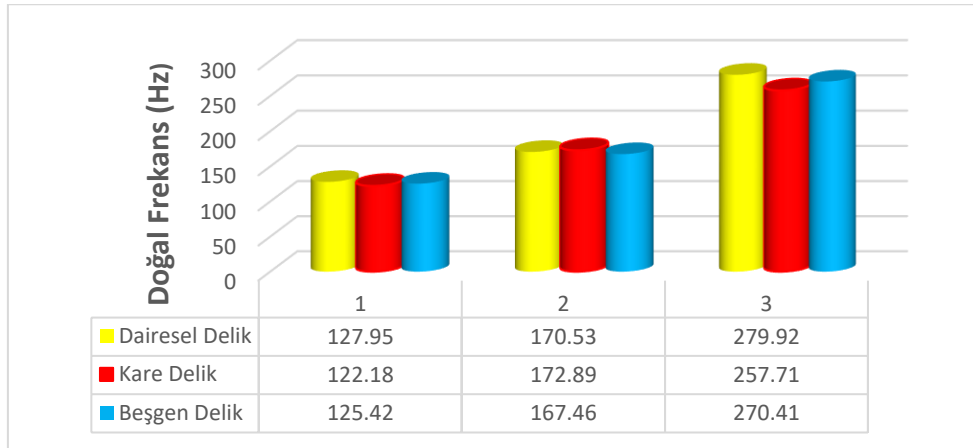


Şekil 6.12. Beşgen Delikli Tekerin Üçüncü Mod Şekli ve Doğal Frekansı

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Poliüretan malzeme ile dairesel, beşgen, kare olmak üzere üç farklı tipte üretilen havasız tekerlerin dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Şekil 7.1’ de daire, kare ve beşgen delikli tekerlerin ilk üç doğal frekansları karşılaştırılmıştır. Doğal frekansların şekillere bağlı olarak büyük bir değişim gözlemlenmemiştir. İlk doğal frekans açısından daire delikli teker 127.95 Hz ile en yüksek doğal frekansa sahipken, ikinci doğal frekans noktasında 172.89 Hz ile kare delikli teker en yüksek frekansa sahiptir. İlk doğal frekans da olduğu gibi üçüncü doğal frekans noktasında dairesel delikli teker 279.92 Hz ile en yüksek frekansa sahiptir.
2. Daire, kare ve beşgen delikli tekerlerin kütlelerinin yapılan ölçümler sonrasında birbirlerine yakın olduğu görüldüğünden dolayı dairesel delikli tekerin diğerlerinden daha direngen olduğu sonucu bu çalışmanın bir sonucu olarak ifade edilebilir.



Şekil 7.1. Doğal Frekansların Değişik Şekiller için Karşılaştırılması

3. Eşit ağırlıkta ve farklı basit geometrilerle üretilen havasız teker tipleri arasında en yüksek sönümlenme parametresi dairesel delikli tekerin diğerlerinden daha direngen olduğu sonucu bu çalışmanın bir sonucu olarak ifade edilebilir.

4. Orijinal tekerle üretilen desenli tekerlerin sönümleme karakteristikleri arasında büyük bir fark görülmemiştir.
5. Tekerlerin yaklaşık dinamik davranışları göstermesi daha az malzeme ile yaklaşık eşit dinamik karakterli havasız tekerler üretilebilir sonucuna ulaştırır.

Gelecek çalışmalarda desen sayıları artırılarak yada teker malzemesi değiştirilerek burada sunulan sayısal ve deneysel çalışmalar tekrarlanabilir. Böylelikle imalatı kolay ve daha az bakım gerektiren endüstriyel havasız teker üretiminin yaygınlaşması beklenir.

Ek: Bozok Üniversitesi Proje Koordinasyon Merkezi (PKM), Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) biriminin **6601-FBE/19-260** nolu proje desteğiyle tamamlanmıştır.

## KAYNAKLAR

1. Huberman, Leo, Feodal Toplumdan Yirminci Yüzyıla, İstanbul, İletişim Yayınları, 1995
2. Tekerleğin İcadı ve Uygarlığa Katkısı,  
<https://yunusakil.weebly.com/tekerle287in-bulunu351u-ve-uygarl305287a-katk305s305.html#> (Erişim Tarihi: 15.05.2019)
3. Tekerlek,  
<https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvVGVRZlZlZWw> (Erişim Tarihi: 15.05.2019).
4. İsaac Asimav, Bilim Ve Buluşlar Tarihi, S 9, 21, 22 Elif Topçugil, Imge Kitabevi.
5. Asimav, İ, Bilim Ve Buluşlar Tarihi, S 66,67 Elif Topçugil, Imge Kitabevi.
6. <https://2ladd.com/2018/11/tekerlegin-icadi-ve-gelisimi-ile-ilgili-tum-detaylar/> (Erişim Tarihi: 27.03.2019)
7. [https://tr.qwerty.wiki/wiki/Mansell\\_wheel](https://tr.qwerty.wiki/wiki/Mansell_wheel) (Erişim Tarihi: 15.02.2019)
8. <https://www.bulur.com/otorehber/OtomobilDevlerininHikayeleriFord/119> (Erişim Tarihi: 15.02.2019)
9. <http://www.patlamazlastik.com/index.php/patlamaz-lastik-teknolojisi> (Erişim Tarihi:05.04.2019)
10. <https://www.elektrikport.com/universite/michelinden-havasiz-lastik/21156#ad-image-2> (Erişim Tarihi:05.07.2019)
11. <http://www.michelin.com/corporate/EN/group/history>. (Erişim Tarihi: 10.06.2019)
12. Erol, D., Taşıt Lastikleri, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED) Cilt: 3, No: 3, 2011 (37-50)
13. Meyer, B., Long development journey pays off for Tweel, Michelin, <https://www.rubbernews.com/article/20181017/NEWS/181019944/long-development-journey-pays-off-for-tweel-michelin>
14. Gribachev, P., Tekerleklerdeki çubuklar: Lastiklerin havasız yapabilecekleri, <https://autoreview.ru/articles/gruzoviki-i-avtobusy/michelin-x-tweel> (Erişim Tarihi:05.07.2019)

15. Pranav, A.R., Chandak, K.R., Bagade, G.M., Non Pneumatic Tyre, Department of Mechanical Engineering, Siddhivinayak Technical Campus School of Polytechnic & Research Technology (SPRT) Shegaon Road, Khamgaon-444303, Maharashtra, India.
16. Goodyear's Prototype Non-pneumatic Lunar Tyre Unexplained-Mysteries.com  
<http://www.unexplainedmysteries.com/forum/index.php?showtopic=69787&st=150>
17. Lunar Roving Vehicle,  
<https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvTHVuYXJfUm92aW5nX1ZlaGljbGU>
18. <https://shina.guide/press/12817/#more-12817> (Erişim Tarihi:05.07.2019)
19. Michelin Introduces Next Generation of its Skid Steer Tweel,  
<http://www.site-kconstructionzone.com/?s=tweel> (Erişim Tarihi:05.08.2019)
20. Jaehyung Ju a, Doo-Man Kim b,†, Kwangwon Kim b, Flexible cellular solid spokes of a non-pneumatic tire, *Composite Structures* 94 (2012) 2285–2295
21. Gent AN, Walter JD. *The pneumatic tire*. Washington DC: National HighwayTraffic Safety Administration; 1985.
22. Cozatt CP. Spring wheel. US patent, US 2502,908; 1924.
23. <http://www.dunloptires.com/truck/about/history.html>  
 (Erişim Tarihi:05.08.2019)
24. Alfredo, R.V., Airless tire. US patent, US 3,329192; 1967.
25. Tonuk, E., and Unlusoy, Y.S., “Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis”, *Comput Struct*, Vol. 79, 2001, pp. 1219–32.
26. Balawi, S., and Abot, J.L., “A refined model for the effective in-plane elastic moduli of hexagonal honeycombs”, *Compos Struct*, Vol. 84, 2008, pp. 25-42.
27. Gonella, S., and Ruzzene, M., “Homogenization and equivalent in-plane properties of two dimensional periodic lattices”, *Int J Solid Struct*, Vol. 45, 2008, pp. 2897–915.
28. Sekhar, G.S., Dwivedi, K.K., *Tire for Commercial Vehicles*, *International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IAEFEA)*, Issue. 3, Vol. 1, July 2014

29. Karthick, S., Surendhar, R., Rose, V. R., Design and Analysis of Non – Pneumatic Tyre by using Composite Materials, IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 5, Issue 10, 2017 | ISSN (online): 2321-0613
30. Ansari, F., Dept Of Mechanical 4th Year, Jiet, Hyderabad, Bangalore, Airless tyres
31. Mattmiller, B., Airless tire project may prove a lifesaver in military combat July 8 2008, <https://www.engr.wisc.edu/airless-tire-project-may-prove-a-lifesaver-in-military-combat/>
32. Kubica, W., Schmidt, O., Self-supporting motor vehicle tire. US patent, US 4169,494; 1979.
33. Cawley, P. and R.D. Adams, The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1979. 14(2): p. 49-57.
34. Mote, Jr., C.D., Global-local finite element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1971. 3(4): p. 565-574.
35. Nelson, H.D., A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory. *Journal of Mechanical Design*, 1980. 102(4): p. 793-803.
36. Alshorbagy, A.E., M.A. Eltahir, and F.F. Mahmoud, Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. 35(1): p. 412-425.
37. Golla, D.F. and P.C. Hughes, Dynamics of Viscoelastic Structures—A Time-Domain, Finite Element Formulation. *Journal of Applied Mechanics*, 1985. 52(4): p. 897-906.
38. Natarajan, S., et al., Natural frequencies of cracked functionally graded material plates by the extended finite element method. *Composite Structures*, 2011. 93(11): p. 3082-3092.
39. Wang, B. and L. Hua, Dynamic modal analysis of automotive spiral bevel gears with high rotation speed. *Qiche Gongcheng/Automotive Engineering*, 2011. 33: p. 447-451.
40. Pedersen, R., I. Santos, and I.A. Hede, Advantages and Drawbacks of Applying Periodic Time-Variant Modal Analysis to Spur Gear Dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010. 24(5): p. 1495-1508.
41. Li, S.P. and Z.D. Fang, Dynamic frequency calculation of the spiral bevel gear under prestress. 2006. 21: p. 949-955.

42. Vinayak, H. and R. Singh, MULTI-BODY DYNAMICS AND MODAL ANALYSIS OF COMPLIANT GEAR BODIES. *Journal of Sound and Vibration*, 1998. 210(2): p. 171-214.
43. Wang, X. and Y.-m. Nie, A refined shifted block inverse-free Krylov subspace method for symmetric generalized eigenvalue problems. *Computers & Mathematics with Applications*, 2013. 66(6): p. 1137-1146.
44. Arjmandi, S.A. and V. Lotfi, Computing mode shapes of fluid-structure systems using subspace iteration methods. *Scientia Iranica*, 2011. 18(6): p. 1159-1169.
45. Lenhardt, I. and T. Rottner, Krylov subspace methods for structural finite element analysis. *Parallel Computing*, 1999. 25(7): p. 861-875.
46. Wu, G. and L. Zhang, On expansion of search subspaces for large non-Hermitian eigenproblems. *Linear Algebra and its Applications*, 2014. 454: p. 107-129.
47. Paige, C.C., I. Panayotov, and J.-P.M. Zemke, An augmented analysis of the perturbed two-sided Lanczos tridiagonalization process. *Linear Algebra and its Applications*, 2014. 447: p. 119-132.
48. Wang, Y., Dynamics of unsymmetric piecewise-linear/non-linear systems using finite elements in time. *Journal of Sound and Vibration*, 1995. 185(1): p. 155-170.
49. Nguyen, D., et al., Subspace and Lanczos sparse eigen-solvers for finite element structural and electromagnetic applications. *Advances in Engineering Software - AES*, 2000. 31: p. 599-606.
50. Mohankumar, N. and T. Carrington, A new approach for determining the time step when propagating with the Lanczos algorithm. *Computer Physics Communications*, 2010. 181: p. 1859-1861.
51. Yang, L.T., et al., An integrated parallel GNFS algorithm for integer factorization based on Linbox Montgomery block Lanczos method over GF(2). *Computers & Mathematics with Applications*, 2010. 60(2): p. 338-346.
52. Coppersmith, D., Solving linear equations over GF(2): block Lanczos algorithm. *Linear Algebra and its Applications*, 1993. 192: p. 33-60.
53. Jia, Z., On convergence of the inexact Rayleigh quotient iteration with the Lanczos method used for solving linear systems. *Science China Mathematics*, 2013. 56(10): p. 2145-2160.

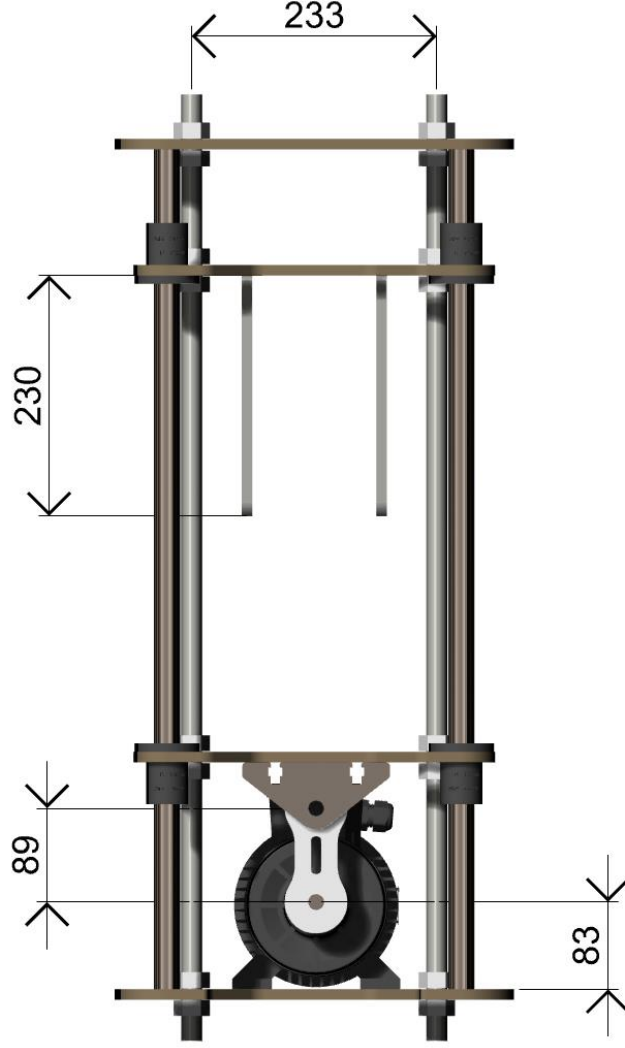


54. Niu, D. and X. Yuan, A harmonic Lanczos bidiagonalization method for computing interior singular triplets of large matrices. *Applied Mathematics and Computation*, 2010. 218.
55. Browne, K., S. Qiao, and Y. Wei, A Lanczos bidiagonalization algorithm for Hankel matrices. *Linear Algebra and its Applications*, 2009. 430(5): p. 1531-1543.
56. Wang, X., Z. Lin, and Z. Chen, Augmented Lanczos bidiagonalization by small singular value decompositions for face recognition and image compression. *Optik*, 2014. 125(16): p. 4411-4416.
57. Aktulga, H.M., et al., Parallel eigenvalue calculation based on multiple shift–invert Lanczos and contour integral based spectral projection method. *Parallel Computing*, 2014. 40(7): p. 195-212.
58. Yamazaki, I., et al., Performance comparison of parallel eigensolvers based on a contour integral method and a Lanczos method. *Parallel Computing*, 2013. 39: p. 280–290.
59. Druskin, V. and L. Knizhnerman, On application of the Lanczos method to solution of some partial differential equations. *J. Comput. Appl. Math.*, 1994. 50(1-3): p. 255-262.
60. Cantó, R., M.J. Peláez, and A.M. Urbano, Full rank Cholesky factorization for rank deficient matrices. *Applied Mathematics Letters*, 2015. 40: p. 17-22.
61. Lee, K. and J.K. Yoo, Bayesian Cholesky factor models in random effects covariance matrix for generalized linear mixed models. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2014. 80: p. 111-116.
62. Sun, X. and D. Sun, Estimation of the Cholesky decomposition of the covariance matrix for a conditional independent normal model. *Statistics & Probability Letters*, 2005. 73(1): p. 1-12.
63. Benner, P. and T. Mach, The LR Cholesky algorithm for symmetric hierarchical matrices. *Linear Algebra and its Applications*, 2013. 439(4): p. 1150-1166.
64. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. / Smith, Michael.
65. Airless Tyre Project SciTech Industries (2012). (Video)  
<http://vimeo.com/41741265>
66. <http://www.transmedya.com/dergi/sayilar/2014/12/files/assets/basic-html/page28.html>
67. <https://www.trucknews.com/transportation/michelin-taking-the-air-out-of-tires/1003091593/>.

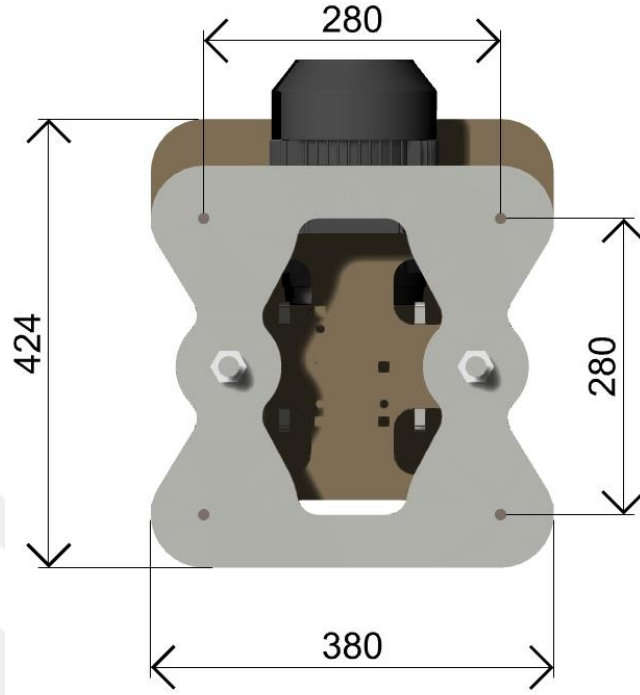
68. Airless Tire, General Information.
69. Michelin Tyres, Tweel Technology. Jaehyung Ju a, Doo-Man Kim b,†, Kwangwon Kim b, Flexible cellular solid spokes of a non-pneumatic tire, Composite Structures 94 (2012) 2285–2295
70. Taşkın, Y., Taşıt Titreşimlerinin Analizi ve Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008
71. Opam, K., <http://www.theverge.com/2013/11/18/5117710/polaris-latest-atv-has-airless-tyres-that-can-withstand-50-caliber> November 18, 2013
72. <http://www.engr.wisc.edu/news/archive/2008/Jul08.html>.1  
<http://www.toxel.com/tech/2009/07/05/innovative-airless-tires-by-michelin/>.
73. <https://www.bridgestonetire.com/tread-and-trend/tire-talk/airless-concept-tires>

## EKLER

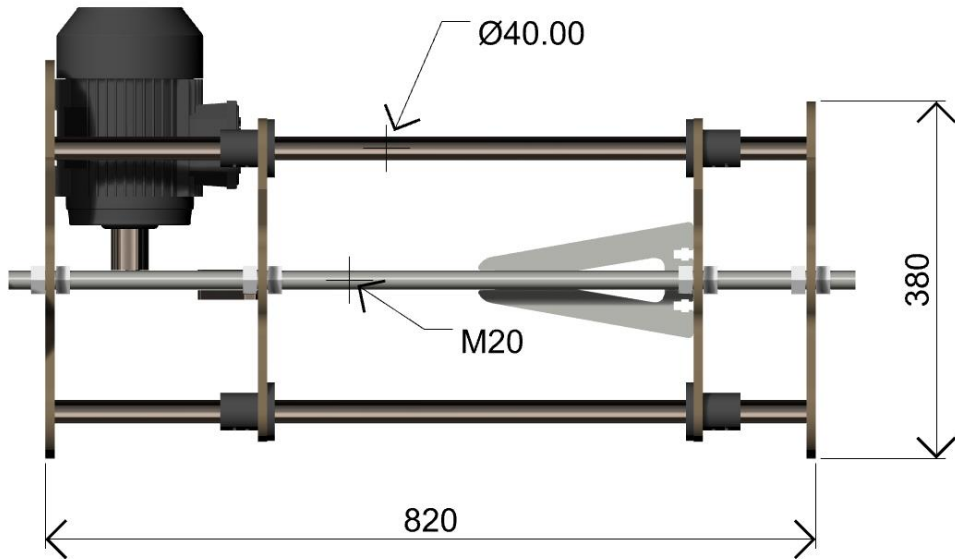
Ek 1: eyrek Taşıt Modelinin Ön Görünüşün Ölçülendirilmesi



**Ek 2:** Çeyrek Taşıt Modelinin Üst Görünüşün Ölçülendirilmesi



**Ek 3:** Çeyrek Taşıt Modelinin Yan Görünüşün Ölçülendirilmesi



## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Yozgat' da doğan Rukiye COŞAR, ilk, orta ve lise öğrenimini sırayla Mehmet Akif Ersoy İ.Ö.O., Yozgat Lisesinde tamamlamıştır. 2009 yılında kazandığı Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2013 yılında başarıyla bitirmiştir.

2013 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. 2014 yılı Yozgat Belediyesi Etüt Proje Müdürlüğünde Makine Mühendisliği görevine başlamış olup Mekanik İşler Koordinatörü olarak halen devam etmektedir.

### İletişim Bilgileri

Adres: Tekke Mahallesi Mehmet Akif Ersoy Cad. İcikoğlu Apt. No:27

YOZGAT / Merkez

66200/ YOZGAT

GSM: 0507 793 0337

E-posta: rukiye\_cosar@hotmail.com

rkycsr@gmail.com