İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK SİLİNDİRLİ BİR DİZEL MOTORDA KUVVETLERİN ANALİZİ VE TİTREŞİM ÖÇLÜMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem TÜRKMEN

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Otomotiv

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK SİLİNDİRLİ BİR DİZEL MOTORDA KUVVETLERİN ANALİZİ VE TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cem TÜRKMEN
(503081723)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. O. Akın KUTLAR (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet GÜNEY (İTÜ)
Prof. Dr. Orhan DENİZ (YTÜ)

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Anadolu Motor'un üretmekte olduğu ANTOR 3 LD 510 model dizel motorun kuvvet analizleri ve titreşim ölçümlerinin yapıldığı bu çalışma kapsamında akademik bilgi birikimi ve tecrübesiyle, maddi manevi tüm imkanları sunarak bana her konuda destek olan tez danışmanım değerli hocam Y. Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Kuvvet analizlerinin çözümlenmesinde kullanılan Adams programıyla ilgili sorularımızı tüm samimiyetiyle cevaplandıran ve Adams programını kullanmamıza olan katkılarından dolayı Yıldız Teknik Üniversitesi Arş. Gör. Onur ALPAY'a; titreşim ölçümlerinin yapılması için Anadolu Motor'un olanaklarından yararlanmamızı sağlayan başta Zeki AYAZ Bey'e ve tüm Anadolu Motor çalışanlarına; tez çalışmaları kapsamında birçok konuda ortak çalışma fırsatı bulduğum arkadaşım Mehmet OLGUN'a; her konu da bana destek olan değerli arkadaşım Sinan TAN'a ve her zaman yanımda olan aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2010

Cem Türkmen

(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. TEK SİLİNDİRLİ MOTORUN ATALET KUVVETLERİ **3**
2.1 Kütlelerin İndirgenmesi 3
2.1.1 Piston grubu kütlesi 3
2.1.2 Krank milinin dengelenmemiş kısımlarının kütlesi 4
2.1.3 Biyel grubu kütlesi 4
2.2 Hareket Eden Parçaların Oluşturduğu Kuvvetler 6
2.2.1 Sadece öteleme hareketi yapan kütlelerin atalet kuvvetleri 6
2.2.2 Sadece dönme hareketi yapan kütlelerin merkezkaç kuvveti 7
2.2.3 Hem dönme hem öteleme hareketi yapan kütlenin oluşturduğu kuvvetler 7
3. TEĞETSEL KUVVETLER DİYAGRAMI **9**
3.1 Pistona Tesir Eden Kuvvetler 9
3.1.1 Gaz kuvvetleri 9
3.1.2 Atalet kuvvetleri 11
3.1.3 Ağırlık kuvvetleri 12
3.2 Pistona Tesir Eden Toplam Kuvvetler Diyagramının Çizilmesi 12
3.3 Teğetsel ve Radyal Kuvvetin Bulunması 13
4. KRANK MUYLUSUNA GELEN YATAK KUVVETLERİNİN HESAPLANMASI **17**
4.1 Standart Motorun Krank Muylusuna Gelen Yatak Kuvvetlerinin Hesaplanması 17
4.1.1 Teorik hesaplamalar 17
4.1.1.1 Biyel kuvvetinin bulunması (P_{st}) 17
4.1.1.2 Yatak kuvvetinin bulunması ($P_{Pİ}$) 19
4.1.2 Adams analizi 21
4.1.3 Teorik hesaplamalarla Adams'ın karşılaştırılması 23
4.2 Çift Mille Dengelenmiş Denge Milli Motorun Krank Muylusuna Gelen Yatak Kuvvetlerinin Hesaplanması 24
4.2.1 Adams analizi 24
5. VOLAN HESABI **27**
5.1 Standart Motorda Volan Hesabı 28
5.2 Çift Mille Dengelenmiş Motorda Volan Hesabı 30

6. ÖLÇÜMDE KULLANILAN EKİPMANLAR 33
6.1 Üç Eksenli Dytran 3093B İvmeölçer 33
6.2 Areva 01 dB dB4 Analizör 34
6.3 dBFA Suite Paket Programı 34
6.3.1 FFT analizör 38
6.3.1.1 Fourier serileri 38
6.3.1.2 Fourier integral dönüşümü 39
6.3.1.3 Ayrık Fourier dönüşümü (discrete Fourier transform) 40
6.3.1.4 Hızlı Fourier dönüşümü (fast Fourier transform) 41
6.3.2 Analog dijital dönüştürme 42
6.3.3 Aliasing 43
6.3.4 Leakage (Kaçak) 44
6.3.5 Pencereleme (Windowing) 45
6.3.5.1 Geçici sinyalin pencerelenmesi 48
6.3.5.2 Hanning window 48
6.3.6 Üst Üste gelme (Overlap) işlemi 50
7. ÖLÇÜMLER 53
7.1 Elektrik Motoruyla Tahrik 53
7.1.1 Standart motor 54
7.1.2 Çift mille dengelenmiş denge milsiz motor 57
7.1.3 Çift mille dengelenmiş denge milli motor 59
7.2 Gaz Kuvvetleriyle Tahrik 63
7.2.1 Standart motorda gövde yanından alınan ölçümler 64
7.2.1.1 Standart motor boştayken gövde yanından alınan ölçümler 65
7.2.1.2 Standart motor tam yükteyken gövde yanından alınan ölçümler 66
7.2.2 Çift mille dengelenmiş denge milli motorda gövde yanından alınan ölçümler 68
7.2.2.1 Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gövde yanından alınan ölçümler 69
7.2.2.2 Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gövde yanından alınan ölçümler 72
7.2.3 Standart motorda külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler 74
7.2.3.1 Standart motor boştayken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler 74
7.2.3.2 Standart motor tam yükteyken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler 76
7.2.4 Çift mille dengelenmiş denge milli motorda külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler 78
7.2.4.1 Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler 79
7.2.4.2 Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler 81
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 85
KAYNAKLAR 87
EKLER 89

KISALTMALAR

ADAMS : Advanced Dynamic Analysis of Mechanical Systems
CAD : Computer Aided Design
KMA : Krank mili açısı
FFT : Fast Fourier Transform
HFD : Hızlı Fourier Dönüşümü
DFT : Discrete Fourier Transform
AFD : Ayrık Fourier Dönüşümü
ADC : Analog to Digital Converter

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : ANTOR 3 LD 510 dizel motorunun özellikleri. 2

Çizelge 2.1 : Parça kütleleri. 3

Çizelge 5.1 : δ değerinin kullanım yerine göre değişimi. 28
Çizelge 5.2 : 3 LD 510 standart motorda kullanılan volanın kütlesi ve atalet momentleri. 29

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : ANTOR 3 LD 510. 1

Şekil 2.1 : Krank milinin dengelenmemiş kısımlarının kütle indirgemesi. 4
Şekil 2.2 : İki kütle metoduna göre biyel grubunun indirgenmesi. 5

Şekil 3.1 : Silindir içi basıncının ºKMA'na bağlı değişimi. 10
Şekil 3.2 : Gaz kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi. 11
Şekil 3.3 : Piston atalet kuvvetlerinin ºKMA'na bağlı değişimi. 12
Şekil 3.4 : Pistona tesir eden toplam kuvvetler. 13
Şekil 3.5 : Teğetsel ve radyal kuvvetin şematik gösterimi[2].....13
Şekil 3.6 : Krank mili muylusuna etki eden teğetsel (T) ve radyal (R) kuvvetlerin ºKMA'na bağlı olarak değişimi. 15

Şekil 4.1 : Krank muylusuna gelen kuvvetler [2].....18
Şekil 4.2 : Biyel kuvveti bileşenlerinin ºKMA'na bağlı değişimi. 19
Şekil 4.3 : Biyelde merkezkaç kuvvet olarak tesir eden atalet kuvveti bileşenlerinin ºKMA'na bağlı değişimi. 20
Şekil 4.4 : Krank muylusu yatak kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi. 21
Şekil 4.5 : Adams analizinde gaz kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi. 22
Şekil 4.6 : Adams analizinde krank muylusu yatak kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi. 23
Şekil 4.7 : Standart motorda krank muylusuna gelen yatak kuvvetinin teorik ile Adams karşılaştırması. 24
Şekil 4.8 : Adams analizinde çift mille dengelenmiş denge milli motorun krank muylusu yatak kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi 25

Şekil 5.1 : Volansız standart motorda kranktaki açısal hız değişimi.....29
Şekil 5.2 : Volanlı standart motorda kranktaki açısal hız değişimi.....30
Şekil 5.3 : Volansız çift mille dengelenmiş motorda kranktaki açısal hız değişimi. .31
Şekil 5.4 : Volanlı çift mille dengelenmiş motorda kranktaki açısal hız değişimi. ...32

Şekil 6.1 : Üç eksenli Dytran 3093B ivmeölçer.....33
Şekil 6.2 : Areva 01 dB dB4 analizör.....34
Şekil 6.3 : dBFA Suite programı ayarlar penceresi.....35
Şekil 6.4 : dBFA Suite programı donanım biçimleri penceresi. 35
Şekil 6.5 : FFT uygulamadan önce alınan sinyaller. 36
Şekil 6.6 : dBFA Suite programı sinyal işleme parametreleri penceresi.....37
Şekil 6.7 : FFT uygulandıktan sonra sinyaller. 37
Şekil 6.8 : Standart ayrık Fourier dönüşümü(AFD) ve hızlı Fourier dönüşümü(HFD) için örneklem sayısına göre işlem sayılarının grafiği [9].....41

Şekil 6.9 : Analog dijital dönüşüm. 42
Şekil 6.10 : Örnekleme frekansı ile giriş frekansının aynı boyutta olması 43
Şekil 6.11 : Gerçek sinyal frekansının örnekleme frekansından büyük olması..... 43
Şekil 6.12 : Veri kesilmesi nedeniyle oluşan Leakage(Kaçak). 45
Şekil 6.13 : Dikdörtgen pencere. 46
Şekil 6.14 : Geçici sinyal durumunda dikdörtgen pencere..... 48
Şekil 6.15 : Hanning penceresi. 49
Şekil 6.16 : Geçici sinyal durumunda hanning penceresi. 49
Şekil 6.17 : Üst üste gelme işlemi (overlap)..... 51

Şekil 7.1 : Elektrik motoruyla tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan standart motorun şematik gösterimi. 55
Şekil 7.2 : Standart motorda x yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi..... 56
Şekil 7.3 : Standart motorda y yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi..... 56
Şekil 7.4 : Standart motorda z yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi. 57
Şekil 7.5 : Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda x yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi. 58
Şekil 7.6 : Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda y yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi. 58
Şekil 7.7 : Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda z yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi. 59
Şekil 7.8 : Elektrik motoruyla tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik gösterimi..... 60
Şekil 7.9 : Çift mille dengelenmiş denge milli motorda x yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi. 61
Şekil 7.10 : Çift mille dengelenmiş denge milli motorda y yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi. 62
Şekil 7.11 : Çift mille dengelenmiş denge milli motorda z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 62
Şekil 7.12 : Gaz kuvvetleriyle tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan standart motorun şematik gösterimi. 64
Şekil 7.13 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 65
Şekil 7.14 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 65
Şekil 7.15 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 66
Şekil 7.16 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 67
Şekil 7.17 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 67
Şekil 7.18 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 68
Şekil 7.19 : Gaz kuvvetleriyle tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik gösterimi..... 69
Şekil 7.20 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi..... 70
Şekil 7.21 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi..... 71

Şekil 7.22 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 71
Şekil 7.23 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....72
Şekil 7.24 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....73
Şekil 7.25 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....74
Şekil 7.26 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....75
Şekil 7.27 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....75
Şekil 7.28 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....76
Şekil 7.29 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....77
Şekil 7.30 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....77
Şekil 7.31 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....78
Şekil 7.32 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 79
Şekil 7.33 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 80
Şekil 7.34 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi. 80
Şekil 7.35 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....81
Şekil 7.36 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....82
Şekil 7.37 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.....83

Şekil A.1 : Elektrik motoruyla tahrikte çift mille dengelenmiş motor üzerinden alınan ölçümler. 90
Şekil A.2 : Elektrik motoruyla tahrikte çift mille dengelenmiş motorda denge milleri kullanılmadan yapılan ölçümler. 91
Şekil A.3 : Gaz kuvvetleriyle tahrik altında çalışan motorda gövde yanından alınan ölçümler. 92
Şekil A.4 : Gövde yanı ölçüm noktası. 92
Şekil A.5 : Külbütör kapağı ölçüm noktası. 93

SEMBOLLER

m_p : Piston grubu kütlesi
m_{piston} : Piston kütlesi
m_{perno} : Perno kütlesi
m_{segman} : Segman kütlesi
m_w : Krank kolunun dengelenmemiş kütlesi
m_{w1} : Krank kolunun dengelenmemiş kütlesi (dişli tarafı)
m_{w2} : Krank kolunun dengelenmemiş kütlesi (volan tarafı)
m_c : Krank kolunun dengelenmemiş kütlesinin dönme eksenine uzaklığı
m_{cp} : Biyel muylusunun kütlesi
ρ_c : Krank kolunun dengelenmemiş kütlesinin dönme eksenine uzaklığı
R : Krank yarıçapı
m_{crp} : Biyel grubu kütlesinin piston tarafına indirgenen kütlesi
m_{crc} : Biyel grubu kütlesinin krank tarafına indirgenen kütlesi
m_b : Biyel grubu kütlesi
L_{crp} : Biyel grubunun ağırlık merkezinin biyel küçükbaşının merkezine olan uzaklık
L_{crc} : Biyel grubunun ağırlık merkezinin biyel büyükbaşının merkezine olan uzaklık
L_{cr} : Biyel boyu
$m_{biyelkol}$: Biyel kolun kütlesi
m_{kep} : Kep kütlesi
$m_{kolyatak}$: Kol yatak kütlesi
$m_{cıvata}$: Cıvata kütlesi
$m_{burç}$: Burç kütlesi
m_j : Sadece öteleme hareketi yapan parçaların kütlesi
j : Piston ivmesi
α : Krank açısı
β : Biyel açısı
ω : Krankın açısal hızı
λ : Biyel oranı
P_j : Atalet kuvvetleri
P_{j1} : Birinci dereceden atalet kuvveti
P_{j2} : İkinci dereceden atalet kuvveti
m_R : Sadece dönme hareketi yapan parçaların kütlesi
K_R : Merkezkaç kuvveti
T : Teğetsel kuvvet
M_d : Döndürme momenti
A_p : Piston yüzey alanı
D : Piston çapı
P_g : Gaz kuvveti
P : Pistona tesir eden kuvvetler toplamı
P_{res} : Pistona tesir eden kuvvetler toplamı
N : Normal kuvvet

P_{st} : Biyel kuvveti
P_{pi} : Yatak kuvveti
m_{RS} : Biyel grubunun sadece dönme hareketi yapan kütlesi
$P_{A(\text{biyel kısmı})}$: Merkezkaç kuvvet olarak tesir eden atalet kuvveti
v_m : Krank muylusunun ortalama hızı
v_{max} : Krank muylusunun maksimum hızı
v_{min} : Krank muylusunun minimum hızı
δ : Düzgünsüzlük katsayısı

TEK SİLİNDİRLİ BİR DİZEL MOTORDA KUVVETLERİN ANALİZİ VE TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİ

ÖZET

İçten yanmalı motorlarda titreşim problemlerini çözebilmek için dengesizlik yaratan kuvvetlerin dengelenmesi gerekmektedir. Motorların dengelenmesi ötelenen parçaların oluşturduğu atalet kuvvetleri ve dönen parçaların oluşturduğu merkezkaç kuvvetleri dikkate alınarak yapılır. Yataklara gelen kuvvetlerin hesaplanmasında, volan seçiminde ve mukavemet hesaplamaları gibi konularda ise gaz kuvvetleri de dikkate alınır.

Bu çalışma kapsamında Anadolu Motor'un üretmekte olduğu Antor 3 LD 510 model dizel motorun teorik hesaplamalarla atalet kuvvetleri bulunarak gaz kuvvetlerinin de etkisi altında teğetsel kuvvetler diyagramı çizdirilmiştir. Standart motor için krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri hem teorik olarak hem de Adams'ta analiz yapılmak suretiyle bulunmuştur. Elde edilen sonuçlarda teorik hesaplamalarla Adams arasındaki sapma kabul edilebilir ölçülerde olduğu için çift mille dengelenmiş motorda krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri Adams'ta yapılan analizlerle hesaplanmıştır.

Antor 3 LD 510 model dizel motorda kullanılmakta olan mevcut volana göre Adams'ta düzgünsüzlük katsayısı hesaplanmıştır. Aynı zamanda mevcut volanın çift mille dengelenmiş motorda kullanılması durumunda düzgünsüzlük katsayısının durumu Adams'ta incelenmiştir.

Anadolu Motor'da yapılan ölçümlerde standart motor ile çift mille dengelenmiş motor elektrik motoruyla ve gaz kuvvetleriyle tahrik altındayken üç eksenli ivmeölçer kullanılarak ivme değerlerindeki artış ve azalış incelenmiştir. Bu sayede çift mille dengelenmiş motorun standart motora göre daha dengeli olduğu görülmüştür.

FORCE ANALYSIS AND VIBRATION MEASUREMENTS OF A SINGLE CYLINDRICAL DIESEL ENGINE

SUMMARY

Forces that create imbalances need to be balanced in order to solve vibration problems of internal combustion engines. In balancing process of engines, inertia forces that are created by shifting engine parts and centrifugal forces that are formed by rotating engine parts are taken into consideration. Gas forces are also considered in selection of flywheel, in calculation of forces on bearings and in computing of strength forces.

In this study, inertia forces of diesel engine which manufactured by Anadolu Motor with model name Antor 3 LD 510 are calculated after theoretical calculations and tangential forces diagram is drawn under the influence of gas forces. Bearing forces on crank pin for standard engine are calculated not only theoretically and also with system simulation analysis in Adams software. Since deviation between theoretical calculations and Adams simulation analysis was acceptable, Adams analysis have been used for calculation of bearing forces on crack pin of double-shaft balanced engine.

Irregularity coefficient has been calculated with Adams according to the existing flywheel used in Antor 3 LD 510 model diesel engine. State of irregularity coefficient also examined in Adams for the case of using the existing flywheel in double-shaft balanced engine.

During the measurements conducted in Anadolu Motor, acceleration increases and decreases of standard engine and double-shaft balanced engine have been examined by using a three-axis accelerometer under the drive of electric engine and gas forces. In this way, double-shaft balanced engine was found to be more balanced than the standard engine.

1. GİRİŞ

Motorun çalışması esnasında krank-biyel mekanizmasına gaz, atalet ve merkezkaç kuvvetleri etki eder. Mukavemet hesapları mekanizmaya etki eden toplam kuvvetlere göre yapılırken, motorun dengelenmesi atalet ve merkezkaç kuvvetleri dikkate alınarak yapılır. Krank-biyel mekanizmasına etki eden kuvvetler ve bunların momentleri krank açısına bağlı sürekli değişim gösterir. Kuvvet ve momentler dengelenmedikleri durumda motor gövdesinde titreşime ve motorun devrilmesine neden olurlar. Titreşim bağlantı noktalarından motorun gövdesini taşıyan aksama geçerken aynı zamanda dengelenmemiş kuvvetlerin oluşturduğu titreşim güç kaybına neden olur [1].

Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır. Bu salınımlar bir sarkacın hareketi gibi periyodik olabileceği gibi çakıllı bir yolda tekerleğin hareketi gibi rastgele de olabilir. Titreşim bazen arzu edilir. Daha sıklıkla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcar ve istenmeyen ses ve gürültü oluşturur. Örneğin, motorların, elektrik motorlarının ya da herhangi mekanik aracın çalışma esnasındaki hareketi istenmeyen titreşimler üretir. Böyle titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler [1].



Şekil 1.1 : ANTOR 3 LD 510.

Bu amaçlar doğrultusunda Anadolu Motor tarafından üretilen Şekil 1.1'de görülen ANTOR 3 LD 510 dizel motorda titreşimlere neden olan kuvvetler belirlenerek titreşimlerin azaltılması hedeflenmiştir. Titreşim ölçümleri yapılarak sonuçlar deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan teorik hesaplamaların Adams programı ile tutarlı olması durumunda kuvvetlerin hesaplanmasında Adams programı kullanılarak gerek zaman açısından gerekse maliyet açısından önemli avantajlar elde edilecektir. Bu sayede Adams'ta dengeleme ağırlıkları belirlenebilecek ve bu durumlar için kuvvet analizleri kolaylıkla yapılabilecektir. Hesaplamalarda kullanılacak olan ANTOR 3 LD 510 dizel motorun özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : ANTOR 3 LD 510 dizel motorunun özellikleri.

Silindir Sayısı	1
Silindir Hacmi (cm^3)	510
Silindir Çapı (mm)	85
Strok (mm)	90
Sıkıştırma Oranı	17,5
Motor Devri (d/dk)	3000
Motor Gücü (BG)	12
Max. Tork: kg-m @1800 d/dk	3,35
Yakıt Depo Kapasitesi (lt)	5,5
Özgül Yakıt Sarfiyatı (gr/BG. saat)	190
Yağ Tüketimi (gr/saat)	10
Karter Yağ Kapasitesi (lt)	1,75
Kuru (Boş) Ağırlık (kg)	60

2. TEK SİLİNDİRLİ MOTORUN ATALET KUVVETLERİ

2.1 Kütlelerin İndirgenmesi

Krank-biyel mekanizmasının hareketi esnasında oluşan kuvvetlerin değerlerinin hesaplanabilmesi için sistemin basite indirgenmesi gerekir. Piston grubu kütlesi, krank milinin dengelenmemiş kısımlarının kütlesi ve biyel grubu kütlesi olmak üzere krank-biyel mekanizması üç kütle grubuna indirgenir [2].

Antor 3 LD 510 motorunun Anadolu Motor'dan alınan parça kütleleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Parça kütleleri.

Parça	Kütle (gr)
Krank mili	3437,88
Biyel kolu	492,6
Kol yatakları	50
Kep	201,4
Cıvatalar	40
Burc	30
Piston	535
Perno	140
Segmanlar	35
Karşı ağırlık (dişli tarafı)	1406,56
Karşı ağırlık (volan tarafı)	1475,80

2.1.1 Piston grubu kütlesi

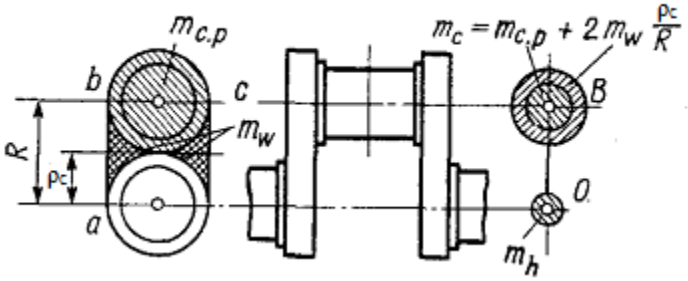
Piston grubu; piston, perno ve segmanlardan oluşmaktadır. Piston grubu sadece öteleme hareketi yapmaktadır. Piston grubunun kütlesi piston pernosunun merkezinde toplanmış kabul edilir [1].

$$m_p = m_{piston} + m_{perno} + \sum m_{segman} \tag{2.1}$$

$$m_p = 535 + 140 + 1,4465 + 1,4465 + 15 + 10 + 10 = 712,89 \text{ g}$$

2.1.2 Krank milinin dengelenmemiş kısımlarının kütlesi

Krank kolunun dengelenmemiş kütlesi (m_w), krankın biyel muylusu etrafında toplanacak şekilde indirgenir. Krank milinin krank ekseni etrafında dönen dengesiz kütlelerinin toplamı (m_c), krank kollarının biyel muylusu eksenine indirgenmiş kütleleri ($2m_w\rho_c/R$) ile biyel muylusunun kütlesinin (m_{cp}) toplamına eşit olur [1].



Şekil 2.1 : Krank milinin dengelenmemiş kısımlarının kütle indirgemesi.

$$m_w \rho \omega^2 = m_{w_i} R \omega^2 \quad \Rightarrow \quad m_{w_i} = m_w \frac{\rho}{R} \tag{2.2}$$

$$m_{w_{i1}} = m_{w1} \frac{\rho_1}{R} = 586,186 \frac{24,88}{45} = 324,157 \text{ g}$$

$$m_{w_{i2}} = m_{w2} \frac{\rho_2}{R} = 611,083 \frac{25,83}{45} = 350,843 \text{ g}$$

$$m_c = m_{cp} + m_{w_{i1}} + m_{w_{i2}} \tag{2.3}$$

$$m_c = 380,116 + 324,157 + 350,843 = 1055,116 \text{ g}$$

Hesaplamalarda kullanılan sayısal veriler Mehmet Olgun'un "Tek Silindirli Bir Motorun Atalet Kuvvetlerinin Analizi ve Dengeleme Hesaplamaları" konulu tez çalışmasından alınmıştır.

2.1.3 Biyel grubu kütlesi

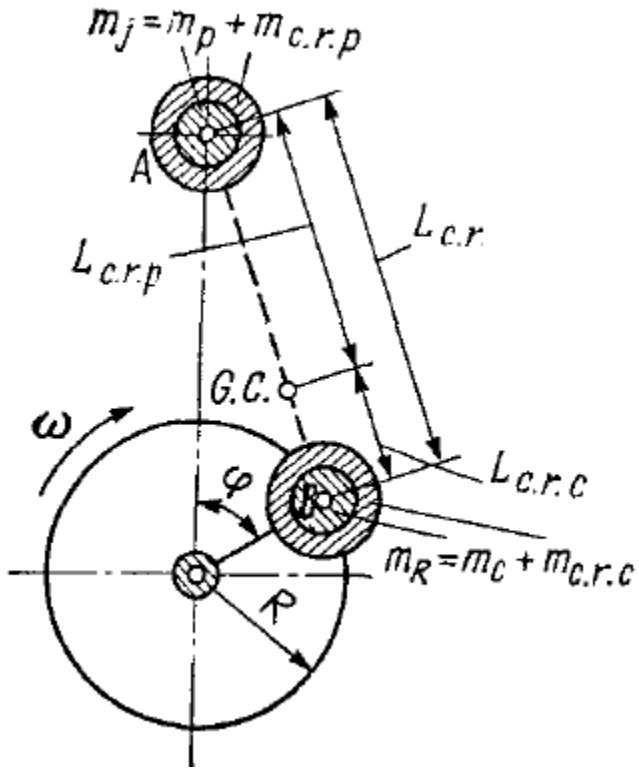
Motorun gerçek konstrüksiyonu bilinmediği durumlarda biyel kütlesinin %20-%30'u piston pernosu etrafında, %70-%80'i biyel muylusu etrafında toplanmış olarak kabul edilir. Biyel konstrüksiyonunun bilinmesi durumunda ise bir CAD programı yardımıyla biyelin ağırlık merkezi tespit edilir ve bu şekilde kütle indirgemesi yapılır [3].

Biyel kütlesinin indirgenmesinde, oluşturulan modelin statik ve dinamik açıdan gerçek biyele eşdeğer olacak şekilde biyel kütlesinin indirgenmesi gerekir. Biyel grubu; biyel kolu, kep, burç, yataklar ve cıvatalardan oluşmaktadır.

Biyel kütlesinin indirgenmesinde şu şartlar sağlanmalıdır:

- Biyelin indirgenmiş kütlelerinin toplamı biyel kütlesine eşit olmalı.
- İndirgenmiş kütlelerin bileşik ağırlık merkezi biyelin ağırlık merkezi ile aynı olmalı.
- Sistemin ağırlık merkezine göre atalet momenti, biyelin kendi ağırlık merkezine göre olan atalet momentine eşit olmalı.[1]

Yapılan hesaplamalarda biyel kütlesi piston perno eksenine ve biyel muylusu eksenine indirgenmiştir. Bu yönteme iki kütle metodu denilmektedir ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : İki kütle metoduna göre biyel grubunun indirgenmesi.

$$m_{crp} + m_{crc} = m_b \qquad \textbf{(2.4)}$$

$$m_{crp}L_{crp} = m_{crc}L_{crc} \quad \Rightarrow \quad m_{crp}=m_{crc}\frac{L_{crc}}{L_{crp}} \tag{2.5}$$

$$m_b = m_{crc}\frac{L_{crc}}{L_{crp}} + m_{crc} \quad \Rightarrow \quad m_b=\frac{m_{crc}L_{crc}+m_{crc}L_{crp}}{L_{crp}}=\frac{m_{crc}\left(L_{crc}+L_{crp}\right)}{L_{crp}} \tag{2.6}$$

$$m_{crc} = m_b\frac{L_{crp}}{L_{crp}+L_{crc}} \tag{2.7}$$

$$m_{crp} = m_b\frac{L_{crc}}{L_{crp}+L_{crc}} \tag{2.8}$$

$$m_b = m_{biyelkol} + m_{kep} + 2m_{kolyatak} + 2m_{cıvata} + m_{burc} \tag{2.9}$$

$$m_b = 492,6 + 201,4 + 2\times 25 + 2\times 20 + 30 = 814 \text{ g}$$

Biyelin ağırlık merkezi CAD programı kullanılarak bulunmuştur. Buna göre L_{crc}=42,32 mm ve L_{crp}=102,68 mm olarak okunmuştur.

$$m_{crc} = m_b\frac{L_{crp}}{L_{crp}+L_{crc}} = 814\frac{102,68}{102,68+42,32} = 576,43 \text{ g}$$

$$m_{crp} = m_b\frac{L_{crc}}{L_{crp}+L_{crc}} = 814\frac{42,32}{102,68+42,32} = 237,56 \text{ g}$$

2.2 Hareket Eden Parçaların Oluşturduğu Kuvvetler

Krank-biyel mekanizmasında hareket eden kütleleri üç grupta toplamak mümkündür.

2.2.1 Sadece öteleme hareketi yapan kütlelerin atalet kuvvetleri

Sadece öteleme hareketi yapan kütleler, piston pernosunda toplanmış kütlelerdir. Bu kütlelerin etkisiyle oluşan kuvvet, silindir ekseni doğrultusunda piston hareketi ile ters yöndedir.[2]

$$m_j = m_p + m_{crp} \tag{2.10}$$

$$m_j = m_p + m_{crp} = 712,78 + 237,56 = 950,45 \text{ g}$$

Piston ivmesi;

$$j = -R\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha) \tag{2.11}$$

$$P_j = -m_j R\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha) \quad \textbf{(2.12)}$$

Bu serinin ilk terimine birinci dereceden atalet kuvveti denir.

$$P_{j_1} = -m_j R\omega^2 \cos\alpha \quad \textbf{(2.13)}$$

Bu serinin ikinci terimine ise ikinci dereceden atalet kuvveti denir.

$$P_{j_2} = -m_j R\omega^2 \lambda\cos 2\alpha \quad \textbf{(2.14)}$$

2.2.2 Sadece dönme hareketi yapan kütlelerin merkezkaç kuvveti

Sadece dönme hareketi yapan kütleler, biyel muylusunda toplanmış kütlelerdir. Bu kütlelerin etkisiyle oluşan kuvvet, krank kolu doğrultusunda ve krank ekseninden biyel muylusu yönündedir.[2]

$$m_R = m_c + m_{crc} \quad \textbf{(2.15)}$$

$$m_R = m_c + m_{crc} = 1055{,}116 + 576{,}436 = 1631{,}552 \text{ g}$$

$$K_R = m_R R\omega^2 \quad \textbf{(2.16)}$$

$$K_R = m_R R\omega^2 = \frac{1631{,}552}{1000} \times \frac{45}{1000} \times \left(\frac{\pi 3000}{30}\right)^2 = 7246{,}247 \text{ N}$$

2.2.3 Hem dönme hem öteleme hareketi yapan kütlenin oluşturduğu kuvvetler

Hem dönme hem öteleme hareketi yapan kütle üç kütle metodunda söz konusu olmaktadır. Yapılan hesaplamalarda iki kütle metodu kullanıldığı için hem dönme hem öteleme hareketi yapan kütlenin oluşturduğu kuvvetler göz ardı edilmiştir.

3. TEĞETSEL KUVVETLER DİYAGRAMI

T=f(α) eğrisine teğetsel kuvvetler diyagramı denir. Bu diyagramda apsise α krank dönme açıları ve ordinata da krank muylusunda tatbik edilmiş T teğetsel kuvvetleri konmuştur. Teğetsel kuvvet ile radyal kuvvetin krank mili açısına (ºKMA) bağlı değişimi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

M_d=f(α) eğrisine ise döndürme momentleri diyagramı denir. M_d=T.r olduğu düşünülürse, uygun bir ölçek değiştirmesiyle, T=f(α) diyagramının aynı zamanda M_d= f(α) yı da temsil ettiği görülür [2].

Teğetsel kuvvetler diyagramı aşağıdaki maksatlar için çizilir:

- Krank muylusuna tesir eden toplam kuvveti belirtmek
- Döndürme momentinin düzgünlüğünün tayini
- Volanın seçimi

3.1 Pistona Tesir Eden Kuvvetler

Pistona (işleme esnasında) aşağıdaki kuvvetler tesir ederler:

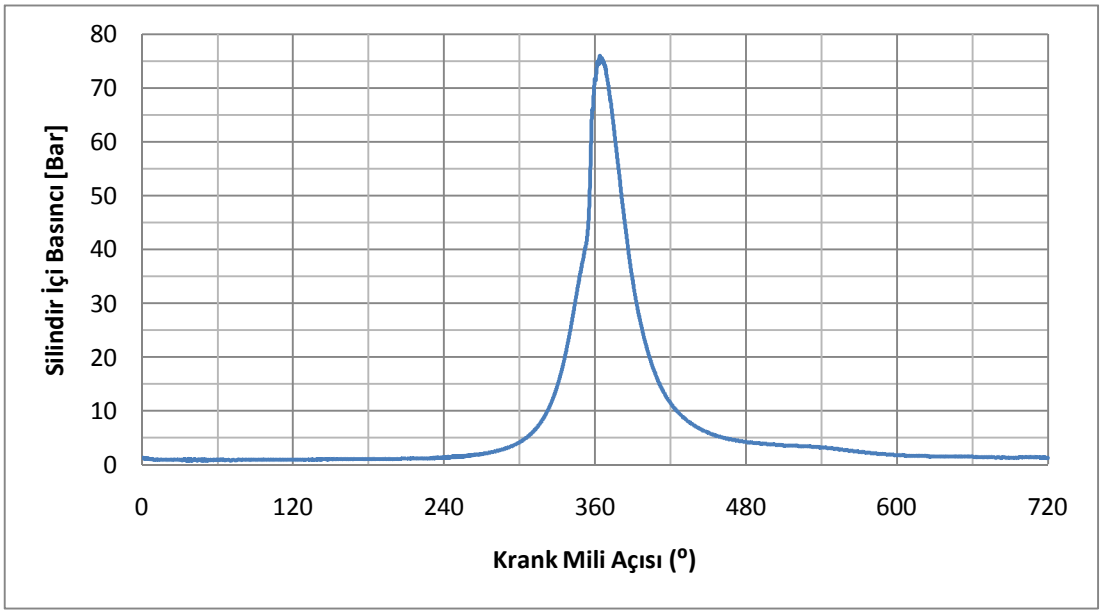
- Gaz, buhar v.s. basınç kuvvetleri
- Öteleme hareketi yapan parçaların atalet kuvvetleri
- Öteleme hareketi yapan parçaların ağırlık kuvvetleri (düşey eksenli makinelerde)

3.1.1 Gaz kuvvetleri

İş yapan maddenin basınç kuvvetleri, indikatör diyagramından bulunmuştur. Burada, indikatör diyagramının kuvvetleri değil, fakat piston yüzeyine tesir eden basınçları gösterdiğini hatırdan çıkarmamalıdır.

3 LD 510 motorun gaz kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan indikatör diyagramı verileri 2008 yılında Müh. Hakkı Can Koman tarafından gerçekleştirilen "İçten Yanmalı Motorlarda İndikatör Diyagramının Çıkarılması ve Analizi" konulu yüksek

lisans tez çalışmasından alınmıştır. 0,1 ºKMA hassasiyetle ölçülen silindir içi basınç değerlerine göre Şekil 3.1'de ki silindir içi basıncının ºKMA'na bağlı değişimi çizdirilmiştir [4].



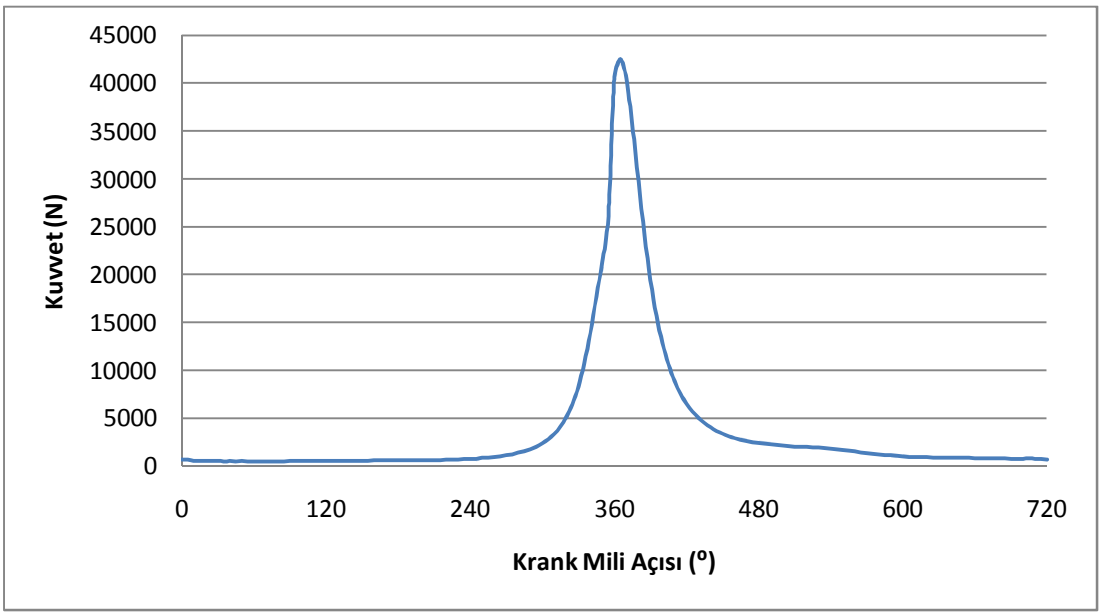
Şekil 3.1 : Silindir içi basıncının ºKMA'na bağlı değişimi.

Pistona tesir eden kuvvetleri toplarken, indikatör diyagramında okunan değerler $\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$ e eşit olan piston alanıyla çarpılmalıdır.

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} \tag{3.1}$$

$$D = 85 \text{ mm} \Rightarrow A_p = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (85/1000)^2}{4} = 0,005674502 \text{ m}^2$$

Piston yüzey alanının silindir içi basınç değerleriyle çarpılması sonucu elde edilen gaz kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi Şekil 3.2'da gösterilmiştir. Buna göre maksimum gaz kuvveti 365º KMA'da 42545,774 N ve minimum gaz kuvveti ise 35º KMA'da 453,024 N'dur.



Şekil 3.2 : Gaz kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi.

3.1.2 Atalet kuvvetleri

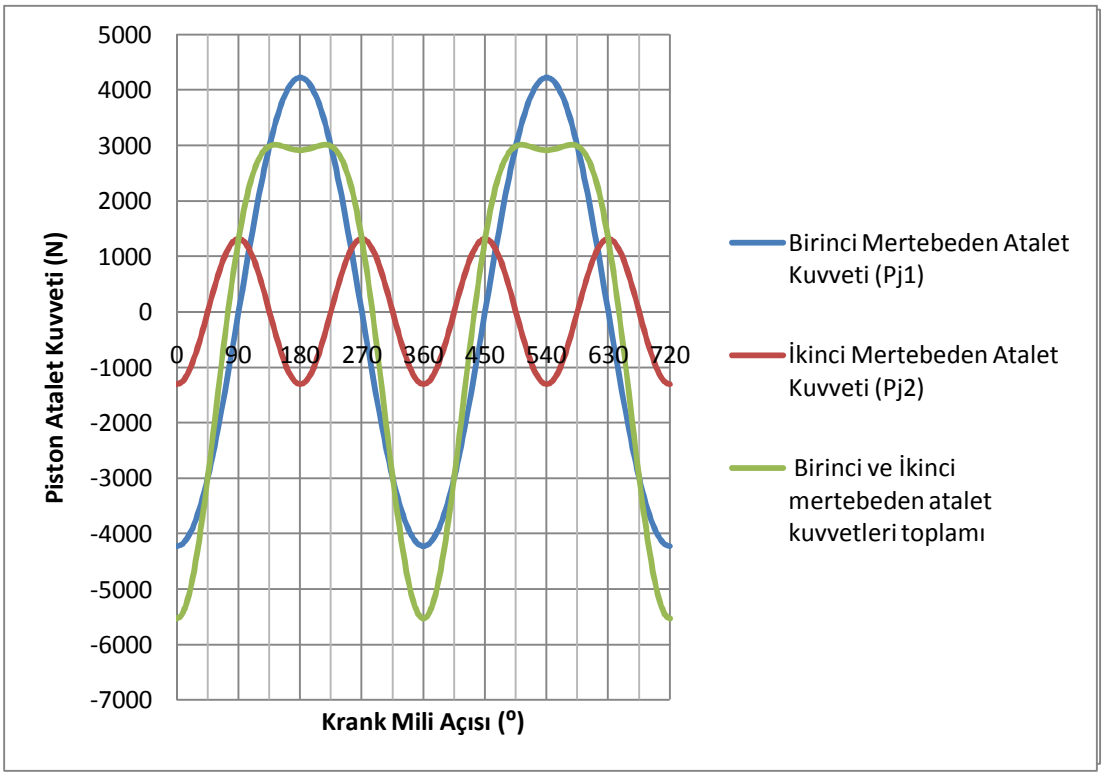
Öteleme hareketi yapan parçaların atalet kuvvetleri Bölüm 2.2.1'de anlatılmıştır.

$$P_{j_1} = -m_j R w^2 \cos\alpha = -\frac{950,45}{1000} \times \frac{45}{1000} \times \left(\frac{\pi 3000}{30}\right)^2 \times \cos\alpha = -4221,28\cos\alpha$$

$$P_{j_2} = -m_j R w^2 \lambda \cos 2\alpha = -\frac{950,45}{1000} \times \frac{45}{1000} \times \left(\frac{\pi 3000}{30}\right)^2 \times \frac{45}{145} \times \cos 2\alpha = -1310,05\cos 2\alpha$$

$$P_j = P_{j_1} + P_{j_2} = -m_j R w^2 (\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha) = -4221,28\cos\alpha - 1310,05\cos 2\alpha$$

Yapılan atalet kuvveti hesaplamalarına göre atalet kuvvetlerinin krank mili açısına bağlı değişimi Şekil 3.3'te görülmektedir.



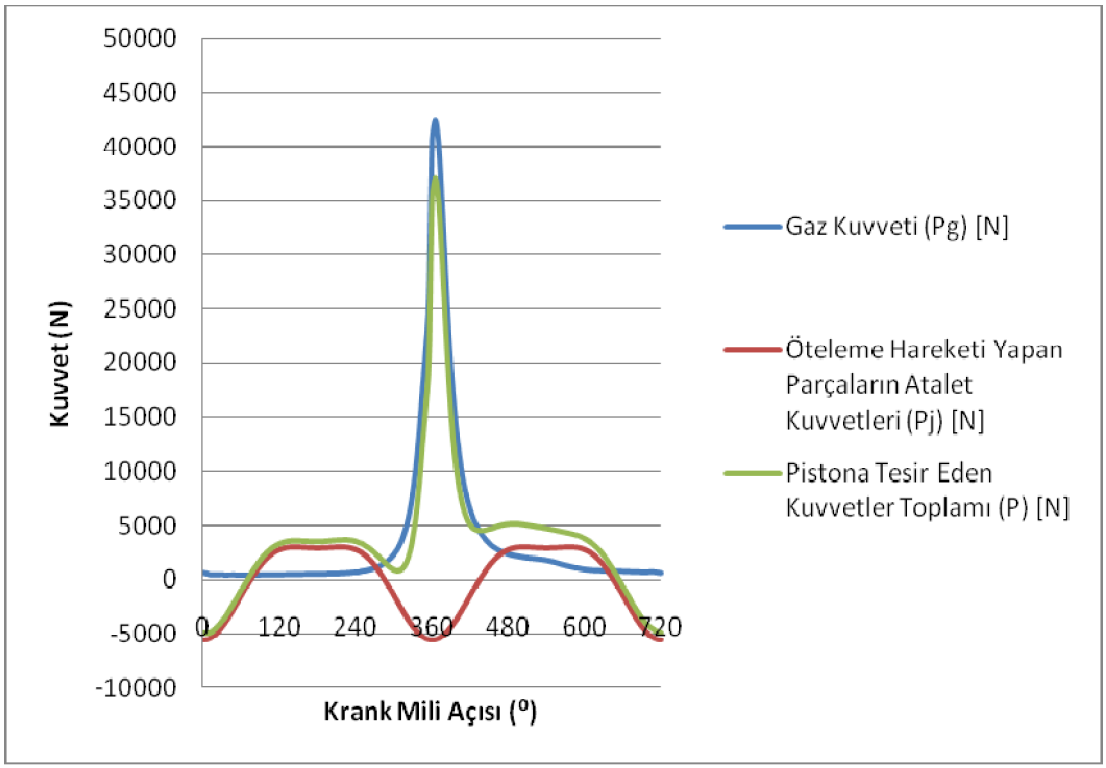
Şekil 3.3 : Piston atalet kuvvetlerinin ºKMA'na bağlı değişimi.

3.1.3 Ağırlık kuvvetleri

Öteleme hareketi yapan parçaların ağırlık kuvvetleri, ancak hızı az (ağır) makinelerde göz önüne alınmaktadır. Hızlı motorlarda bunlar düşünülmeyebilir, çünkü meydana gelen atalet kuvvetlerine göre küçüktürler. Bu nedenle 3 LD 510 motorla ilgili yapılan hesaplamalarda ağırlık kuvvetleri ihmal edilmiştir [2].

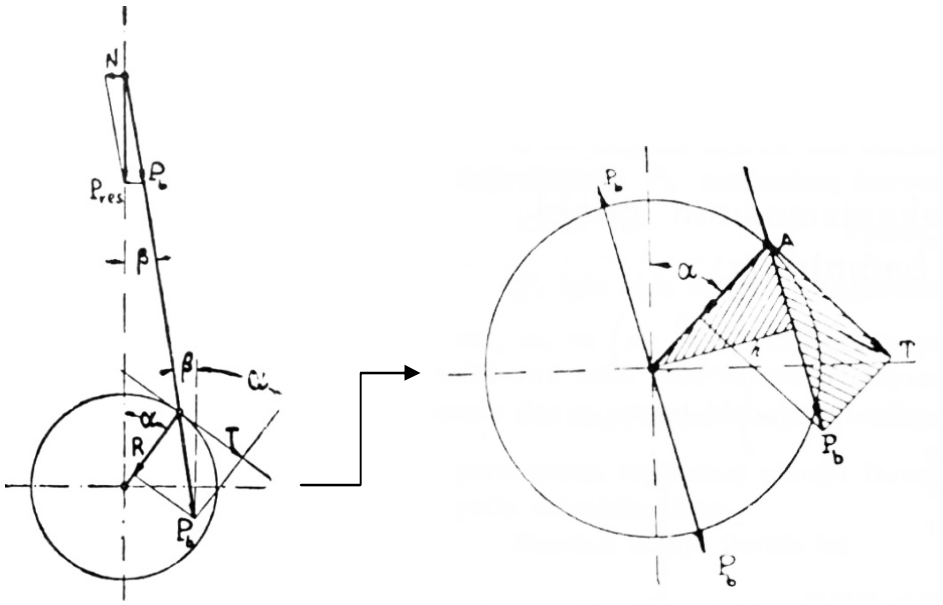
3.2 Pistona Tesir Eden Toplam Kuvvetler Diyagramının Çizilmesi

Pistona gaz kuvvetleri ve atalet kuvvetleri etki etmektedir. Bu etki altında pistona etki eden toplam kuvvetler diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Pistona etki eden toplam kuvvetler sayesinde teğetsel ve radyal kuvvetler hesaplanabilecektir. Pistona etki eden maksimum kuvvet 365º KMA'da 37050,400 N olmaktadır.



Şekil 3.4 : Pistona tesir eden toplam kuvvetler.

3.3 Teğetsel ve Radyal Kuvvetin Bulunması



Şekil 3.5 : Teğetsel ve radyal kuvvetin şematik gösterimi[2].

P_{res} kuvveti iki bileşene ayrılır. Biyel ekseni boyunca olan kuvvet;

$$P_b = \frac{P_{res}}{\cos\beta} \qquad \textbf{(3.2)}$$

ve silindir eksenine dik kuvvet ise;

$$N = \mathrm{P}_{res} \tan\beta \qquad \textbf{(3.3)}$$

olur. Buna kısaca normal kuvvet denilmektedir.

P_b kuvveti krank muylusuna taşınır. Krank milinin dönme merkezine P_b'ye paralel ve aksi yönde iki P_b kuvveti uygulanır. Bunlardan biriyle beraber P_b kuvveti, $P_b h$ gibi bir kuvvet çifti oluşturur. Bu çift, motorun döndürme momentine eşittir.

Taranmış üçgenlerin benzerliğinden (Şekil 3.5);

$$\frac{h}{r} = \frac{T}{P_b} \qquad \textbf{(3.4)}$$

yazılabilir. Buradan

$$P_b h = Tr = M_d \qquad \textbf{(3.5)}$$

bulunur. Formülde T, teğetsel kuvveti gösterir.

Teğetsel kuvvet; yönü krankın dönme yönü ile aynı veya aksi olduğuna göre pozitif veya negatiftir. Teğetsel kuvvetin işaretinin pistona tesir eden bileşke kuvvetin yönüne bağlı olduğu görülmektedir.

Tatbikatta teğetsel kuvvetlerin belirtilmesinde yanlışlığa meydan vermemek için, gerek gaz ve gerekse atalet kuvvetlerini pistonun hareketine göre çizmek uygun olur.

$$T = P_b \sin(\alpha + \beta) \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$\left.\begin{aligned} P_b &= \frac{P_{res}}{\cos\beta} \\ T &= P_b \sin(\alpha+\beta) \end{aligned}\right\} \Rightarrow T = P\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta} \qquad \textbf{(3.7)}$$

Basitlik için P_{res} P olarak yazılmıştır.

Bu durumda radyal kuvvet,

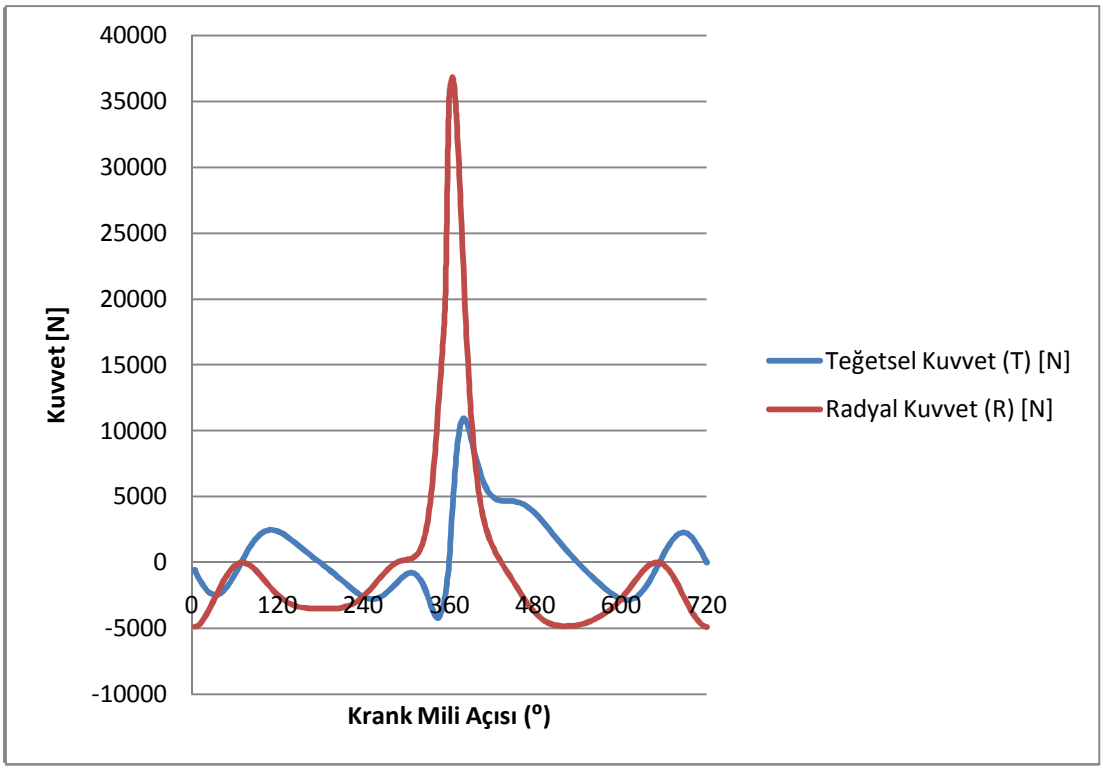
$$R = P\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta} \qquad \textbf{(3.8)}$$

olmaktadır.

$$\tan\beta \cong \sin\beta = \lambda \sin\alpha \Rightarrow T = P\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha\right) \qquad \textbf{(3.9)}$$

$$\tan\beta \cong \sin\beta = \lambda \sin\alpha \Rightarrow R = P(\cos\alpha - \lambda \sin^2\alpha) \qquad \textbf{(3.10)}$$

yaklaşık formülleri bulunur. Bu basitleştirmelere göre çizilen teğetsel ve radyal kuvvetin KMA ile değişimini gösteren grafik Şekil 3.6'da görülmektedir [2].



Şekil 3.6 : Krank mili muylusuna etki eden teğetsel (T) ve radyal (R) kuvvetlerin ºKMA'na bağlı olarak değişimi.

Maksimum teğetsel kuvvet 380 ºKMA'da 10940,69 N olurken maksimum radyal kuvvette 365 ºKMA'da 36822,06 N olmaktadır.

4. KRANK MUYLUSUNA GELEN YATAK KUVVETLERİNİN HESAPLANMASI

Krank muylusundaki yatak sırf ait olduğu krank-biyel mekanizmasından gelen kuvvetleri karşılamalıdır. Makine rejim halinde iken bunlar gaz kuvvetlerinden, biyelin dönme hareketi yapan kısmının atalet kuvvetlerinden, gidip-gelen kütlelerin atalet kuvvetlerinden ibarettir. Makinenin çalıştırılması esnasında sırf gaz kuvvetleri tesirli olabilir.

Gaz kuvvetleri ve gidip-gelen kütlelerin atalet kuvvetleri piston pernosunda tesir ederler; bu noktada, bilindiği gibi, N normal kuvveti de uygulanmıştır. Bu kuvvetler biyel doğrultusunda tesir eden P_{st} kuvvetini meydana getirmektedir.

Biyelin dönen kısmının atalet kuvvetlerinin krank muylusunda tesir ettiğinden, P_{st} biyel kuvveti de bu noktaya taşınmalı ve orada sözü geçen merkezkaç kuvvetle (krankın bütün konumları için) toplanmalıdır [2].

4.1 Standart Motorun Krank Muylusuna Gelen Yatak Kuvvetlerinin Hesaplanması

3 LD 510 standart motorun krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri hem teorik olarak hem de Adams programı kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik hesaplamalarla Adams'ta yapılan hesaplamalar arasındaki sapma bulunarak Adams'ta kurulan model doğrulanmaya çalışılmıştır.

4.1.1 Teorik hesaplamalar

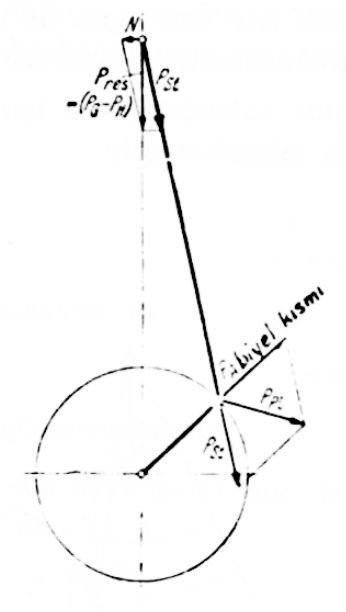
4.1.1.1 Biyel kuvvetinin bulunması (P_{st})

Bunun için ilk önce silindir ekseni boyunca tesir eden ve piston pernosuna tatbik edilen toplam kuvvetleri belirtmek lazımdır. P_{st} biyel kuvveti krank muylusunda tesir ettiğinden; gaz ve atalet kuvvetlerini doğrudan doğruya açılmış krank dairesine göre çizmek uygun olur.

Gaz kuvvetleri indikatör diyagramından alınmakta ve tekabül eden krank açısı üzerine çizilmektedir (Şekil 3.2).

Gidip - gelen kütlelerin atalet kuvvetleri de bilinen tarzda aynı diyagram üzerine taşınmaktadır. Gaz kuvvetlerine ve atalet kuvvetlerine ait eğrilerin toplanması, piston pernosunda tesir eden toplam kuvvetin zamana göre değişimini vermektedir (Şekil 3.4).

Şekil 3.4'teki diyagramdan muhtelif krank açıları için alınan toplam piston kuvvetleri, krank-biyel mekanizmasının tekabül eden durumlarına göre N normal ve P_{st} biyel kuvvetlerine ayrılmaktadırlar (Şekil 4.1) [2].



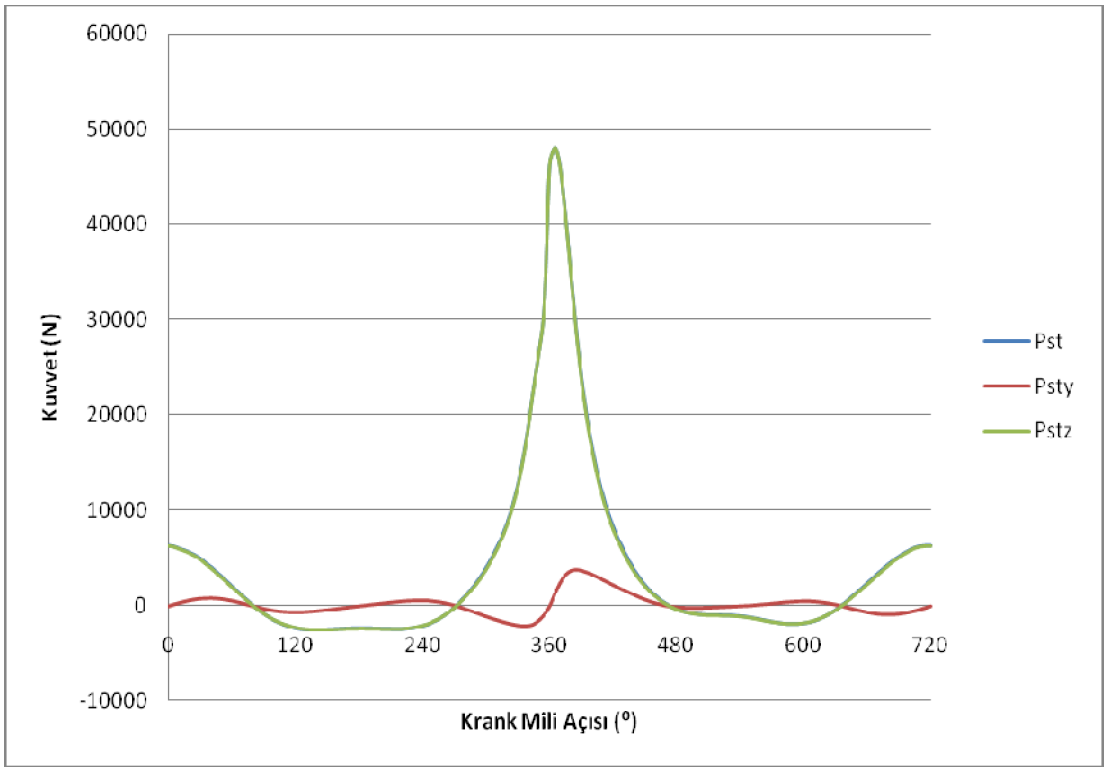
Şekil 4.1 : Krank muylusuna gelen kuvvetler [2].

$$\left.\begin{aligned} P_{st} = P_b = \frac{P_{Res}}{\cos\beta} = \frac{P_G - P_J}{\cos\beta} \\ \sin\beta = \lambda \sin\alpha \Rightarrow \beta = \arcsin(\lambda \sin\alpha) \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_{st} = \frac{P_G - P_J}{\cos\left[\arcsin(\lambda \sin\alpha)\right]} \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$P_{st_y} = P_{st} \sin\beta \qquad \textbf{(4.2)}$$

$$P_{st_z} = P_{st} \cos\beta \qquad \textbf{(4.3)}$$

Yapılan hesaplamalara göre biyel kuvvetinin krank mili açısına bağlı değişimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Biyel kuvveti bileşenlerinin ºKMA'na bağlı değişimi.

4.1.1.2 Yatak kuvvetinin bulunması (P_{Pi})

Dönen kütlelerin atalet kuvvetleri hesaplanırken biyel yatağı için sırf biyelin dönen kısmı göz önüne alınmalıdır.

Dönen kütle;

$$m_{RS} = m_s \frac{a}{l} \tag{4.4}$$

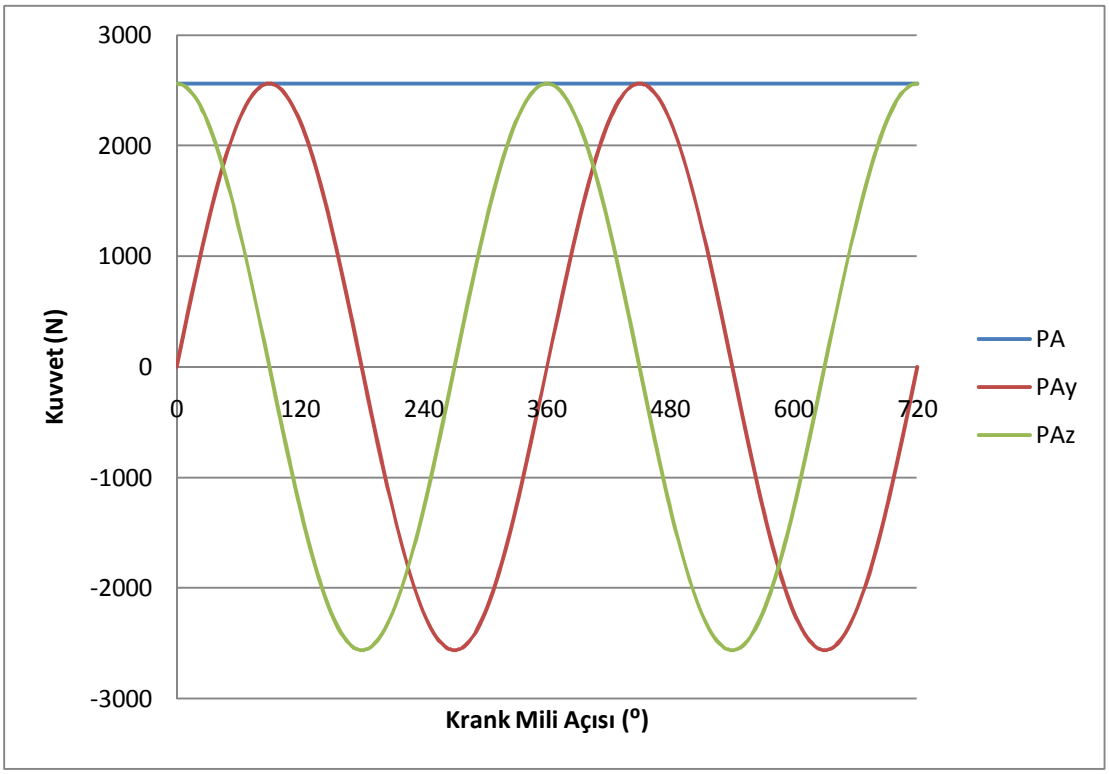
Merkezkaç kuvvet olarak tesir eden atalet kuvveti;

$$P_{A(biyel\ kısmı)} = m_{RS} r w^2 = m_s \frac{a}{l} r w^2 \tag{4.5}$$

değerinde olup, bütün dönüş zarfında sabittir.

$$P_{A_y} = P_A \sin\alpha \tag{4.6}$$

$$P_{A_z} = P_A \cos\alpha \tag{4.7}$$



Şekil 4.3 : Biyelde merkezkaç kuvvet olarak tesir eden atalet kuvveti bileşenlerinin ºKMA'na bağlı değişimi.

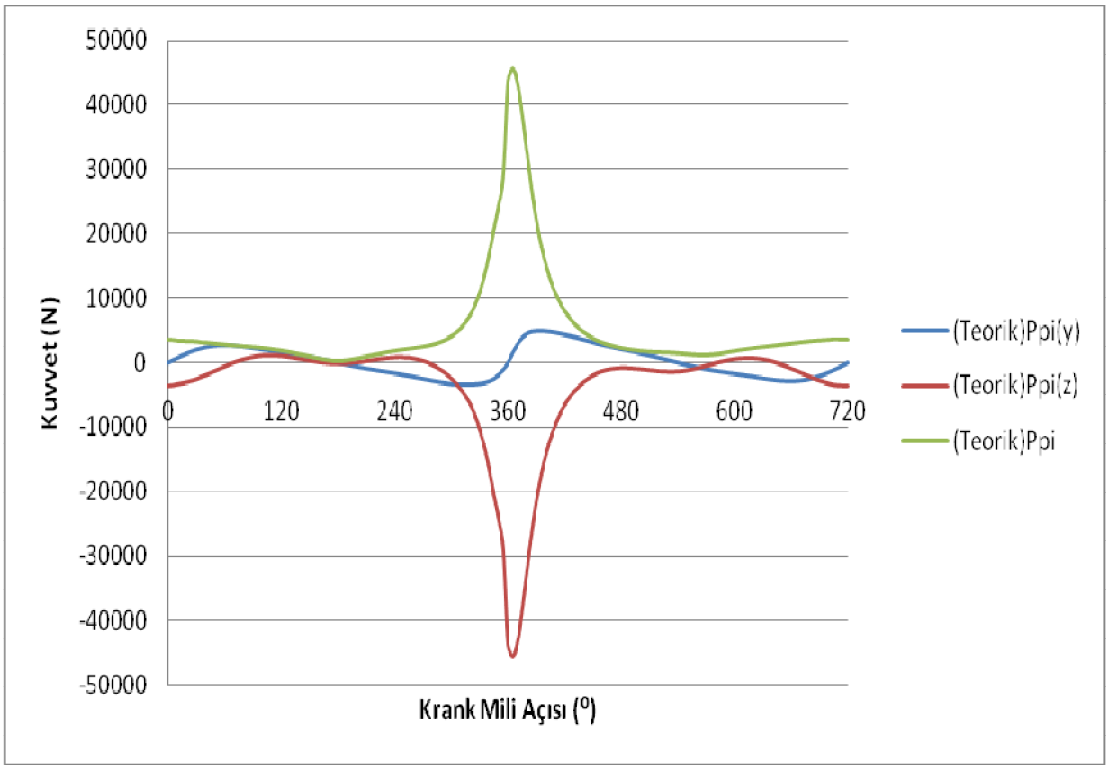
Yatak kuvveti muhtelif krank durumları için, $P_{A(\text{biyel kısmı})}$ merkezkaç kuvvetlerinin ve bu noktada tesir eden P_{st} biyel kuvvetinin geometrik toplanmasıyla belirtilmiş olur (Şekil 4.4) [2].

$$P_{pi} = \sqrt{P_{pi_y}{}^2 + P_{pi_z}{}^2} \tag{4.8}$$

$$P_{pi_y} = P_{A_y} + P_{st_y} = P_A \sin\alpha + P_{st} \sin\beta = P_A \sin\alpha + P_{st}\lambda \sin\alpha \tag{4.9}$$

$$P_{pi_z} = P_{A_z} - P_{st_z} = P_A \cos\alpha - P_{st} \cos\beta = P_A \cos\alpha - P_{st} \cos\left[\arcsin(\lambda \sin\alpha)\right] \tag{4.10}$$

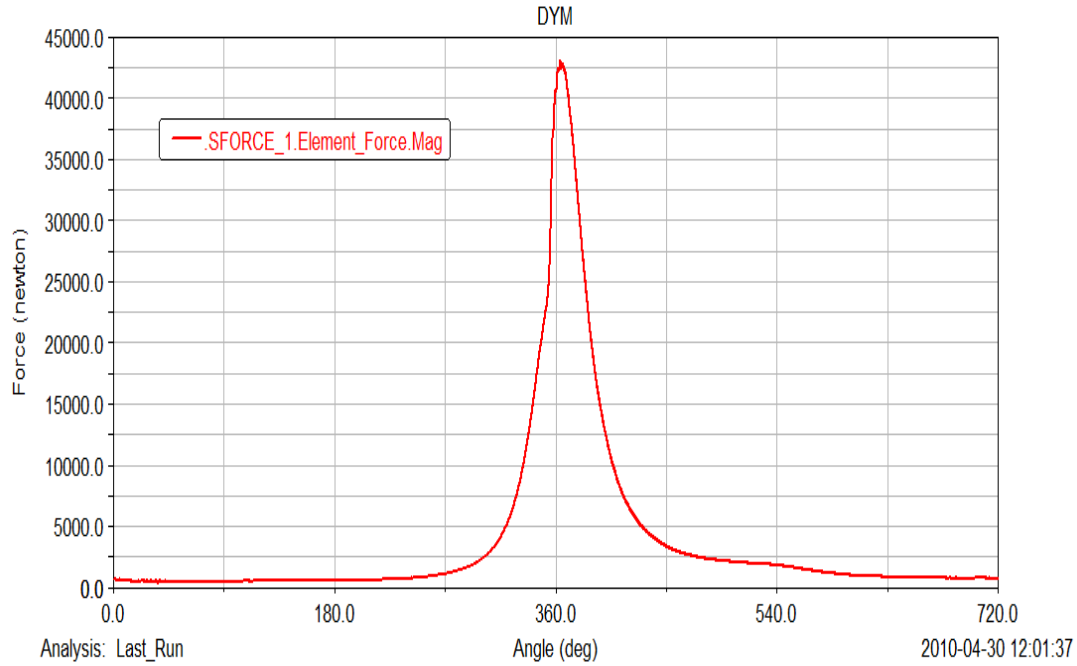
$$P_{pi} = \sqrt{P_{pi_y}{}^2 + P_{pi_z}{}^2}$$
$$P_{pi} = \sqrt{\left(P_A \sin\alpha + P_{st}\lambda \sin\alpha\right)^2 + \left[P_A \cos\alpha - P_{st} \cos\left(\arcsin(\lambda \sin\alpha)\right)\right]^2} \tag{4.11}$$



Şekil 4.4 : Krank muylusu yatak kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi.

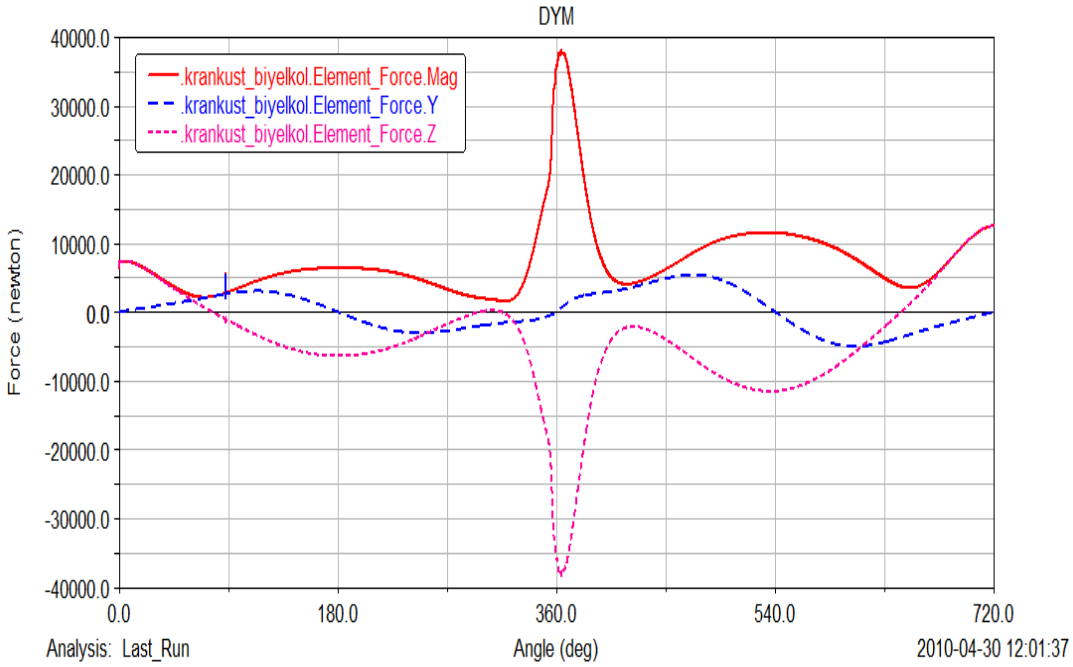
4.1.2 Adams analizi

3 LD 510 motorun 0,1º KMA hassasiyetle ölçülen indikatör diyagramı verileri Adams'a aktarılmak suretiyle gaz kuvveti etkisi altında analizler yapılmıştır. İndikatör diyagramı verileri txt uzantılı dosya olarak kaydedilip bu verilere göre eğri oluşturacak şekilde Adams'ta çalışılan modelin bulunduğu dosyanın içine aktarılmıştır. Piston yüzeyinden biyel kolu doğrultusunda gerçek gaz kuvvetini modelleyebilmek için bir kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvetin özellikleri değiştirilerek indikatör diyagramından alınan verilerin eğrisine göre çalıştırılması sağlanmıştır. Böylece Adams'ta yapılan analizlere göre gaz kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Buna göre maksimum gaz kuvveti 363,8º KMA'da 43129,5492 N olmuştur [5].



Şekil 4.5 : Adams analizinde gaz kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi.

Gaz kuvvetlerinin etkisi altında yapılan analizlerde krank muylusuna gelen yatak kuvveti ve bileşenleri Şekil 4.6'da görülmektedir. Krank muylusundaki yatak kuvveti krank ile biyeli bağlayan küresel joint üzerinden okunmuştur. Bu durumda krank muylusundaki maksimum yatak kuvveti 363,7º KMA'da 38266,9101 N olmuştur. Dikey yönün Z yönü olması ve gaz kuvvetinin de bu yönde etki etmesi nedeniyle maksimum yatak kuvvetinin oluşmasında Z yönündeki kuvvetin önemi büyüktür.



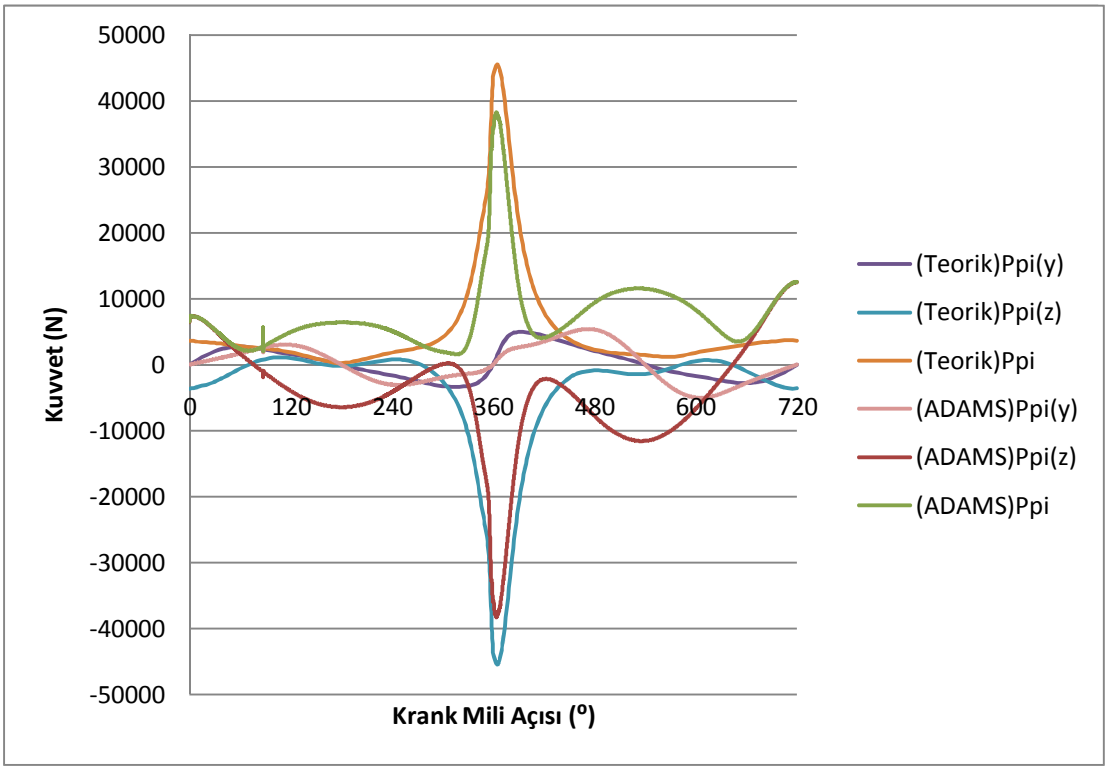
Şekil 4.6 : Adams analizinde krank muylusu yatak kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi.

4.1.3 Teorik hesaplamalarla Adams'ın karşılaştırılması

Standart motorda krank muylusuna gelen yatak kuvvetinin teorik ile Adams karşılaştırması Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Teorik hesaplamalardaki maksimum yatak kuvveti ile Adams'ta yapılan analiz sonucunda bulunan maksimum yatak kuvveti kıyaslanarak Adams'ta kurulan modelin doğruluğu gösterilmeye çalışılmıştır.

Teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen P_{pi} yatak kuvvetinin maksimum değeri 45516,24 N'dur. Adams'ta yapılan analizler sonucunda elde edilen P_{pi} yatak kuvvetinin maksimum değeri ise 38266,91 N'dur.

Bu durumda teorik hesaplama ile Adams arasındaki sapma % olarak $\frac{45516,24-38266,91}{45516,24}\times 100 = 15,9$ olmaktadır.



Şekil 4.7 : Standart motorda krank muylusuna gelen yatak kuvvetinin teorik ile Adams karşılaştırması.

4.2 Çift Mille Dengelenmiş Denge Milli Motorun Krank Muylusuna Gelen Yatak Kuvvetlerinin Hesaplanması

Çift mille dengelenmiş denge milli motorda krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri, standart motorda krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri için yapılan teorik hesaplamalarla Adams arasındaki hata payının kabul edilebilir sınırlarda olması nedeniyle Adams'ta yapılan analizlere göre değerlendirilmiştir.

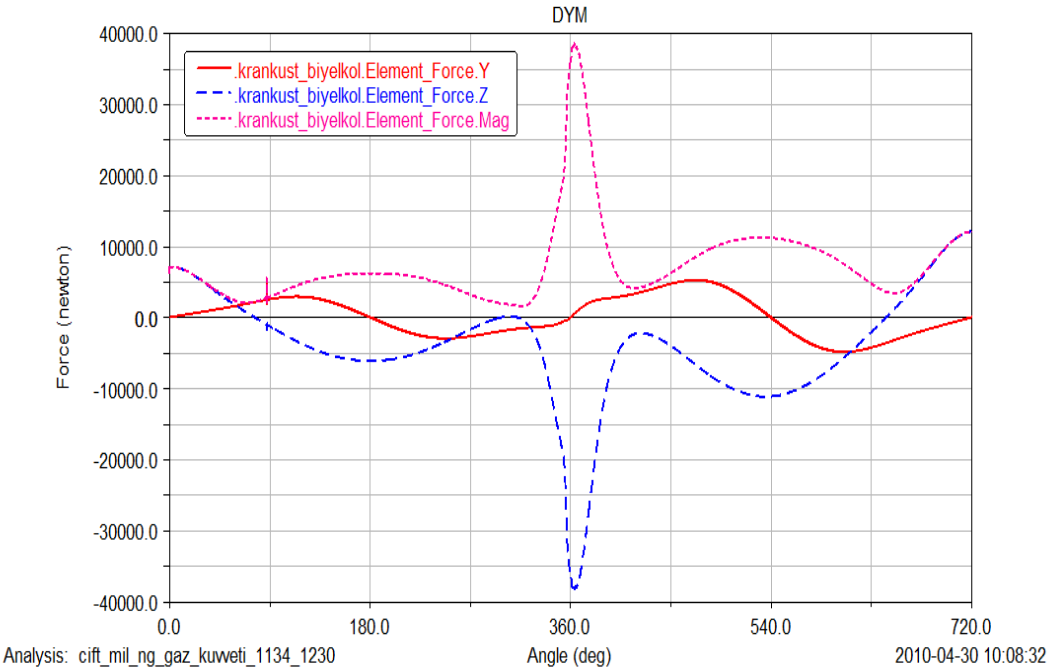
4.2.1 Adams analizi

Gaz kuvvetleri etkisi altında yapılan analizlere göre elde edilen krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Maksimum yatak kuvveti 363,7º KMA'da gerçekleşmiş olup 38541,0291 N'dur.

Bu durum incelendiği zaman çift mille dengelenmiş denge milli motordaki yatak kuvveti ile standart motordaki yatak kuvvetinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Çift mille dengelenmiş motorda krank ağırlığı sadece merkezkaç kuvvetleri dengeleyecek şekilde azaltılmış olmasına rağmen biyel ve piston ağırlığında herhangi bir değişiklik olmaması nedeniyle $P_j = P_{j_1} + P_{j_2} = -m_j R w^2 (\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha)$

formülüne göre toplam atalet kuvvetinde de değişiklik beklenmemektedir. Burada m_j ötelenen parçaların kütlesidir. Yani piston ve biyelin piston tarafına indirgenen kütlesinin toplamıdır.

Aynı şekilde gaz kuvvetleri de standart motordakiyle eşdeğer olduğu için standart motora göre çift mille dengelenmiş motorda pistona etkiyen toplam kuvvette de değişiklik beklenmemektedir. Tüm bu nedenlerle de çift mille dengelenmiş motorda krank muylusundaki maksimum yatak kuvveti, standart motorda ki krank muylusu yatak kuvvetine yakın olmaktadır.



Şekil 4.8 : Adams analizinde çift mille dengelenmiş denge milli motorun krank muylusu yatak kuvvetinin ºKMA'na bağlı değişimi.

5. VOLAN HESABI

Bir motorun döndürme momenti sabit değil, oldukça değişkendir. Ancak, motorlardan oldukça sabit bir döndürme momenti istenmektedir. Döndürme momenti eğrisini düzgünleştirmek için kullanılan araç, silindirik bir kütle olan volandır. Volan, bir enerji depolayıcı olarak görev yapmakta ve herhangi bir çalışma konumundaki devir sayısını yaklaşık olarak sabit tutmaktadır. Motorun döndürme momenti ortalama döndürme momentinin üzerinde olduğunda devir biraz artmakta ve volan bir miktar enerji almaktadır. Bunun aksine, motor momenti ortalama momentin altına düştüğünde ise, devir biraz azalmakta ve volan enerji vermektedir. Böylece volan bir enerji düzenleyici olarak görev yapmakta ve devir sayısı değişimlerini en aza indirmektedir.

Motorun dönen diğer bazı parçaları, örneğin krank mili ve biyelin krank muylusundaki eşdeğer kütlesi de volan etkisi yapmaktadır. Volan etkisi ilk çalıştırma sırasında motorun dönmesi içinde önemlidir. Volan, motorun bütün devirlerinde krank milinin düzgün ve dengeli dönüşünü sağlar. Volan iş zamanında bir kısım enerjiyi üzerine alarak diğer zamanlarda pistonların kolayca üst ölü noktaları aşmasını sağlar [6].

Şimdiye kadar olan hesaplamalarda krank muylusunun hızı $v_m=rw_m=st$ olarak kabul edilmiştir. Gerçekten bu hız, v_{min} ve v_{max} değerleri arasında değişir. Ortalama hız ise bu iki değer arasında yalnız bir yerde olabilir.

Yaklaşık olarak ortalama hız;

$$v_m = \frac{v_{max} + v_{min}}{2} \qquad \textbf{(5.1)}$$

kabul edilir.

Dönme düzgünsüzlüğünü karakterize eden formül ise;

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_m} \tag{5.2}$$

şeklindedir. Buna düzgünsüzlük katsayısı denir. v=rw yazmak suretiyle bu katsayı;

$$\delta = \frac{rw_{\max} - rw_{\min}}{rw_m} = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{w_m} \tag{5.3}$$

şekline girer.

Bazı nadir durumlarda düzgünlük katsayısı kullanılmaktadır, bu da $\frac{1}{\delta}$ 'dır.

δ 'nın değeri, motorun çalıştırılacağı makineye göre değişmektedir. Bu değerler Çizelge 5.1'de görülmektedir [2].

Çizelge 5.1 : δ değerinin kullanım yerine göre değişimi.

	δ
Pompalar ve kompresörler	1/20-1/30
(Pervaneye doğrudan doğruya bağlı) Gemi motorları	1/20-1/40
Takım tezgahları, transmisyon milleri, dokuma makineleri, kağıt makineleri	1/40
Değirmenler	1/50
İplik bükme makineleri (ufak iplik numarası)	1/60
İplik bükme makineleri (büyük iplik numarası)	1/100
Doğru akım üreteci	1/100-1/200
Alternatif akım üreteci	1/300
Taşıt motorları	1/180-1/300
Uçak motorları	1/1000

5.1 Standart Motorda Volan Hesabı

Gaz kuvvetleri etkisi altında standart motorda volanlı ve volansız olmak üzere düzgünsüzlük katsayısının değişimi incelenmiştir.Volansız olarak yapılan analizlerde volanlı olarak yapılan analizlere göre kranktaki devir sayısı değişimlerinin daha fazla olması beklenmektedir. Bu duruma bağlı olarak volansız durumdaki düzgünsüzlük katsayısının da volanlı duruma göre daha büyük olması beklenmektedir.

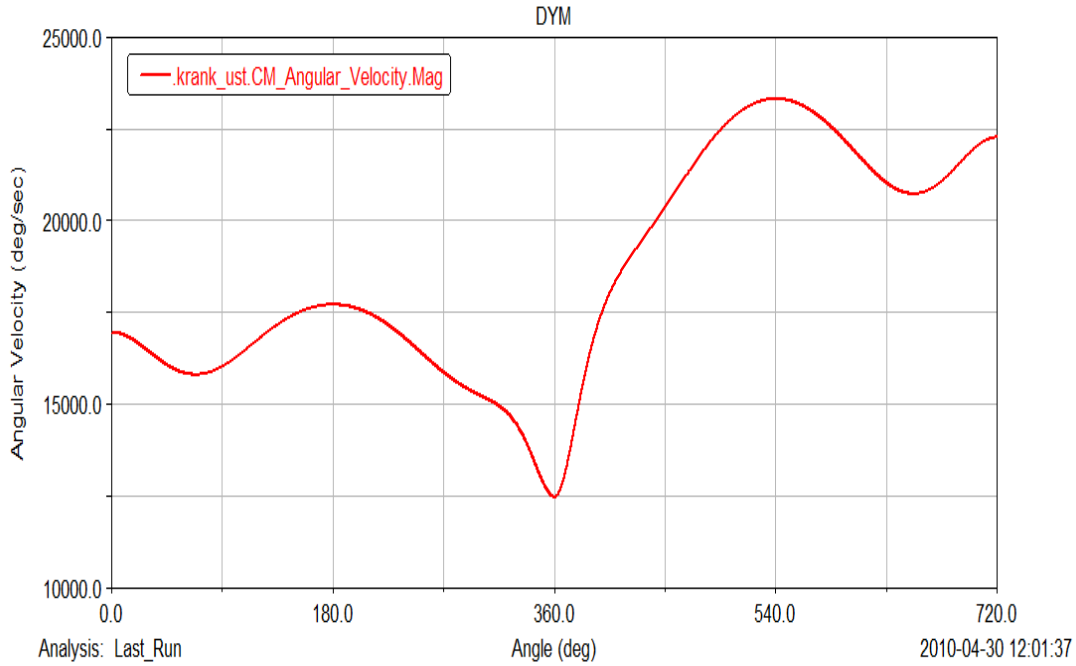
3 LD 510 motorun ortalama devir sayısı 3000 d/dk'dır. Bu nedenle Adams'ta yapılan analizde krankın ortalama 3000 d/dk ile dönmesi istenmektedir. Analiz programında

devir sayısının biriminin derece/sn olması nedeniyle 3000 d/dk olan devir sayısı derece/sn ye dönüştürülmüştür.

$$n_{ort.} = 3000\frac{d}{dk} \times \frac{360derece}{1d} \times \frac{1dk}{60sn} = 18000\frac{derece}{sn} \quad \textbf{(5.4)}$$

Çizelge 5.2 : 3 LD 510 standart motorda kullanılan volanın kütlesi ve atalet momentleri.

Kütle (kg)		14,255391
Atalet Momentleri (kgm^2)	I_{xx}	0,15789
	I_{yy}	0,08286
	I_{zz}	0,08286

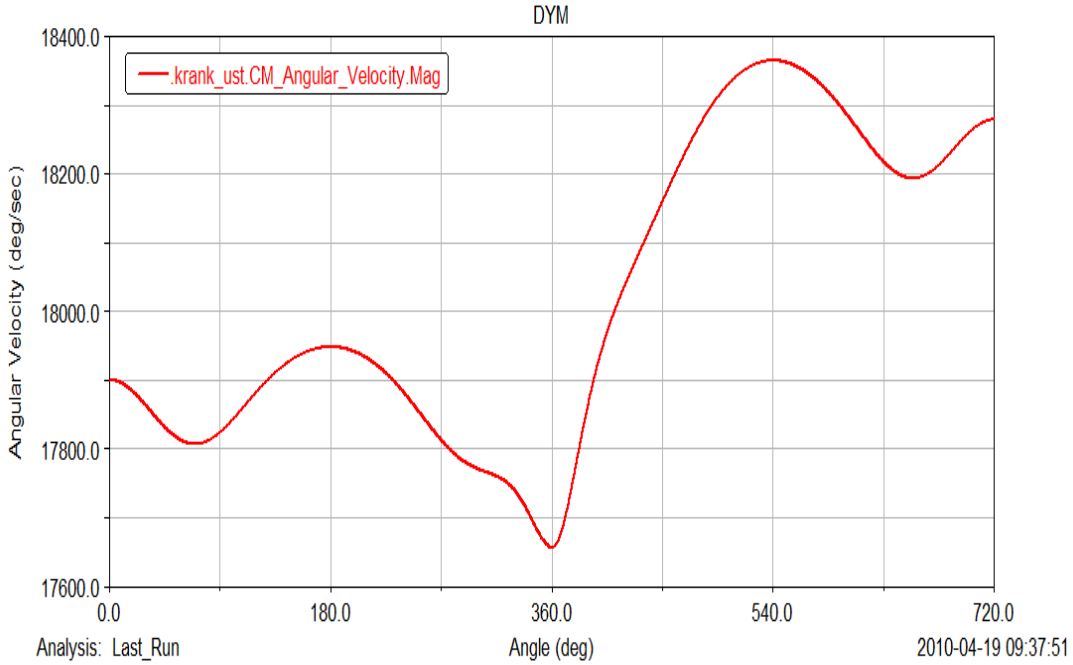


Şekil 5.1 : Volansız standart motorda kranktaki açısal hız değişimi.

Krankın ortalama 18000 derece/sn hızla dönmesi istendiği için Adams'ta yapılan analizlerde krank için ilk hareket hızı 16950 derece/sn olarak belirlenmiştir. Bu sayede krank ortalama 18022,6225 derece/sn lik hızla dönmektedir. Şekil 5.1'de standart motorda volansız durum için kranktaki açısal hız değişimi görülmektedir. Volan olmadığı için kranktaki maksimum ve minimum açısal hız farkı oldukça fazladır [5].

$$\delta = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{w_m} = \frac{23318,0794 - 12465,163}{18022,6225} = 0,6021 = \frac{1}{1,6606}$$

Düzgünsüzlük katsayısı 1/1,66 değeri Çizelge 5.1'de verilen değer aralıklarından hiçbirisini sağlamamaktadır.



Şekil 5.2 : Volanlı standart motorda kranktaki açısal hız değişimi.

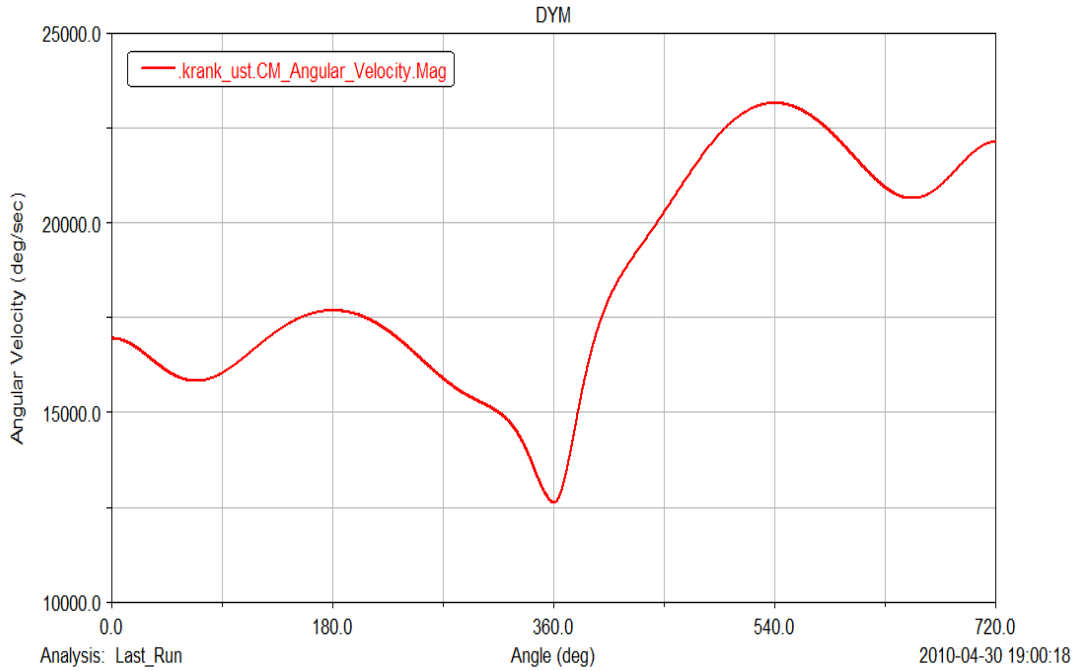
Şekil 5.2'de görülen volanlı standart motorda krankın ortalama 18000 derece/sn hızla dönebilmesi için Adams'ta yapılan analizlerde krank için ilk hareket hızı 17900 derece/sn olarak belirlenmiştir. Bu durumda krank ortalama 18016,9672 derece/sn lik açısal hızla dönmektedir. Volansız duruma göre kranktaki maksimum ve minimum açısal hız farkları azalmıştır [5].

$$\delta = \frac{w_{max} - w_{min}}{w_m} = \frac{18364,626 - 17656,2089}{18016,9672} = 0,0393 = \frac{1}{25,4327}$$

Düzgünsüzlük katsayısı 1/25,4327 değeri Çizelge 5.1'de verilen değer aralıklarından pompalar ve kompresörler için olan aralığa karşılık gelmektedir.

5.2 Çift Mille Dengelenmiş Motorda Volan Hesabı

Çift mille dengelenmiş motorda volansız ve standart motordaki volan kullanılarak Adams'ta analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda düzgünsüzlük katsayıları hesaplanmıştır.

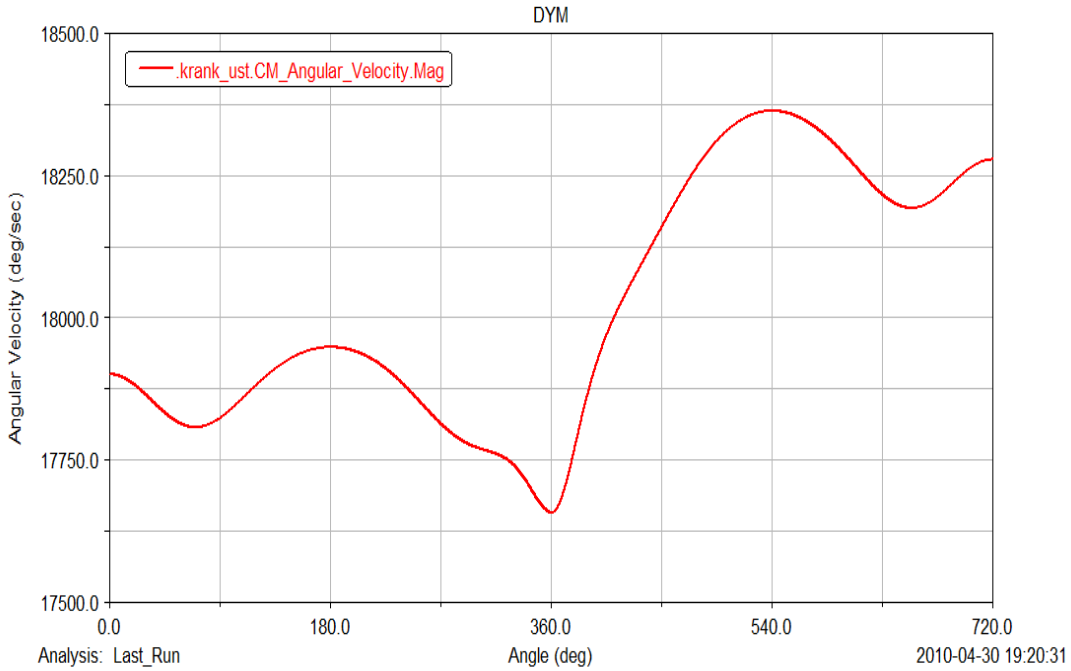


Şekil 5.3 : Volansız çift mille dengelenmiş motorda kranktaki açısal hız değişimi.

Krankın ortalama 18000 derece/sn hızla dönmesi istendiği için Adams'ta yapılan analizlerde krank için ilk hareket hızı 16950 derece/sn olarak belirlenmiştir. Bu sayede krank ortalama 18013,0926 derece/sn lik hızla dönmektedir. Şekil 5.3'te volansız çift mille dengelenmiş motorda kranktaki açısal hız değişimi görülmektedir. Volan olmadığı için kranktaki maksimum ve minimum açısal hız farkı oldukça fazladır.

$$\delta = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{w_m} = \frac{23160,3286 - 12615,5248}{18013,0926} = 0,5853 = \frac{1}{1,7082}$$

Düzgünsüzlük katsayısı 1/1,70 değeri Çizelge 5.1'de verilen değer aralıklarından hiçbirisini sağlamamaktadır.



Şekil 5.4 : Volanlı çift mille dengelenmiş motorda kranktaki açısal hız değişimi.

Şekil 5.4'te görülen volanlı çift mille dengelenmiş motorda krankın ortalama 18000 derece/sn hızla dönebilmesi için Adams'ta yapılan analizlerde krank için ilk hareket hızı 17900 derece/sn olarak belirlenmiştir. Bu durumda krank ortalama 18016,7484 derece/sn lik açısal hızla dönmektedir. Volansız duruma göre kranktaki maksimum ve minimum açısal hız farkları azalmıştır.

$$\delta = \frac{w_{max} - w_{min}}{w_m} = \frac{18363,7425 - 17656,6842}{18016,7484} = 0,0392 = \frac{1}{25,4812}$$

Düzgünsüzlük katsayısı çift mille dengelenmiş motor ile standart motorda oldukça yakındır. Bu nedenle standart motorda kullanılan volan çift mille dengelenmiş motorda da pompa ve kompresör uygulamaları için kullanılabilir.

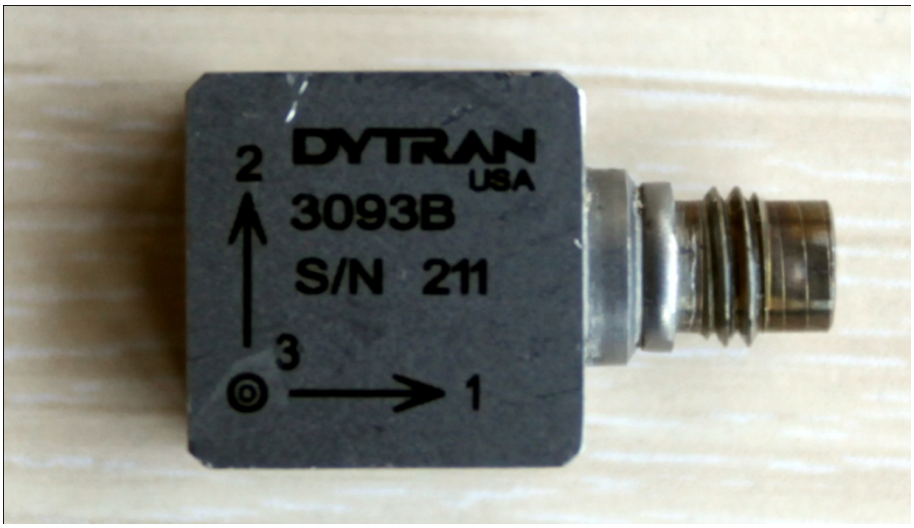
6. ÖLÇÜMDE KULLANILAN EKİPMANLAR

Titreşim ölçümlerinde prototip motorlar üzerinden ölçümleri almak için üç eksenli Dytran marka 3093B ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçer yardımıyla alınan veriler Areva 01dB dB4 analizörü sayesinde bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bilgisayar ortamına aktarılan verilerde dBFA Suite programı sayesinde yorumlanmıştır.

6.1 Üç Eksenli Dytran 3093B İvmeölçer

Makine problemlerinin belirlenmesine yardımcı olmak için, vibrasyon datasının her üç yöndeki ölçüm noktasından olması oldukça faydalıdır. 3 eksenli ivmeölçer sayesinde birbirine dik üç doğrultuda titreşimler ölçülebilmektedir. Aynı zamanda motor titreşimlerinin incelenmesinde 3 eksenli ivmeölçerler sıklıkla kullanılmaktadır.

Anadolu Motor'da yapılan titreşim ölçümlerinde Şekil 6.1'de görülen Dytran marka 3093B ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçer titanyumdan yapılmış olması nedeniyle hafif olması, üç eksenli ölçüm yapabilmesine rağmen tek noktadan analizöre bağlanması, herhangi bir cıvata bağlantısı gerekmeksizin ufak bir çerçeveye yapıştırılmak suretiyle ölçüm yapılacak yüzeye kolayca montajı sebebiyle tercih edilmiştir.



Şekil 6.1 : Üç eksenli Dytran 3093B ivmeölçer.

6.2 Areva 01 dB dB4 Analizör

Titreşim ölçümlerinde kullanılan Areva marka 01 dB dB4 analizör Şekil 6.2'de görülmektedir. Ölçümlerde kullanılan sensör 3 eksenli olduğu için analizörün ilk 3 kanalına her bir kanal bir ekseni temsil edecek şekilde bağlanmaktadır. Analizör de elde edilen veriler USB ile bilgisayara aktarılmaktadır.

Kullanılan analizörün özellikleri şunlardır;

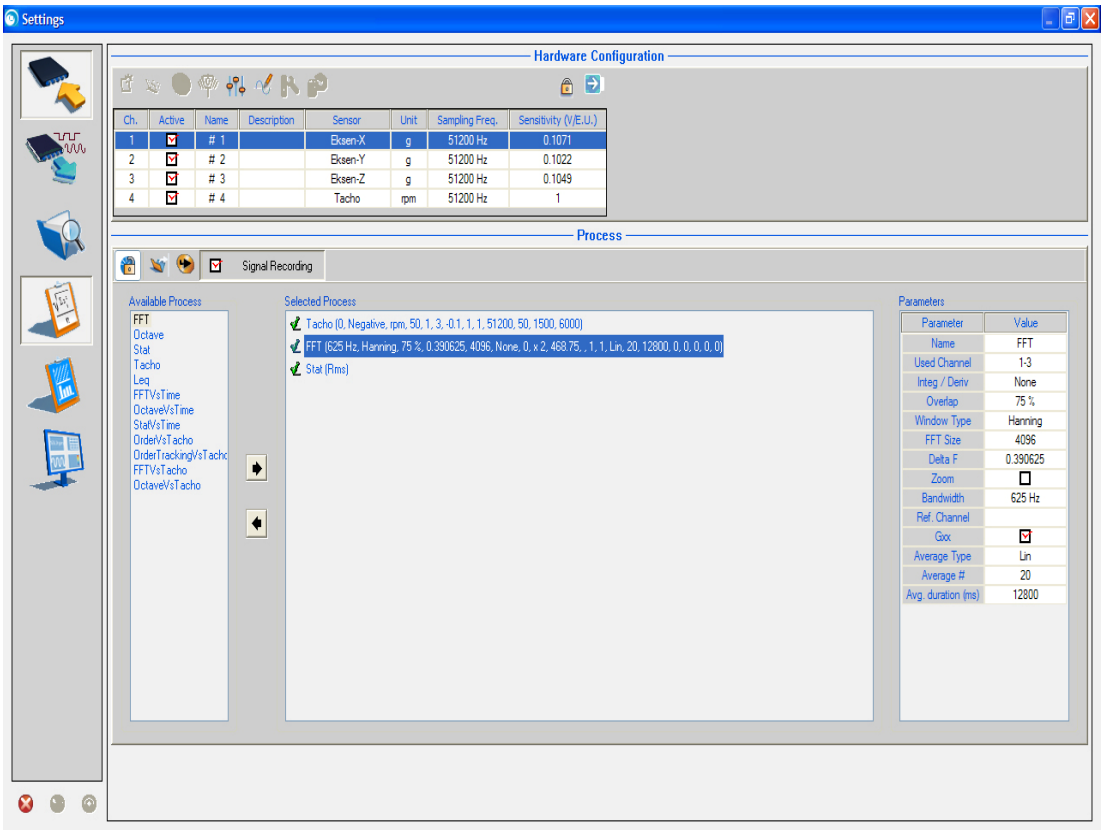
- 1 tanesi tako kanalı olmak üzere toplam 5 tane giriş kanalı, 2 tane analog çıkış kanalı,
- 20 kHz bant genişliğine kadar ölçüm imkanı,
- 52 kHz'in üzerinde örnekleme oranı,
- Analizlerin eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılıp değerlendirilebilmesi,
- Herhangi bir güç kaynağı gereksinimi olmaksızın USB ile çalışabilmesidir [7].



Şekil 6.2 : Areva 01 dB dB4 analizör.

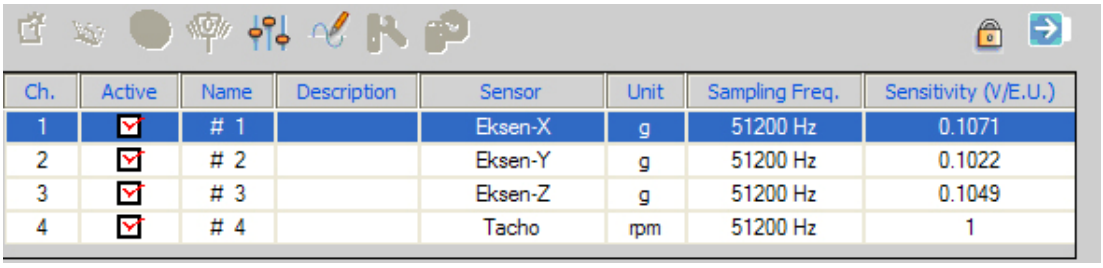
6.3 dBFA Suite Paket Programı

Analizör vasıtasıyla bilgisayara aktarılan veriler dBFA Suite programıyla işlenip yorumlanmaktadır. Şekil 6.3'te ölçümlerde kullanılan programın ayarları görülmektedir. Bu ayarlar donanım biçimleri ve alınan sinyal üzerine uygulanan işlemler olmak üzere iki pencerede verilmiştir.



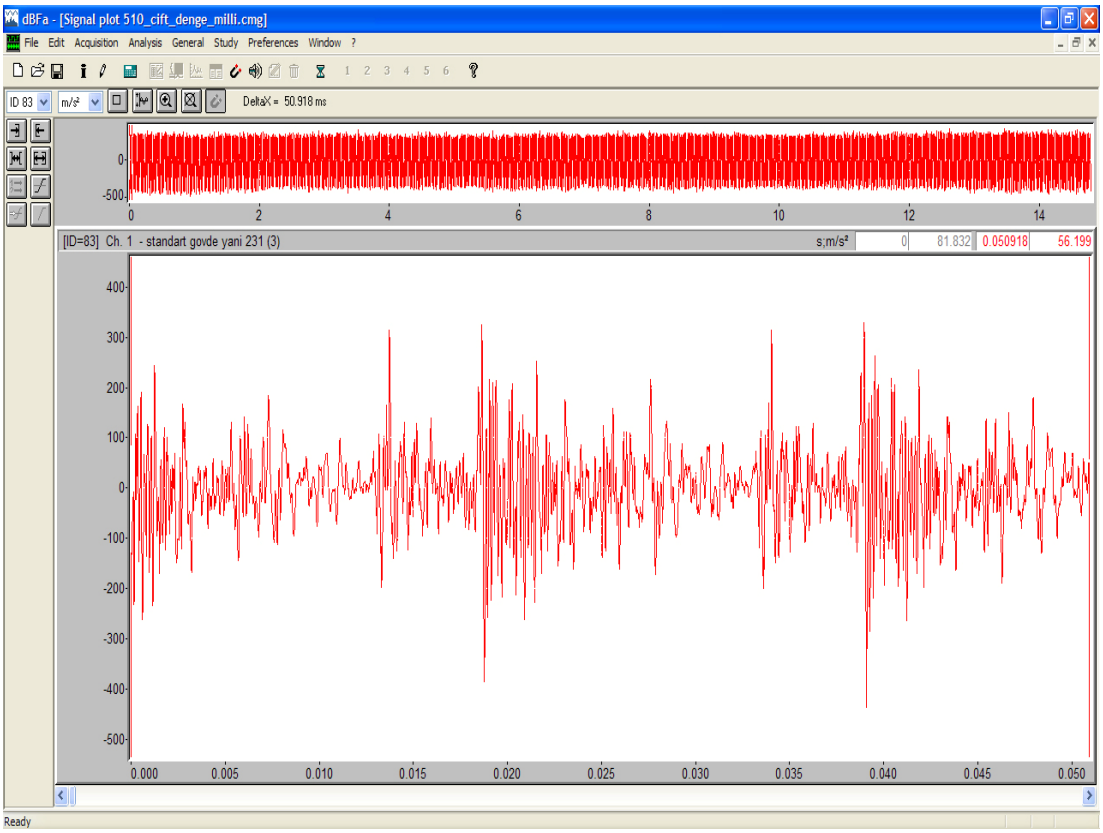
Şekil 6.3 : dBFA Suite programı ayarlar penceresi.

Şekil 6.4'te görülen donanım biçimleri penceresinde ölçümlerde kullanılan ivmeölçerin eksenlere göre hassasiyet değerleri ve örnekleme sıklığı değerleri verilmiştir. İvmeölçer üç eksenli olduğu için hassasiyet değerleri üç eksen içinde üretici firma Dytran tarafından tavsiye edilen şekilde girilmiştir.



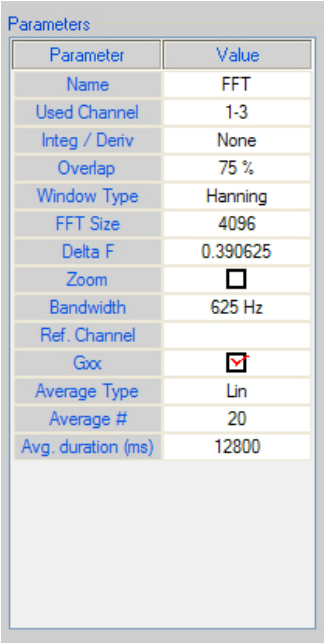
Şekil 6.4 : dBFA Suite programı donanım biçimleri penceresi.

İvmeölçer kullanılarak ölçülen motor titreşiminden alınan sinyaller oldukça karmaşık yapıdadır. dBFA Suite programının ayarlarına göre her bir ölçüm için analizler 15 saniye sürmektedir. Ölçümler sonucunda elde edilen karmaşık sinyaller Şekil 6.5'te görülmektedir. Sinyaller üst üste bindiği için 0,05 saniyelik ilk bölüm Şekil 6.5'te ki pencere de ayrıca görülmektedir.



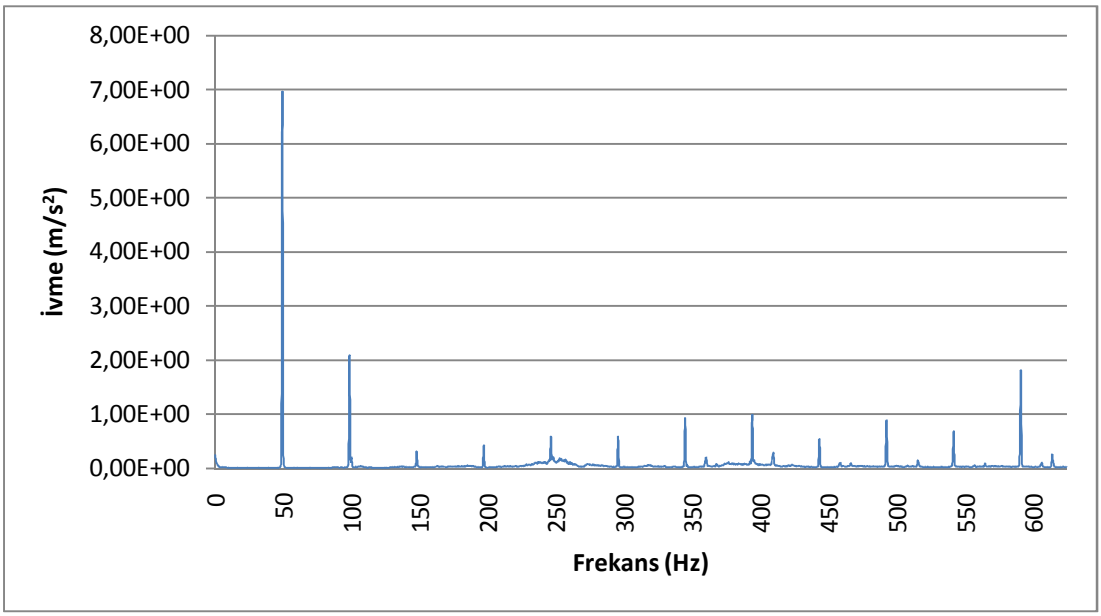
Şekil 6.5 : FFT uygulamadan önce alınan sinyaller.

Bu karmaşık sinyallerin anlaşılıp yorumlanabilmesi için çeşitli matematiksel dönüşümlerin yapılması gerekmektedir. Şekil 6.6'da görülen sinyal işleme parametrelerine göre karmaşık sinyaller işlenmektedir. Bu sinyaller FFT (Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)) dönüşümleri sayesinde basitleştirilmektedir [8].



Şekil 6.6 : dBFA Suite programı sinyal işleme parametreleri penceresi.

dBFA Suite programı sinyal işleme parametrelerine göre Şekil 6.5'teki karmaşık sinyaller işlendikten sonra Şekil 6.7'deki sinyaller elde edilmiştir. Karmaşık sinyaller zaman domeninde olmasına rağmen yapılan dönüşümlerle frekans domenine aktarılmış ve sonuçların daha kolay yorumlanabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.7 : FFT uygulandıktan sonra sinyaller.

6.3.1 FFT analizör

FFT analiz dijital spektrum analiz türlerinden bir tanesidir ve vibrasyon alanında en çok kullanılan sinyal analiz yöntemidir.

Spektrum analiz zaman domenindeki sinyal gösteriminin frekans domeni sinyal gösterimine dönüştürülmesi işlemidir, kökleri 19. yüzyılda birkaç matematikçinin teorik temelleri üzerine çalışmasına dayanır.

İyi bir matematik bilgisi olan mühendis Jean Baptiste Joseph Fourier Napolyon'un Mısır seferi sırasında topların aşırı ısınması problemi için ısı iletim çözümü olan Fourier Serilerini ortaya koydu. Topların aşırı ısınması frekans analizinden çok farklı gibi görünebilir, fakat her iki durum için aynı eşitliklerin uygulanması söz konusudur. Fourier daha sonra Fourier serilerini Fourier Integral dönüşümü şeklinde genelleştirdi. Dijital sinyal analizinin gelişimi doğal olarak DFT (Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü(AFD))) ve FFT'yi (Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü(HFD))) ortaya çıkardı.

Fourier dönüşümünün Fourier serileri, Fourier integral dönüşümü, ayrık Fourier dönüşümü ve hızlı Fourier dönüşümü olmak üzere dört biçimi vardır.

6.3.1.1 Fourier serileri

Fourier, herhangi bir keyfi periyodik fonksiyonun, frekansla harmonik bağlantılı bir sonsuz sinüs serisiyle ifade edilebileceğini göstermiştir. Periyodu T olan bir fonksiyon için sürekli Fourier serisi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(w_0 t) + b_1 \sin(w_0 t) + a_2 \cos(2w_0 t) + b_2 \sin(2w_0 t) + \ldots \qquad \textbf{(6.1)}$$

veya daha genel formda:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos(kw_0 t) + b_k \sin(kw_0 t) \right] \qquad \textbf{(6.2)}$$

Burada $w_0 = 2\pi/T$ olup esas frekans adını alır ve $2w_0$, $3w_0$, vb... gibi sabit katsayılı katlarına harmonikler denir.

Fourier katsayılarının hesaplanması zaman domeninden frekans domenine matematiksel dönüşümü gibi tanımlıdır. Fourier serileri frekans katsayılarından bilgi kaybı olmaksızın orijinal dalga şekli yeniden oluşturulabilir gibi önemli bir gerçek ortaya çıkar. Fourier serileri periyodik dalga formlarının frekans analizi

yapılabilmesi için mükemmel şekilde uygundur, bu durum deterministik sinyaller içinde söylenilebilir.

Fourier serilerinin varlığı Dirichlet koşullarına dayanır. Bu koşullara göre, periyodik bir fonksiyonun sonlu sayıda minimumları ve maksimumları vardır ve sonlu sayıda ani süreksizlik gösterir. Genel anlamda, fiziksel olarak türetilen bütün periyodik fonksiyonlar bu koşulları sağlar [9].

6.3.1.2 Fourier integral dönüşümü

Sonsuz uzunluktaki zaman sinyallerini kapsayabilmek için yapılmış Fourier serilerinin doğal bir uzantısıdır, yani tekrarlı olmayan sürekli sinyallerin Fourier integral dönüşümü ya da basitçe Fourier dönüşümüdür. Bu integral herhangi bir keyfi biçimdeki sürekli zaman işaretlerini sonsuz frekansa uzanan sürekli spektruma dönüştürecektir. Fourier dönüşümünün ilginç bir karakteristiği kısa zaman aralığı içindeki olayları kapsayarak geniş frekans aralığına yayması ve tersi işlemi de yapmasıdır.

Fourier serilerinin üstel yazılışından türetilebilir:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikw_0 t} \qquad \textbf{(6.3)}$$

Burada;

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-ikw_0 t} dt \qquad \textbf{(6.4)}$$

olup $w_0=2\pi/T$ ve k=0,1,2,…'dir.

Periyodik bir fonksiyondan periyodik olmayana geçiş, periyodun sonsuza yaklaşması sağlanarak elde edilebilir. Başka bir deyişle, T sonsuz olursa fonksiyon kendisini asla tekrarlamaz ve böylelikle aperiyodik olur. Eğer bu sağlanabiliyorsa, Fourier serisinin aşağıdaki şekle indirgeneceği gösterilebilir:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(iw_0) e^{iw_0 t} dw_0 \qquad \textbf{(6.5)}$$

Buradaki katsayılar, aşağıda yazıldığı gibi frekans değişkeninin, w'nın sürekli bir fonksiyonudur:

$$F(iw_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{iw_0 t}dt \qquad \textbf{(6.6)}$$

Eşitlik 6.6'da tanımlanan, $F(iw_0)$ fonksiyonu f(t)'nin Fourier integrali diye adlandırılır. Ayrıca, Eşitlik 6.5 ve 6.6 birlikte Fourier dönüşüm çifti diye bilinir. Bu nedenle, Fourier integrali adı verilmekle birlikte, $F(iw_0)$'ye f(t)'nin Fourier dönüşümü de denir. Aynı mantıkla, Eşitlik 6.5 ile tanımlanmış olan f(t) de $F(iw_0)$'in ters Fourier dönüşümü diye bilinir. Dolayısıyla, bu Fourier dönüşüm çifti, bir aperiyodik sinyal için zaman ve frekans bölgesi arasında ileri ve geri dönüşüm yapmamıza olanak verir [9].

6.3.1.3 Ayrık Fourier dönüşümü (discrete Fourier transform)

Bir işaretin frekans spektrumu hesaplanırken 2π ile periyodik olan ayrık zamanlı frekansın bir periyodunun dikkate alınması yeterlidir. Frekans spektrumu hesabı sırasında N adet frekans değeri için hesaplama yapılacaksa eğer bu frekans değerlerinin 2π'lik temel frekans bölgesinde N adet eşit aralıklı frekans değeri,

$$w_0 = \frac{2\pi}{N}k \qquad \mathrm{k} = 0,1,2,\ldots,\mathrm{N}-1 \qquad \textbf{(6.7)}$$

olarak bulunmaktadır. Ayrık frekans dönüşümünün N adet ayrık frekans değeri için hesaplanması,

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-iw_0 n} \qquad \mathrm{k} = 0,1,2,\ldots,\mathrm{N}-1 \qquad \textbf{(6.8)}$$

şeklindedir. Ters ayrık Fourier dönüşümü,

$$f_n = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{iw_0 n} \qquad \mathrm{n} = 0,1,2,\ldots,\mathrm{N}-1 \qquad \textbf{(6.9)}$$

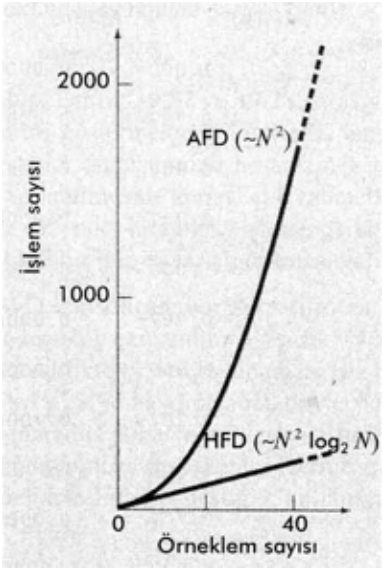
olarak tanımlanmaktadır.

Bu durumda, dönüşümün her k değeri için N adet karmaşık çarpma ve N-1 adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. N noktalı bir ayrık Fourier dönüşümü için N^2 ile orantılı bir hesap yükü anlamına gelmektedir [9].

6.3.1.4 Hızlı Fourier dönüşümü (fast Fourier transform)

Ayrık Fourier Dönüşümü'nü (DFT) hesaplamak için bir önceki bölümde açıklanan algoritma N^2 adet işlem gerektirdiğinden hesaplama bakımından çok zahmetlidir. Dolayısıyla, orta büyüklükteki veri örneklemleri için bile DFT'nin doğrudan hesaplanması epey zaman alıcıdır.

Hızlı Fourier dönüşümü veya FFT, DFT'yi çok daha hızlı bir şekilde hesaplamak için geliştirilmiş bir algoritmadır. Hızı, işlem sayısını azaltmak için bir önceki hesap adımındaki sonuçları kullanmasından gelmektedir. Özellikle, yaklaşık olarak $N\log_2 N$ adet işlemle dönüşümü hesaplamak için trigonometrik fonksiyonların periyodikliği ve simetrisini kullanmaktadır (Şekil 6.8). Bu nedenle, N = 50 örneklem için, FFT yöntemi standart DFT'den 10 kat daha hızlıdır. N = 1000 için 100 kat daha hızlıdır [9].



Şekil 6.8 : Standart ayrık Fourier dönüşümü(AFD) ve hızlı Fourier dönüşümü(HFD) için örneklem sayısına göre işlem sayılarının grafiği [9].

İlk FFT algoritması 19. yüzyılın başında Gauss tarafından geliştirilmiştir. Diğer ana katkılar 20. yüzyıl başlarında Runge, Danielson, Lanczos ve diğer araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Ancak, ayrık dönüşümler elle hesaplandığında çoğunlukla günler hatta haftalar aldığından modern sayısal bilgisayarların geliştirilmesinden önce pek ilgi görmemiştir.

1965 yılında J. W. Cooley ve J. W. Tukey, DFT'yi hesaplayan bir algoritmayı açıklayan önemli bir makale yayımlamışlardır. Gauss ve diğer ilk

araştırmacılarınkine benzeyen bu hesap yöntemi, Cooley-Tukey algoritması diye bilinir. Bugün, bu yönteme dayanan birçok başka yaklaşım vardır.

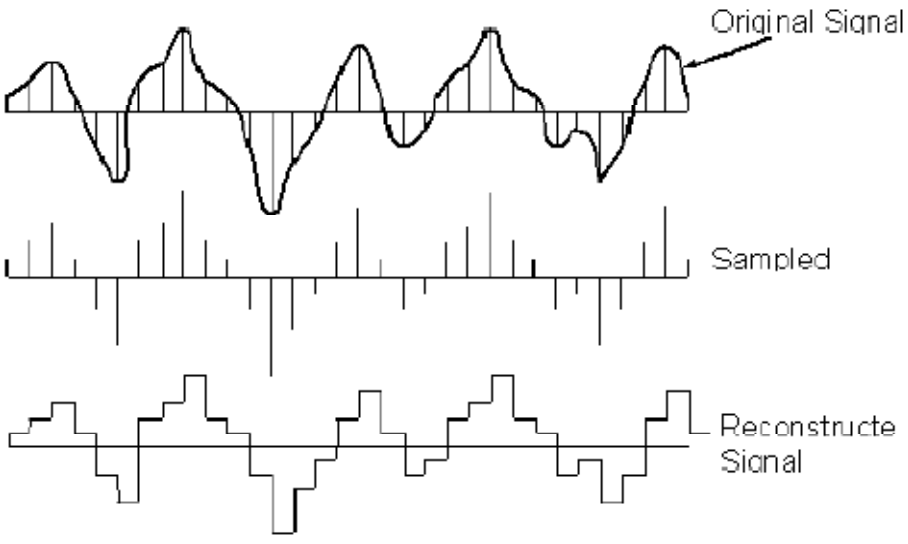
Bu algoritmaların hepsinin temelindeki görüş, N boyutundaki bir DFT'nin kolaylıkla daha küçük ardışık DFT'lere ayrıklaştırılabileceği veya bölünebileceğidir. Bu prensibi uygulamak için çok farklı yollar vardır. Örneğin, Cooley-Tukey algoritması, zamana göre seyreltme diye adlandırılan tekniklerden biridir.

FFT algoritması sinyal ve sonuçlanan spektrum üzerinde kesin limitlerle yer alır. Örneğin dönüştürülecek örneklenmiş sinyalin örnek sayısı 2'nin katları şeklinde olmalıdır. Çoğu FFT analizör dönüştürme işlemi için 512, 1024, 2048, ya da 4096 örnekleme sayısına izin verir. FFT analizini kapsayan frekans aralığı toplanan örnek sayısına ve örnekleme hızına bağlıdır.

Motor titreşimiyle ilgili yapılan ölçümlerde de FFT analizör dönüştürme işlemi için 4096 örnekleme sayısı kullanılarak sonuçların daha da hassaslaştırılması hedeflenmiştir [9].

6.3.2 Analog dijital dönüştürme

Şekil 6.9'da görüldüğü gibi FFT analizini uygulamanın ilk adımı gerçek örnekleme sürecidir.



Şekil 6.9 : Analog dijital dönüşüm.

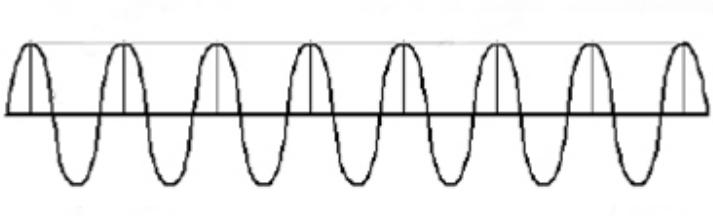
Örnekleme analog işlemdir, dijital değildir ve "sample and hold" devresiyle başarılır. Bu devrenin çıkışı ADC'yi besleyen voltaj seviyeleri sırasıdır. Voltaj seviyeleri burada dijital her seviyeyi temsil eden kelimelere (word) dönüştürülür. Örnekleme

seviyelerinin doğruluğu dijital kelimelerin bit sayısına bağlıdır. Büyük bit sayısı düşük gürültü seviyelerini ve daha büyük çalışma aralığı oluşturacaktır.

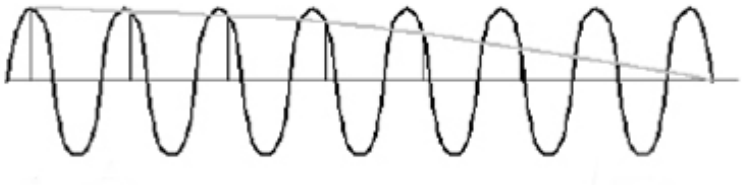
Şekil 6.9'dan da görüleceği gibi örnekleme hızı kodlanacak sinyalin maksimum frekansını belirler. Kodlanmış dalga formu örnekleme zamanları arasındaki sinyalde ne olduğu hakkında hiçbir şey bilemez. Claude Shannon, information teorisini adlandıran matematik dalı geliştiricisi, örneklenmiş sinyaldeki tüm bilgiyi kodlamayı belirlemiştir. Buna göre örnekleme frekansı bulunan sinyal frekansından en az iki katı olmalıdır. Bu bazen Nyquist kriteri diye adlandırılmaktadır [10].

6.3.3 Aliasing

Örnekleme frekansı yakınlarındaki bilgi içermeyen aliasing problemi olan dalga formu örneklemesinden kaçınmak oldukça önemlidir.



Şekil 6.10 : Örnekleme frekansı ile giriş frekansının aynı boyutta olması



Şekil 6.11 : Gerçek sinyal frekansının örnekleme frekansından büyük olması

Burada gerçek sinyal siyah örneklenmiş sinyal temsili gri ile gösterilmiştir. Dikey çizgiler örnekleme frekansını temsil etmektedir. Eğer örnekleme frekansı giriş frekansı ile aynı boyutta ise, her örnek aynı boyuttadır, örnekleme devresi çıkışı sabit doğru voltaj olacaktır, bunun giriş frekansı ile bir ilişkisi olmadığı açıktır. Gerçek sinyal frekansı örnekleme frekansından daha yüksek olursa çıkış çok düşük frekansta görünür ve tekrar buda gerçek sinyalin bir temsili değildir. Bu olay aliasing diye adlandırılır ve eğer kaçınılmazsa çok büyük hatalara neden olur. Aliasing den kaçınmanın en iyi yolu giriş sinyalini kesim frekansı örnekleme frekansının yarısı

olan analog alçak geçiren bir filtreden geçirmektir. Çoğu modern FFT cihazlarında filtre kesim frekansı örnekleme frekansının 2,56 katıdır. Filtre çok keskin kesim ya da kıvrılma frekansına sahip olmalıdır, bunun nedeni analizörün frekans aralığının yüksek sınırı yakınlarında faz bilgisi gerekirse veriyi etkileyen faz kayması olacağındandır. Bundan kaçınmak için analizörün frekans aralığından daha küçük bir frekans aralığı seçilmelidir.

Aliasing hareketli resimlerin olduğu medya ortamında da görülebilir. Örneğin western filmlerinde bazen vagon tekerlek parmaklığı durmuş ya da geriye döner gibi gözükür. Filmlerdeki bu optik aliasing orijinal hareketin örneklenmiş olmasındandır. Başka bir optik aliasing örneği stroboskoptur, flaşı izlenen nesnenin dönme hareketine yakın değerlerde oluşturulursa nesne duran bir vaziyette ya da yavaşça dönüyor şeklindedir.

Dijital sinyal analizi örnekleme kuralları:

- Veri geçiş yolu anti-aliasing alçak geçiren filtre içermelidir.
- Analiz yapılacak frekansın en az katı kadar hızda örnekleme yapılmalıdır.
- Analizin frekans cevabı örnekleme frekansına bağlıdır.

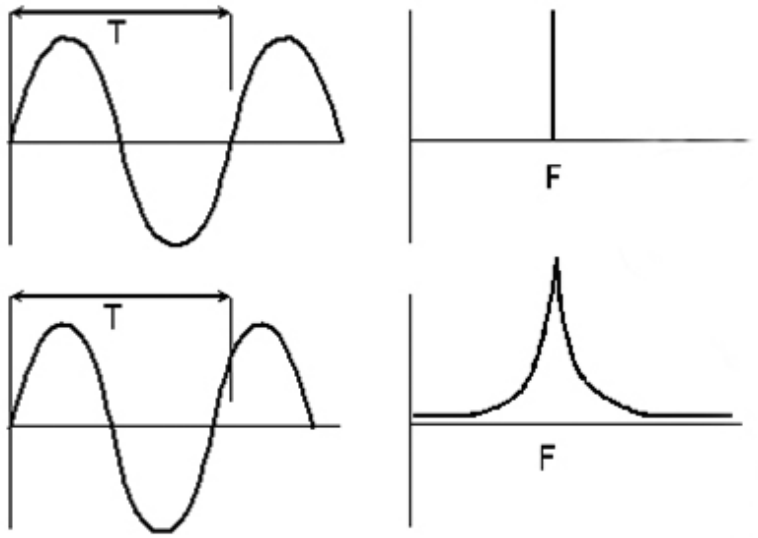
Bu kurallar tüm FFT analiz işlemlerinde uygulanır ve analizör otomatik olarak buna dikkat eder. Anti-aliasing filtre her frekans aralığının uygun değerinde dahili olarak kurulmalıdır. Toplam örnekleme zamanı zaman kayıt uzunluğu diye adlandırılır, FFT'nin doğası gereği spektrumdaki frekans bileşenlerindeki aralık (ya da frekans çözünürlüğü) 1/(kayıt uzunluğu) dur. Örneğin frekans çözünürlüğü 1 Hz ise, bu durumda kayıt uzunluğu 1 saniyedir, eğer frekans çözünürlüğü 0,1 Hz ise, bu durumda kayıt uzunluğu 10 saniyedir vb. Buradan görüldüğü gibi yüksek frekans çözünürlükte spektrum için veri toplama süresi uzun olmalıdır. Bu analizör içindeki hesaplama hızı ile ilgili değildir, sadece frekans analizi doğasından kaynaklanır [10].

6.3.4 Leakage (Kaçak)

FFT analizör toplu işlem yapan bir cihazdır. Belirli bir zamanda giriş sinyalini örnekler ve ara bellekte toplar, daha sonra FFT hesaplamasını yapar ve sonuçlanan spektrumu gösterir.

Eğer sinüzoidal bir sinyal dalga formu başlangıçta ve kayıt zamanı sonunda sıfırdan geçerse yani kayıt zamanı dalga formu çevrim sayısının tamamını kapsarsa

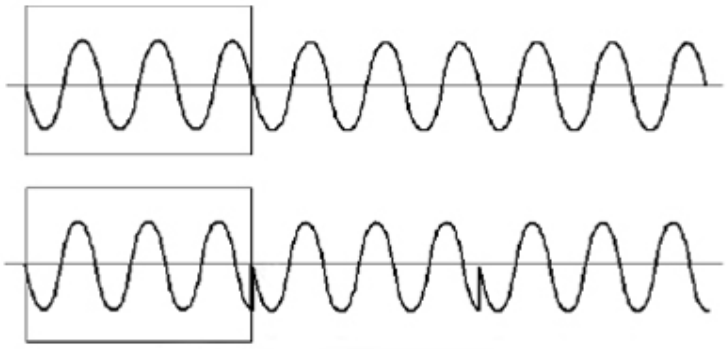
sonuçlanan FFT spektrumu gerçek genlikte ve gerçek frekansta tek bir çizgi olacaktır. Eğer kayıt zamanı başlangıç ve sonunda sinyal seviyesi sıfırdan değilse örneklenmiş sinyalin süreksizliğinden sonuçlanan (truncation) kesilmiş dalga formu oluşacaktır. Bu süreksizlik FFT sürecinde iyi olarak işlenemez ve tek bir çizgi yanında bitişik çizgilerle lekelenmiş sonuç oluşmaktadır. Bu "Leakage" kaçak diye adlandırılır. Uygun yerdeki enerji bitişik çizgilere kaçar. Kaçak spektrum şekli sinyal kaçak miktarına bağlıdır ve genelde gerçek sinyal için tahmin edilemezdir [8].



Şekil 6.12 : Veri kesilmesi nedeniyle oluşan Leakage(Kaçak).

6.3.5 Pencereleme (Windowing)

Çok sayıda ideal sistem, bantlar arasındaki sınırlarda süreksizlikler içeren parçalı-değişmez veya parçalı-fonksiyonel frekans cevapları ile tanımlanır. Dolayısıyla, bu sistemler nedensel olmayan ve sonsuz uzun dürtü cevabına sahiptirler. Sonsuz uzunlukta bir işaret dizisi ile çalışmak imkansız olduğundan bütün işaret analizlerinde pencereleme yapılması gerekmektedir. Kaçak etkilerini azaltmak için sinyal seviyesinin kayıt zamanı başlangıç ve sonunda sıfır seviyesini görmek gereklidir. Data örnek sayısını değişik şekillerde yapılabilen çoklama işlemine windowing (pencereleme) ya da weighting fonksiyonu denir.



Şekil 6.13 : Dikdörtgen pencere.

Eğer pencereleme fonksiyonu kullanılmazsa buna dikdörtgen (rectangular), düz (flat) ya da düzgün dağılımlı (uniform) çerçeveleme işlemi denir. Şekil 6.13'te pencerelenmiş dalga formu süreksizliğinden dolayı veri lekeleme etkisi görülebilir. FFT analizör sadece pencerenin ya da kayıt zamanının içinde ne olduğunu bilir. Gerçek sinyalin süreksiz olduğunu varsayar ve önceki şekilde olduğu gibi kaçağa neden olur. Kaçak eğer giriş sinyali dalga formu sıfır geçişi ile örnekleme zamanı senkron yapılabilirse önlenebilir, fakat bu pratikte başarılması imkansızdır.

Analiz işlemi için işaretin bir bölümü seçildiğinde, orijinal veri pencerelenmiş olur. En basit pencereleme tekniğinde verilen işaretin incelenecek kısmı bir ile dışarıda kalan kısmı ise sıfır ile çarpılır. Rastgele bir işaretin sadece incelenecek kısmını kesip almak bu türden bir pencereleme işlemidir. Bu işlem, işaretin sonlu genişlikteki birim pencere fonksiyonu ile çarpımına eşdeğerdir. Frekans domeninde bu işlemin karşılığı, konvolüsyondur. Bu işlem sırasında pencere fonksiyonunun Fourier dönüşümünde oluşan yan loplar sebebiyle, yan bantlarda bir izge sızıntısı oluşur. İdeal olarak, kesme yoluyla gerçekleştirilen dikdörtgen pencere sonsuz genişlikte olursa, teorik olarak izge bir dürtü biçiminde olur. Dolayısıyla, bu durumda sızıntı etkisi de görülmez. Dikdörtgen pencere fonksiyonunda, uçlardaki süreksizliklerden oluşan izge dağılmasından dolayı, çoğu uygulamalarda değişik türde pencere fonksiyonları kullanılır. Pencere fonksiyonları zaman domeninde şekillendirilirken, Fourier dönüşümünün frekans domeninde bazı özellikleri sağlaması arzu edilir. Bir pencere fonksiyonu izgesi yan loplarda minimum ve ana lopta maksimum enerji taşırken bant genişliği de mümkün olduğunca dar olmalıdır. Literatürde mevcut olan dikdörtgen, üçgen, Bartlett, Hanning, Hamming, üstel, değiştirilmiş Barnwell, Blackman ve Kaiser gibi dokuz farklı pencere fonksiyonu bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar:

a) Dikdörtgen pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}1, & 0\le n\le L-1\\ 0, & Diğer\end{cases} \qquad \textbf{(6.10)}$$

Burada L pencere genişliğidir.

b) Üçgen pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}1-\dfrac{n}{L}, & 0\le n\le L-1\\ 0, & Diğer\end{cases} \qquad \textbf{(6.11)}$$

c) Bartlett pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}\dfrac{2n}{L-1}, & 0\le n\le 0.5(L-1)\\ \dfrac{2(L-1-n)}{L-1}, & 0.5(L-1)\le n\le L-1\\ 0, & Diğer\end{cases} \qquad \textbf{(6.12)}$$

d) Hanning pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}0.5-0.5\cos\left(\dfrac{2\pi n}{L-1}\right), & 0\le n\le L-1\\ 0, & Diğer\end{cases} \qquad \textbf{(6.13)}$$

e) Hamming pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}0.54-0.46\cos\left(\dfrac{2\pi n}{L-1}\right), & 0\le n\le L-1\\ 0, & \text{Diğer}\end{cases} \qquad \textbf{(6.14)}$$

f) Üstel pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}\mu^n, & \mu\le 1 \text{ ve } 0\le n\le L\text{-}1\\ 0, & \text{Diğer}\end{cases} \qquad \textbf{(6.15)}$$

g) Değiştirilmiş Barnwell pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}(1+n)\mu^n, & \mu\le 1 \text{ ve } 0\le n\le L\text{-}1\\ 0, & \text{Diğer}\end{cases} \qquad \textbf{(6.16)}$$

h) Blackman pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}0.42-0.5\cos\left(\dfrac{2\pi n}{L-1}\right)+0.08\cos\left(\dfrac{4\pi n}{L-1}\right), & 0\le n\le L-1\\ 0, & Diğer\end{cases} \quad \textbf{(6.17)}$$

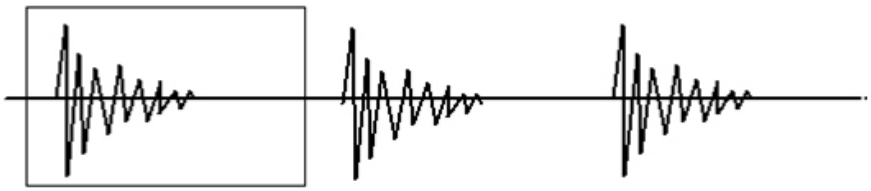
i) Kaiser pencere fonksiyonu,

$$W(n)=\begin{cases}\dfrac{I_0\left(\beta\left[1-((n-\alpha)/\alpha)^2\right]^{0.5}\right)}{I_0(\beta)}, & 0\le n\le L-1\\ 0, & Diğer\end{cases} \quad (6.18)$$

ile verilir. Burada, $\alpha = 0.5(L-1)$ ve I_0 sıfırıncı dereceden birinci tür değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur [11].

Anadolu Motor'da yapılan ölçümlerde Hanning pencere fonksiyonu kullanılmıştır.

6.3.5.1 Geçici sinyalin pencerelenmesi

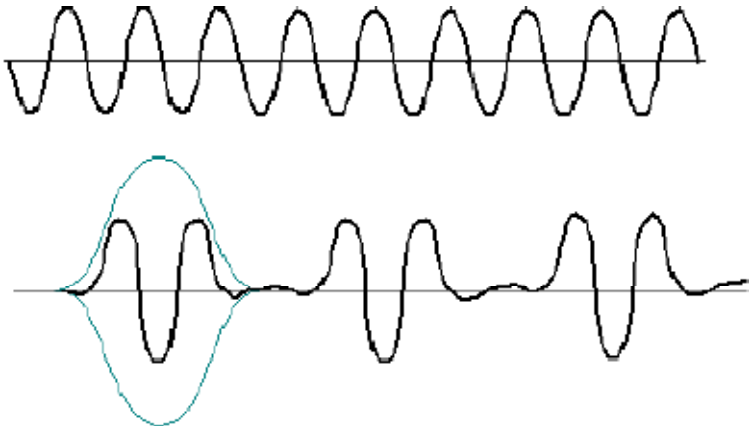


Şekil 6.14 : Geçici sinyal durumunda dikdörtgen pencere.

Giriş sinyalinin geçici olması durumunda, başlangıç ve son sıfır seviyeleri tanımı tamamıyla kayıt zamanı içindeyse lekelenme oluşmayacak, FFT sinyalin tamamını gördüğünden analiz doğru olacaktır. Tüm geçici durumun kayıt zamanı içinde olması önemlidir, kayıt uzunluğu analizörün frekans aralığına bağlıdır. Çoğu FFT analizör kullanıcıya kayıt zamanını ekranda gösterir, böyle bir durumla karşılaşıldığında buradan elde edilebilir [11].

6.3.5.2 Hanning window

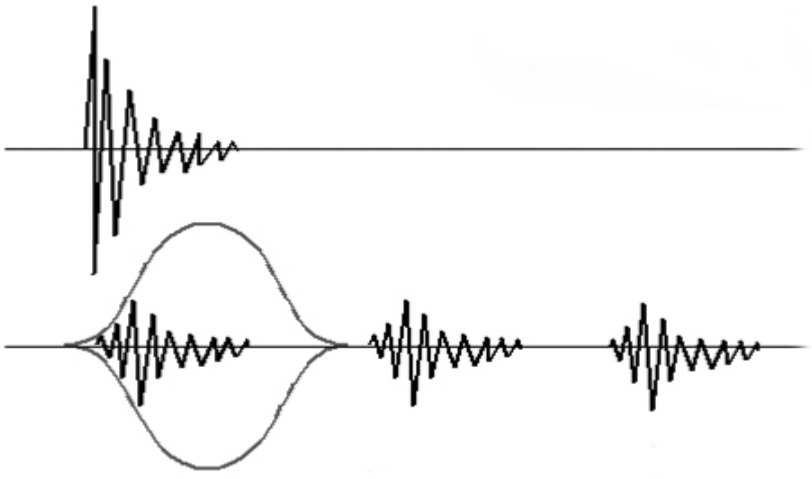
Hanning window keşfedicisi Von Hann'dan sonra kosinüs dalgasını daima pozitif yapmak için 1 eklenmiş durumdadır. Örneklenmiş sinyal değerleri Hanning fonksiyon ile çarpılır, sonuç Şekil 6.15'deki gibidir. Kayıt zamanı sonu giriş sinyali değerinin ne yaptığı dikkate alınmaksızın sıfır yapılmaktadır.



Şekil 6.15 : Hanning penceresi.

Hanning penceresi sonda sıfıra zorlayarak iyi bir iş yaparken genlik modülasyonda olduğu gibi analiz yapılırken dalga formuna bozulmalar ekler, yani kayıt zamanı üzerinde genlik değişimlerini ekler. Genlik modülasyonu spektrumda yan bantlar oluşturur ve Hanning window durumunda bu yan bantlar ya da kenar loblar frekans analizörünün çözünürlüğünü %50 azaltır. Analizör frekans çizgilerin daha kalın yapmak gibidir.

Hanning ağırlıklı sinyalin ölçülen genliği de ağırlık işleminin esas sinyal seviyesinin yarısını çıkarması nedeniyle doğru değildir. Spektral seviyelerin iki ile çarpılması sayesinde bu durum kolaylıkla düzeltilebilir ve FFT analizör bu işlemi yapar. Bu işlem sinyal genliğinin örnekleme aralığında sabit olduğu varsayımını yapar. Durum böyle değilse Şekil 6.16'da geçici sinyallerde olduğu gibi genlik hesaplamasında hatalar olacaktır.



Şekil 6.16 : Geçici sinyal durumunda hanning penceresi.

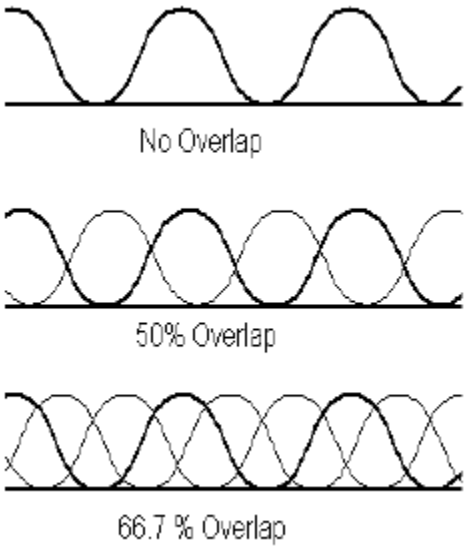
Hanning penceresi sürekli sinyallerde daima kullanılmalı, fakat geçici sinyallerde asla kullanılmamalıdır. Bunun nedeni pencere şekli geçici şekli bozması ve geçici sinyalin frekans ve faz içeriğinin bu pencere şekline ilintili olacağındandır.

Ölçülen seviye de büyük hatalı olacaktır. Geçici sinyal Hanning penceresinin merkezine bağlansa bile ölçülen seviye analizörün uyguladığı Hanning ağırlığı nedeniyle yaptığı düzeltme sonucunda gerçek değerin iki katı olacaktır.

Hanning ağırlıklı sinyal gerçekte bunun yarısıdır, sahip olduğu diğer yarısı pencereleme nedeniyle çıkartılmıştır. Bu sinüzoid gibi tamamıyla düzgün sürekli sinyaller için problem değildir, ama ölçmek istediğimiz makine vibrasyonu gibi çoğu sinyal mükemmel düzgünlükte değildir. Kayıt zamanının başlangıç ve sona yakın yerlerde küçük değişiklikler olursa ya gerçek değerinin yarısı kadar değerde analiz edilecektir ya da sinyalin hepsi kaçırılacaktır. Bu nedenle üst üste gelme işlemini (overlap) kullanmak gerekmektedir. Bunu yapmak için analizörde iki ara bellek gereklidir.%50 üst üste gelme için olayların sırası şu biçimdedir: Birinci ara bellek yarı dolu olduğunda yani kayıt zamanı örneklerinin yarısını içerdiğinde ikici ara bellek veri akışına bağlanır ve örnek toplamaya başlar. Birinci ara bellek dolar dolmaz FFT hesaplanır ve ara bellek yeniden veri almaya başlar. İkinci ara bellek dolduğunda içeriğindeki değer ile FFT yeniden hesaplanır ve sonuç ortalama ara belleğe gönderilir. Bu işlem istenen sayıda ortalama toplanan kadar devam eder [11].

6.3.6 Üst Üste gelme (Overlap) işlemi

Üst üste gelme işlemi FFT hesaplama zamanı kayıt zamanından daha kısa ise başarılabilir. Durum böyle değilse spektrum hesaplamaları analiz edilmiş sinyalde boşluklar yaparak veri kazanımının gerisinde kalacaktır.



Şekil 6.17 : Üst üste gelme işlemi (overlap).

Eğer üst üste gelme 2/3 yani %66,7 ise bu durumda verinin tüm zaman ağırlığı düz şekilde olacaktır, yüksek üst üste gelmenin büyük olmasında bir avantaj yoktur. Çoğu makine analizi için kullanılan veri toplayıcılarda birçok vibrasyon çalışmasında doğru genliği veren %50 üst üste gelme kullanılır. Burada FFT analizini etkileyen örnekleme hızı, örnek sayısı, kayıt zamanı uzunluğu ve frekans çözünürlüğü arasında ilişkiler verilmiştir. Örnekleme hızı örnek/s time, kayıt uzunluğu T saniye, örnek sayısı N ile gösterilmiştir. FFT analizöründe örnek sayısı N 2'nin kuvvetleri ile sınırlandırılmıştır.

N örnek zamanında işlem yapan FFT algoritması N/2 frekans çizgisi üretir. Böylece kayıt zamanındaki 512 örnek spektrumda 256 çizgi üretecektir. FFT analizörler genelde üst spektral çizgilerini aliasing bileşenleri ile kirletilmiş olma olasılığından dolayı göstermezler. Bu anti-aliasing filtrelerin mükemmel olmaması ve kesim spektrumunda sonlu eğri bulundurmasındandır. Bu nedenle 256 çizgi spektrum 200 çizgi spektrum gibi ve 512 çizgi spektrum 400 çizgi spektrum gibi gösterilecektir.

Frekans çözünürlüğü DF, (frekans aralığı)/ (çizgi sayısı) dır ve 1/T ye eşittir. Tersi işleminde T 1/DF 'e eşittir. Buradan frekans çözünürlüğü artarsa (daha küçük DF) kayıt zamanı orantılı olarak artacağı görülür. Bu nedenle yüksek çözünürlüklü spektrum uzun süreli veri kazanımı gerektirir [10].

7. ÖLÇÜMLER

Adams ile yapılan analizler sonucunda ölçümlerde kullanılacak olan krank karşı ağırlıkları ve mil ağırlıkları belirlenmiş olmasına rağmen, Adams sonuçlarıyla ölçüm sonuçlarını oransal manada karşılaştırmak mümkün değildir. Çünkü;

- Adams'ta yapılan analizler kuvvet bazında yapılmasına rağmen ölçümlerdeki iyileşmeler ivme bazında değerlendirilmektedir.
- F=ma prensibine göre, eşit kütleli sistemlerde oransal olarak kuvvet ivme ilişkisi incelenebilmektedir. Ancak Adams'ta kullanılan modelin kütlesi ile ölçümlerde kullanılan modelin kütlesinin birbirinden farklı olması nedeniyle böyle bir oransal yaklaşım söz konusu değildir. Adams'ta model krank, biyel ve piston mekanizmasından oluşmasına rağmen, gerçekte lastik takozlar üzerine oturtulmuş olan sistemin tüm parçaları ölçüm sonuçlarını etkilemektedir.

Bu nedenlerden dolayı ölçümler kendi içinde karşılaştırılacaktır. Ölçümlerde kullanılan prototip motorların fotoğrafları ekte verilmiştir.

7.1 Elektrik Motoruyla Tahrik

Tek silindirli bir makinenin çalışması esnasında krank-biyel mekanizmasına gaz, atalet ve merkezkaç kuvvetleri etki eder. Motorun dengelenmesi ötelenen parçaların oluşturduğu atalet kuvvetleri ve dönen parçaların oluşturduğu merkezkaç kuvvetleri dikkate alınarak yapılır. Yataklara gelen kuvvetlerin hesaplanmasında, volan seçiminde ve mukavemet hesaplamaları gibi konularda ise gaz kuvvetleri de dikkate alınır.

Gaz kuvvetleri olmaksızın atalet kuvvetleri ve merkezkaç kuvvetleri incelenmek istendiği için bu ölçümlerde kullanılan motorlar elektrik motoruyla tahrik edilmiştir. Herhangi bir şekilde yanma söz konusu olmadığı için ölçümlerde kullanılan motorlar krank, biyel ve pistona indirgenmiştir.

Standart motorun devir sayısının 3000 d/dk olması nedeniyle ölçümlerde kullanılacak prototip motorları tahrik edecek olan elektrik motoru istenilen devir sayısını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Elektrik motorunun hareketini prototip motorlara aktarmak için yıldız tip elastik kaplin kullanılmıştır.

Yıldız tip elastik kaplin kullanılmasının sebepleri;

- Hareketi iletme esnasında mekanik titreşimleri ortadan kaldırmak,
- Burulma titreşimlerini önleyip, darbe tesirini azaltmak,
- Eksenel ve açısal kaçıklıkları minimum düzeyde tutmaktır.

Standart motor, çift mille dengelenmiş denge milsiz motor ve çift mille dengelenmiş denge milli motor olmak üzere 3 farklı prototip üzerinde krank ekseni doğrultusunda gövde yanından ölçümler alınmıştır. Ölçümler üç eksenli ivmeölçerle yapıldığı için üç eksendeki ivme değerleri de grafiksel olarak verilmiş olmasına rağmen yatay (Y) ve dikey (Z) eksenlerde kıyaslama yapılacaktır.

FFT analizleri sonucunda alınan ölçümler zaman domeninden frekans domenine aktarıldığı için motorun devir sayısı 3000 d/dk'dan 50 Hz'e çevrilmiştir. Çift mille dengelemede birinci dereceden atalet kuvvetleri dengelenebilmektedir.

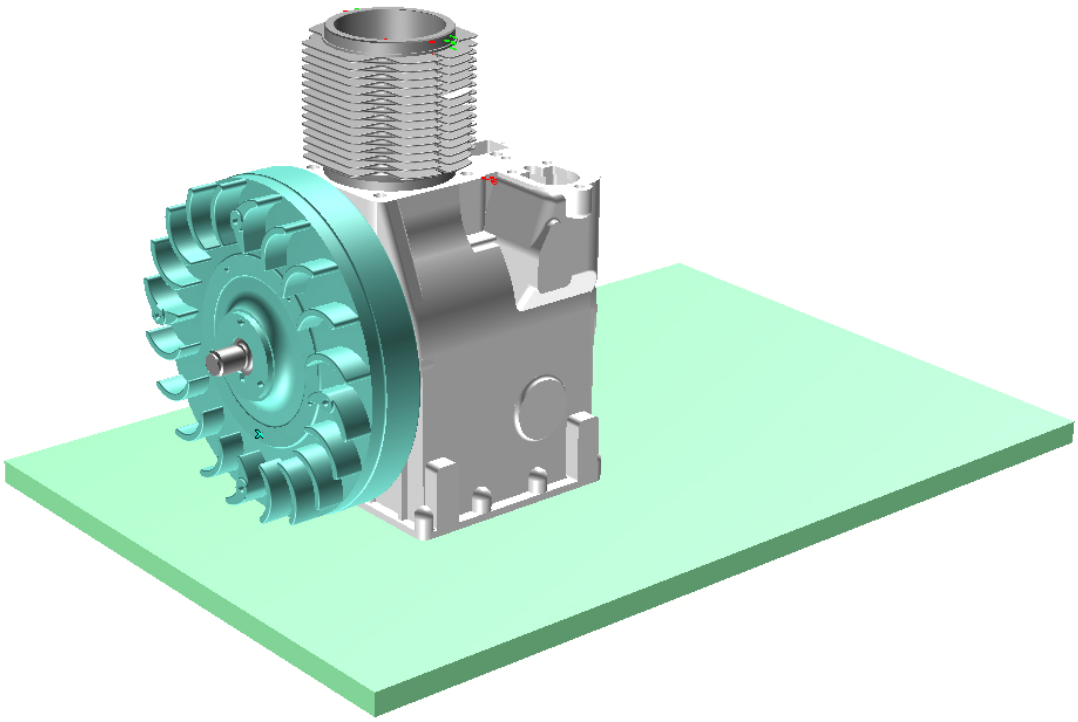
Birinci dereceden atalet kuvvetinin değişim periyodu krank milinin tam bir devrine eşittir. Yani bu kuvvet en büyük veya en küçük değerlerini, krank milinin bir devri esnasında yalnız bir defa alır. Bu nedenle alınan ölçüm sonuçları 50 Hz'deki ivme değerlerine göre karşılaştırılacaktır.

İkinci dereceden atalet kuvvetinin değişim periyodu ise krank milinin yarım devrine eşittir. Yani bu kuvvet en büyük veya en küçük değerlerini, krank milinin bir devri esnasında iki defa alır. Bu durumda ikinci dereceden atalet kuvvetlerindeki değişim 100 Hz'deki ivme değerleri karşılaştırılarak gözlenebilir. Ancak çift mille dengeleme de ikinci dereceden atalet kuvvetlerini dengelemek söz konusu olmadığı için 100 Hz'deki ivme değerlerine bakılmayacaktır.

7.1.1 Standart motor

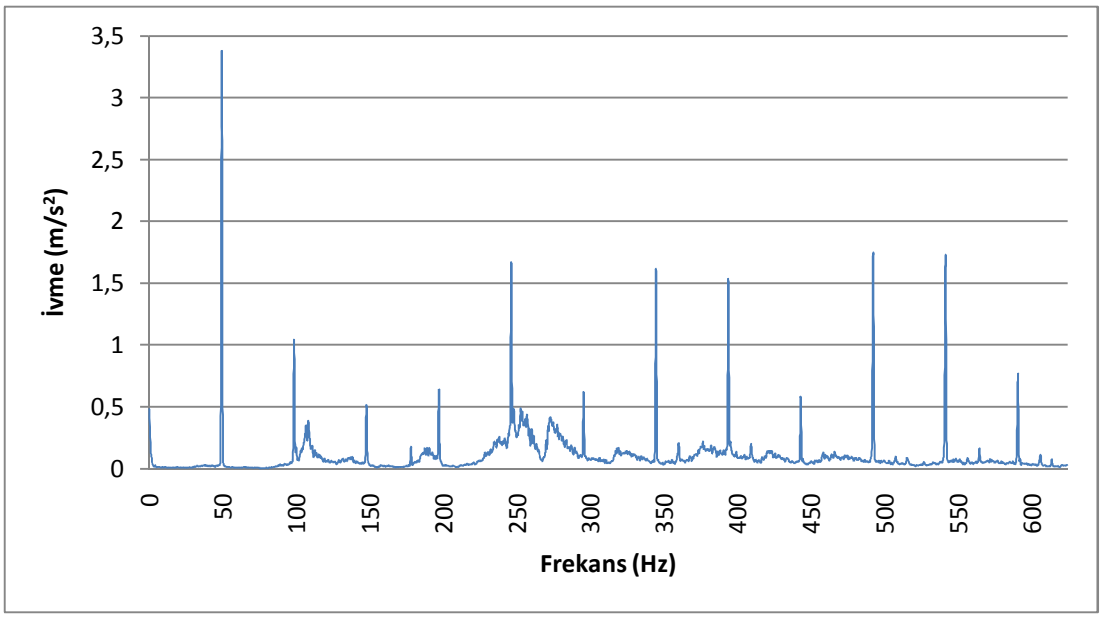
Şekil 7.1'de elektrik motoruyla tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan standart motorun şematik resmi görülmektedir. Motor Şekil 7.1'de görüldüğü gibi bir pleyt üzerine cıvatalarla bağlanmıştır.

Ölçümlerde volanın bulunduğu yönün aksi yönünde elektrik motoru yıldız tip elastik kaplin yardımıyla motora bağlanmıştır. Bu sayede motor tahrik edilerek gövde yanına yapıştırılan sensör yardımıyla titreşim değerleri ivme (m/s^2) olarak okunmuştur.



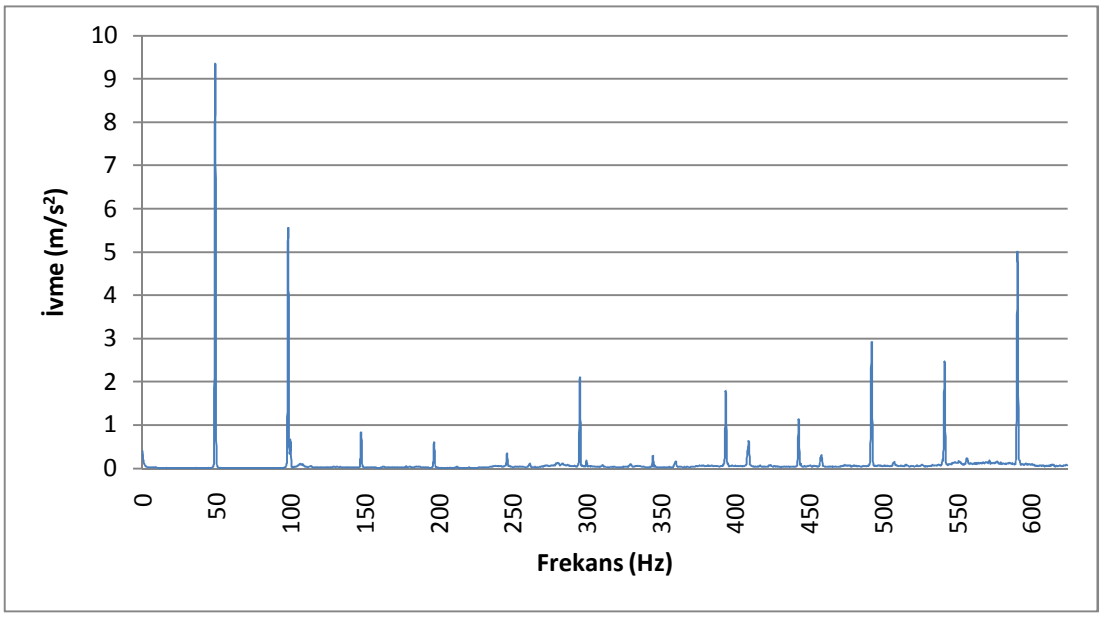
Şekil 7.1 : Elektrik motoruyla tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan standart motorun şematik gösterimi.

Standart motorda volan tarafındaki krank karşı ağırlığı 1475,8 g, dişli tarafındaki krank karşı ağırlığı ise 1406,56 g'dır. Krank karşı ağırlıklarının ağırlık merkezlerinin krank dönme merkezine uzaklığı ise 32,36 mm'dir.



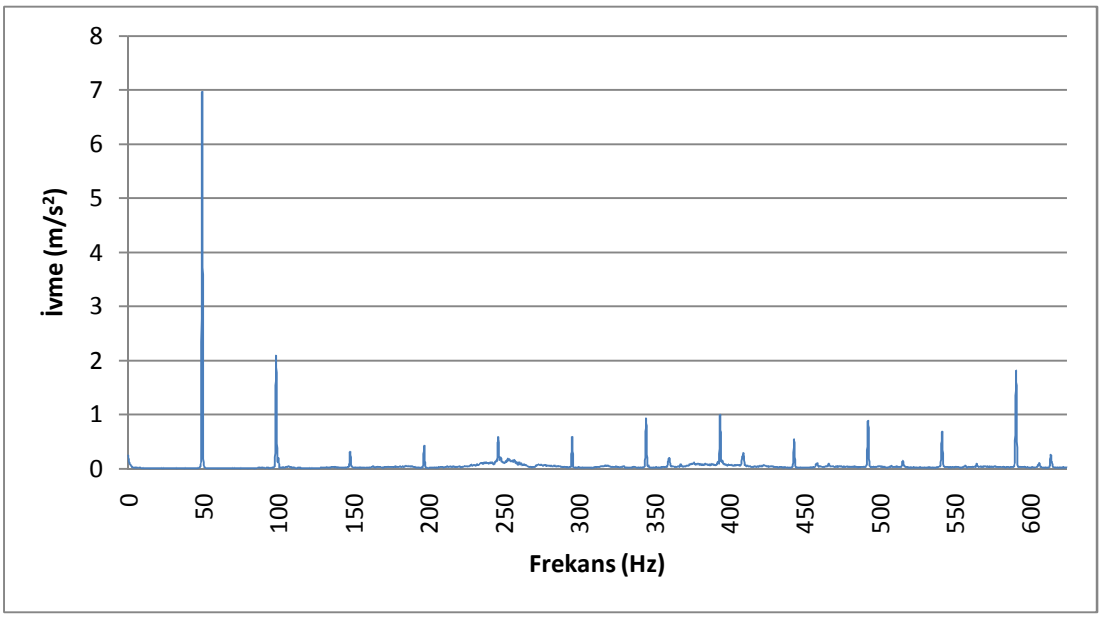
Şekil 7.2 : Standart motorda x yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.2'de standart motorda X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 3,36858 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.3 : Standart motorda y yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.3'te standart motorda Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 9,32989 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.4 : Standart motorda z yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.4'te standart motorda Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 6,9512 m/s^2 olmaktadır.

7.1.2 Çift mille dengelenmiş denge milsiz motor

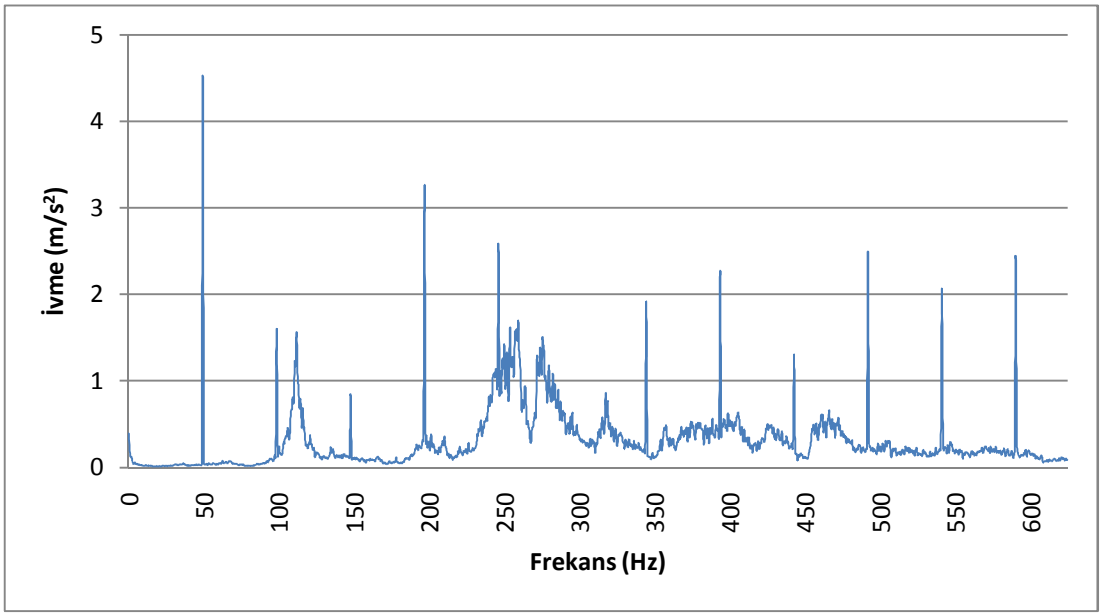
Şekil 7.8'de gösterilen çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik resminde görülen kayış kasnak mekanizmasındaki kayışın çıkartılması sonucu denge millerine olan kuvvet iletimi kesilerek ölçümler alınmıştır.

Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda krank karşı ağırlıklarıyla sadece merkezkaç kuvvetleri dengelenmeye çalışıldı. Bu nedenle krank karşı ağırlığı standart motor durumuna göre azaldı. Anadolu Motor tarafından yapılan analizlerin sonucunda çift mille dengelenmiş motor için krank karşı ağırlıklarının her birinin 1157,331 g ve bu karşı ağırlıkların ağırlık merkezlerinin krankın dönme eksenine uzaklığı da 32,36 mm olması kararlaştırılmıştır.

Ölçümler bu değerler göre yapılmış olmasına rağmen Mehmet Olgun'un "Tek Silindirli Bir Motorun Atalet Kuvvetlerinin Analizi ve Dengeleme Hesaplamaları" konulu yüksek lisans tez çalışmasında da hem teorik olarak hesaplamış olduğu hem de Adams'ta yapılan analizler sonucunda krank karşı ağırlıkları için 1134,42 g değerinin optimum olduğu görülmüştür.

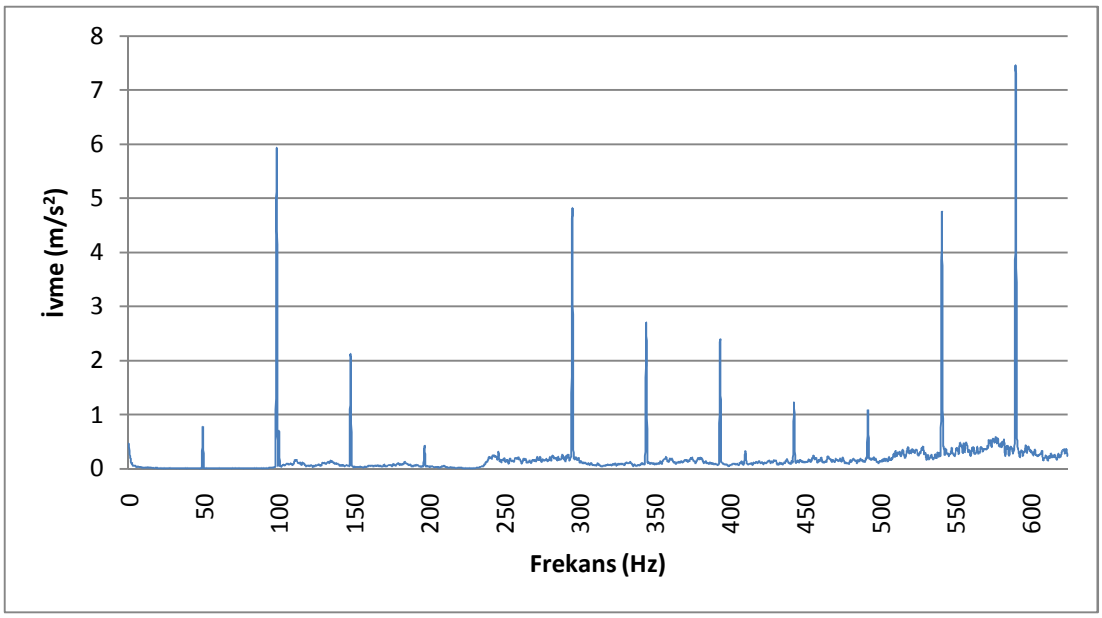
Ölçümler sonucunda krank karşı ağırlıklarının azalmış olması nedeniyle standart motora göre yatay yöndeki (Y) ivmenin azalması ve denge milli motordaki ivme

değerine yakın olması beklenmektedir. Krank karşı ağırlıklarının azalmasına bağlı olarak 1. dereceden atalet kuvvetlerindeki dengesizlik artacağı içinde dikey yöndeki (Z) ivme değerinde standart motora göre artış beklenmektedir.



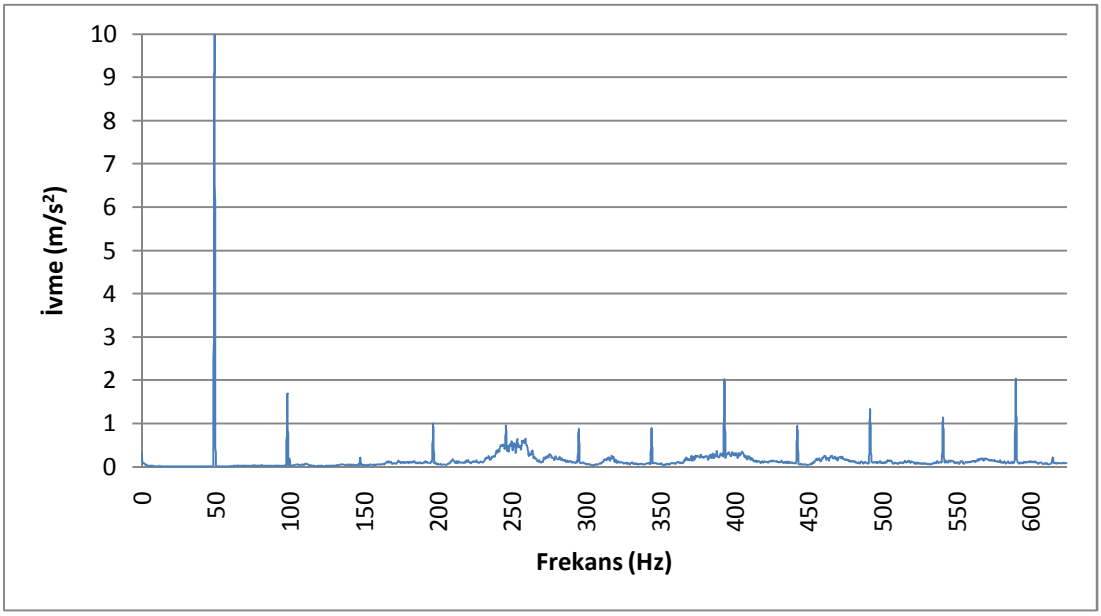
Şekil 7.5 : Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda x yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.5'te çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 4,53058 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.6 : Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda y yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.6'da çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 0,779688 m/s^2 olmaktadır. Standart motora göre karşı ağırlıklar azaldığı için beklendiği gibi Y yönündeki ivme değeri de standart motora göre azalmıştır. Bu durumda Y yönünde standart motora göre % olarak $\frac{9,32989-0,779688}{9,32989}\times 100 = 91,64$ iyileşme sağlanmıştır.



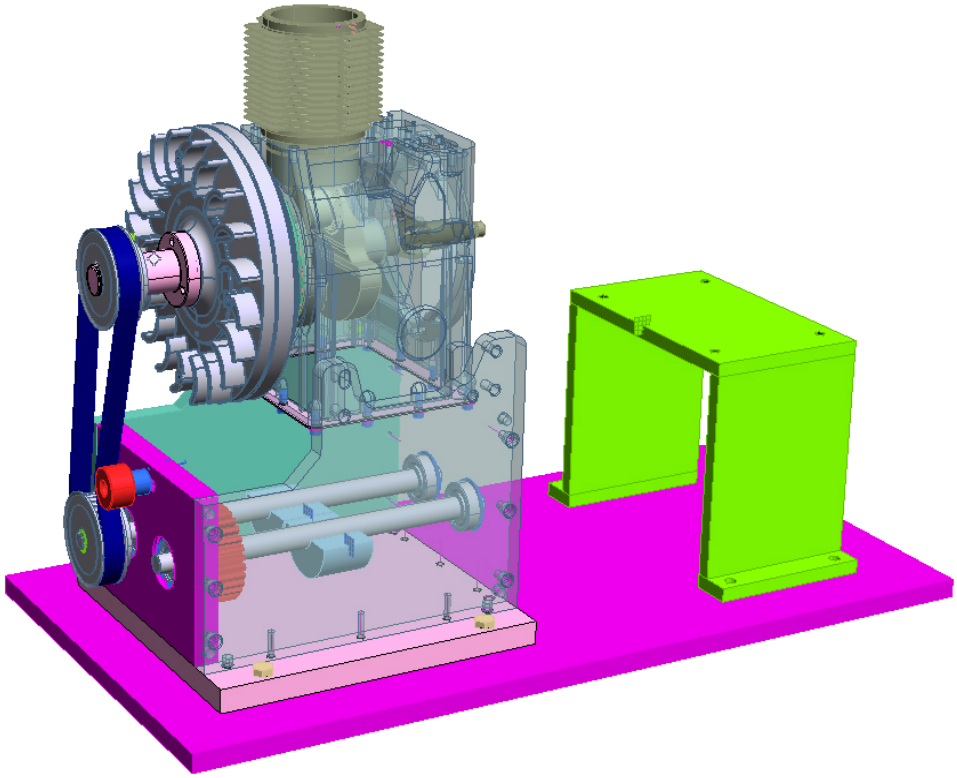
Şekil 7.7 : Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda z yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.7'de çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 9,99496 m/s^2 olmaktadır. Standart motora göre karşı ağırlığın azalmasına bağlı olarak dengesiz atalet kuvvetlerinin büyüklüğü de artacağı için beklendiği gibi Z yönündeki ivme değeri standart motora göre artmıştır. Bu durumda Z yönündeki ivme değeri standart motora göre % olarak $\frac{9,99496-6,9512}{9,99496}\times 100 = 30,45$ kötüleşmiştir.

7.1.3 Çift mille dengelenmiş denge milli motor

Şekil 7.8'de elektrik motoruyla tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik resmi görülmektedir. Birinci dereceden atalet kuvvetlerinin dengelenmesinde kullanılacak olan miller motorun altına dengeleme aparatı kutusuna yerleştirilmiştir. Dengeleme aparatı nedeniyle motorun boyu uzadığı için tahrikte kullanılacak elektrik motoru da bu durumu

karşılayacak şekilde bir plakanın üzerine oturtulmuştur. Krank hareketi kayış kasnak mekanizması sayesinde millere aktarılmaktadır. Gergi kasnağı kullanılarak kayış kasnak mekanizması istenilen sıkılıkta ayarlanmaktadır. Şekil 7.8'de ki mekanizma da kullanılan kasnakların çapları eşittir. Bu sayede krank ile aynı w hızında dönen kütlelerin merkezkaç kuvvetlerinin silindir eksenine paralel bileşenlerinin toplamı birinci dereceden atalet kuvvetlerini dengelemektedir. Dengeleme de kullanılan miller arasındaki kuvvet iletimi de eşit çaplı dişliler sayesinde olmaktadır. Böylece miller birbirlerine göre zıt yönlere dönmektedirler ve mil karşı ağırlıklarının oluşturduğu yatay kuvvetler kendi içinde sıfır olmaktadır. Bu durumda sisteme ek olarak yatay kuvvet gelmemektedir.



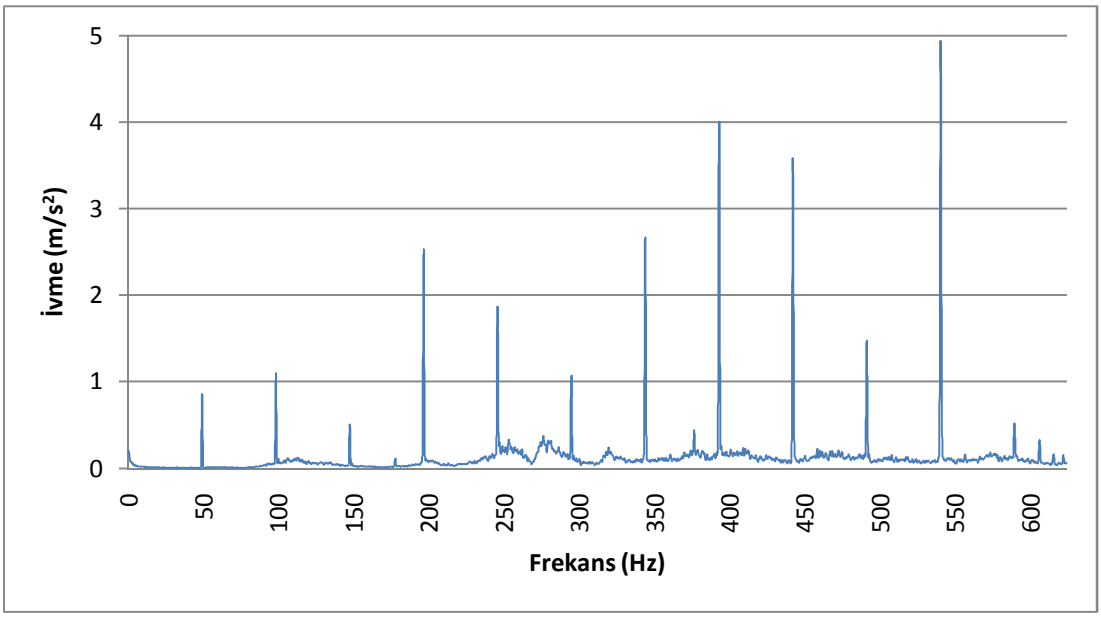
Şekil 7.8 : Elektrik motoruyla tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik gösterimi.

Anadolu Motor tarafından yapılan analizler sonucunda birinci dereceden atalet kuvvetlerini dengelemek için gerekli olan mil ağırlıklarının her birinin 1056,458g ve bu mil ağırlıklarının ağırlık merkezlerinin mil dönme eksenine uzaklığının 20,149 mm olması gerektiği sonucuna varılmış olup ölçümler bu değerlere göre yapılmıştır.

Mehmet Olgun'un "Tek Silindirli Bir Motorun Atalet Kuvvetlerinin Analizi ve Dengeleme Hesaplamaları" konulu yüksek lisans tez çalışmasında da hem teorik

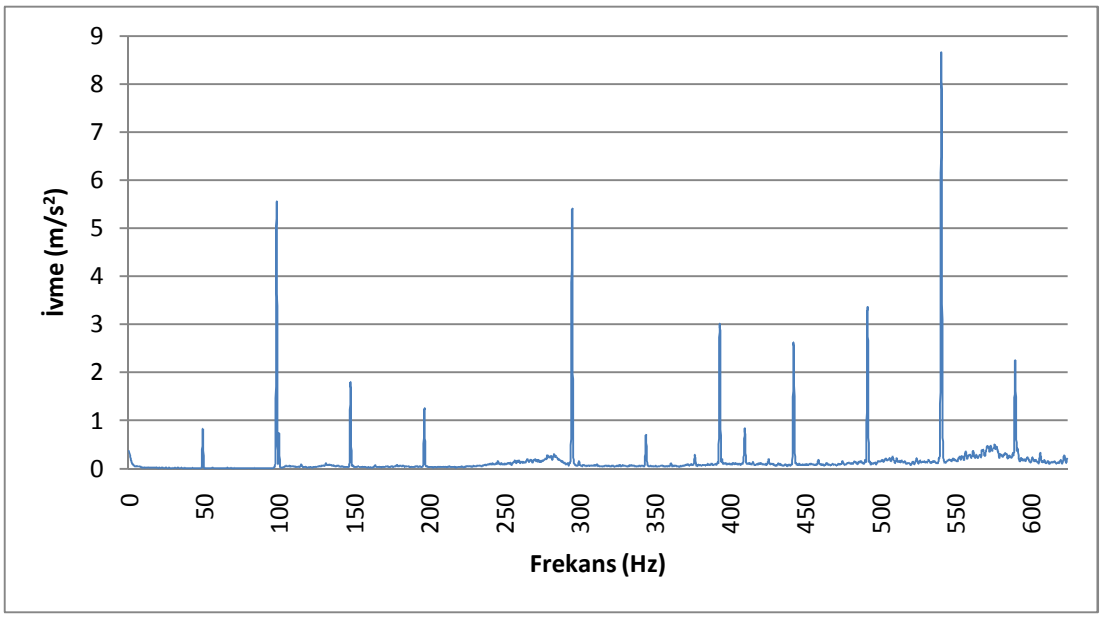
olarak hesaplamış olduğu hem de Adams'ta yapılan analizler sonucunda mil ağırlıklarının ağırlık merkezlerinin mil dönme eksenine uzaklığı 17,38 mm olması durumunda mil ağırlıklarının her biri için 1230,45 g değerinin optimum olduğu görülmüştür.

Çift mille dengelenmiş denge milli motor için yapılan ölçümler sonucunda yatay yöndeki (Y) ivme değerinin çift mille dengelenmiş denge milsiz motorun ivme değerine yakın veya eşit olması beklenmektedir. Çünkü kullanılan mil ağırlıklarının her birinin eşit olması ve zıt yönlere dönmesi nedeniyle yatay yönde (Y) oluşan kuvvetler birbirlerini dengelemektedir. Denge milleri kullanılarak birinci dereceden atalet kuvvetleri dengelenmek istendiği için de dikey yönde (Z) ölçülen ivme değerinin çift mille dengelenmiş denge milsiz motora göre daha düşük olması beklenmektedir.



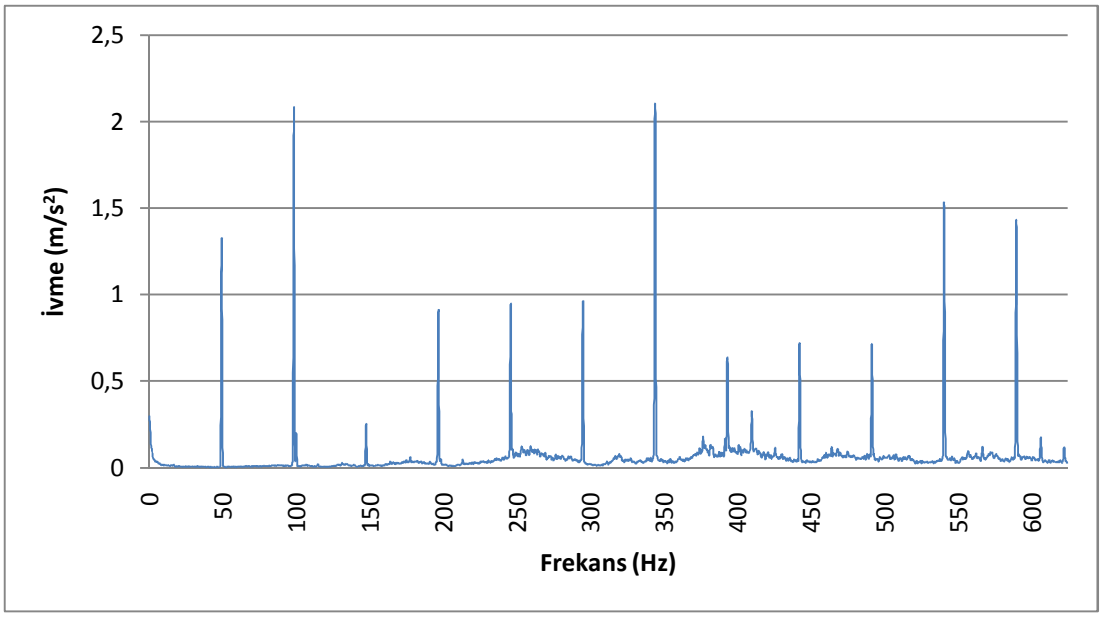
Şekil 7.9 : Çift mille dengelenmiş denge milli motorda x yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.9'da çift mille dengelenmiş denge milli motorda X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 0,858064 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.10 : Çift mille dengelenmiş denge milli motorda y yönünde ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.10'da çift mille dengelenmiş denge milli motorda Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 0,822404 m/s^2 olmaktadır. Dengeleme milleri Y yönünde sisteme herhangi bir ek kuvvet getirmediği için beklendiği gibi çift mille dengelenmiş denge milsiz motorun Y yönündeki ivme değerine oldukça yakın değerler ölçülmüştür. Aradaki %5'lik farkın ölçmeden kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 7.11 : Çift mille dengelenmiş denge milli motorda z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.11'de çift mille dengelenmiş denge milli motorda Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 1,32725 m/s^2 olmaktadır. Z yönündeki ivme değeri standart motora göre % olarak $\frac{6,9512-1,32725}{6,9512}\times 100 = 80,9$ iyileşmiştir. Çift mille dengelenmiş denge milsiz motora göre ise % olarak $\frac{9,99496-1,32725}{9,99496}\times 100 = 86,7$ iyileşmiştir.

7.2 Gaz Kuvvetleriyle Tahrik

Gaz kuvvetleri dengeleme hesaplarında dikkate alınmamasına rağmen çift mille dengelenmiş denge milli motorda standart motora göre gerçek çalışma şartlarında ne düzeyde iyileşmeler olduğunu görebilmek için gaz kuvvetleriyle tahrik altında da ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler krank ekseni doğrultusunda gövde yanından ve külbütör kapağı üstünden alınmıştır.

Gaz kuvvetleriyle tahrikte yanmanın da söz konusu olması nedeniyle ölçüm sonuçları elde edilen grafiklerde 25 Hz ve katlarında da pikler oluşmuştur.

Gaz kuvvetleriyle tahrik edilen motorda üretilen mekanik enerji alternatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Elektrik motoruyla tahrik edilen sistemlerde yapılan ölçümlerde elektrik motoru bulunurken, gaz kuvvetleriyle tahrik edilen prototiplerde elektrik motorunun yerinde alternatör bulunmaktadır.

Alternatörler doğru akım üreteçleriyle aynı mantıkla çalışırlar. Bir iletkenin etrafındaki manyetik alan değişince iletkende bir akım oluşur. Modern tipik bir alternatörde rotor denilen mıknatıslar, demir cevherine sarılmış olan stator denilen sabit iletken sargıların içinde veya etrafında dönerler. Mekanik enerjinin rotorları döndürmesiyle iletkenler etrafındaki manyetik alan değişir ve elektrik akımı üretilmiş olur.

Alternatörün kısımları;

- Rotor: Rotor, çekirdekleri (manyetik kutuplar) bir manyetik alan bobini (rotor) kayar bilezikler ve bir rotor milinden meydana gelmiştir.
- Stator: Stator, stator çekirdekleri ve stator bobinlerinden meydana gelmiştir ve ön ve arka kapaklara tutturulmuştur. Stator çekirdeği, çelik kaplanmış ince plakalardan meydana gelir.

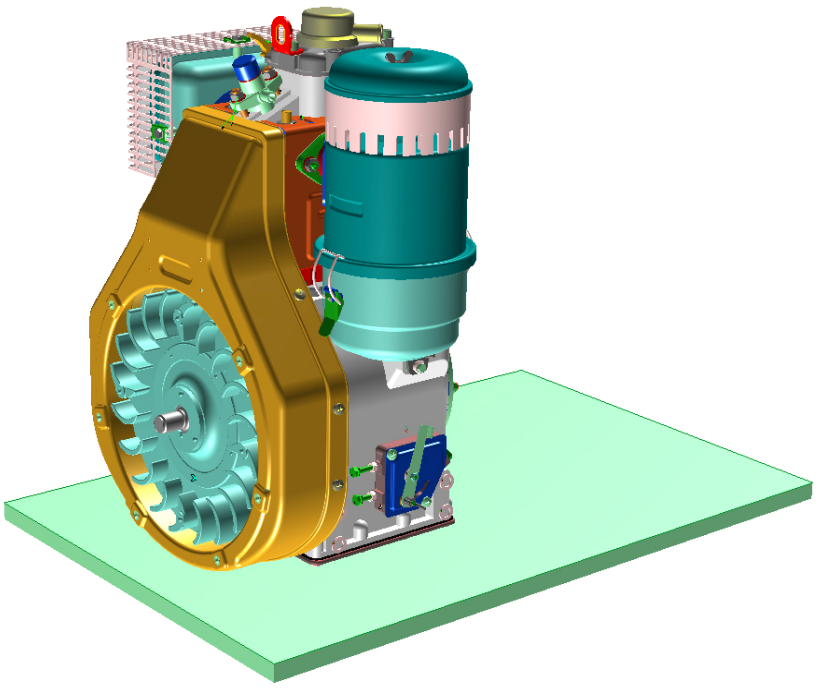
- Diyotlar: Eş yüklü diyot tablaları içinde, üç adet pozitif ve üç adet negatif diyot bulunur. Alternatör tarafından üretilen akım, uç kapaklardan yalıtılmış pozitif yönlü diyot tablalarından verilir.

Dizel motorun mazot pompasında regülatör olması gerekir. Regülatör sayesinde ani yük değişimlerinde devir sabit tutulur. Alternatör etiketinde belirtilen nominal yükteki devirdir. Dizele akuple edilen alternatörün boşta çalışma esnasında devri, etiket üzerindeki belirtilen devirden %4,5 fazlasına ayarlanmalıdır. Bunun için alternatör frekansı 52 Hz'e ayarlanmıştır. Frekansı boşta 52 Hz ayarlanan alternatör tam yüklendiğinde frekansı 50 Hz olur.

7.2.1 Standart motorda gövde yanından alınan ölçümler

Gaz kuvvetleriyle tahrikte krank ekseni doğrultusunda gövde yanından alınan ölçümler standart motor için gerçekleştirilmiştir. Standart motor hem boşta hem de tam yük durumlarında incelenmiştir.

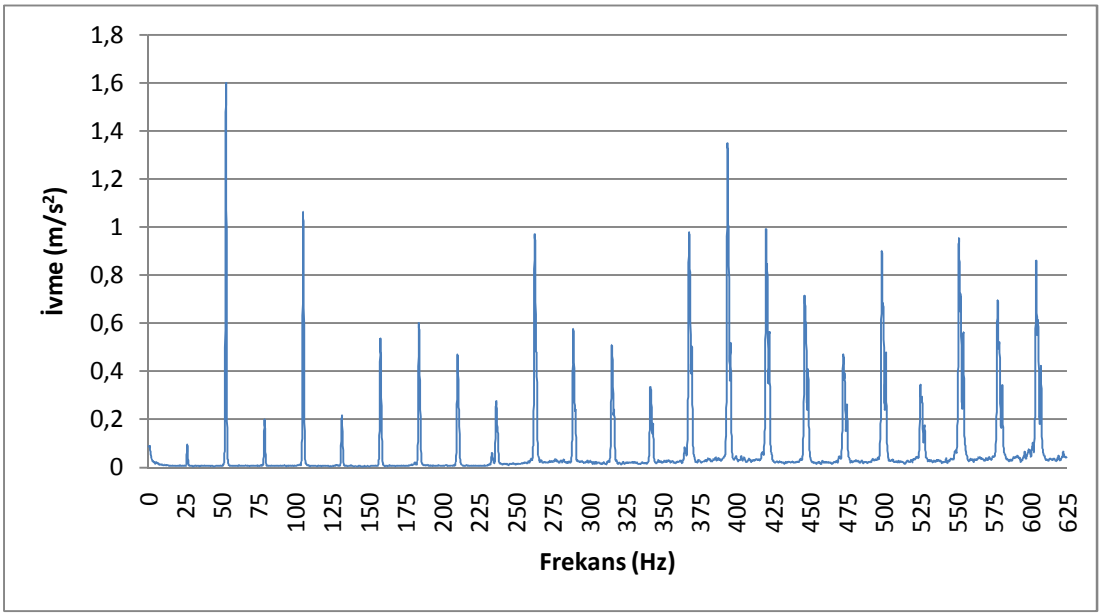
Şekil 7.12'de gaz kuvvetleriyle tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan standart motorun şematik resmi görülmektedir. Motor cıvatalarla pleyte bağlanmış, pleytte lastik takozlarla zemine bağlanmıştır. Volanın tam tersi yönde alternatör bulunmaktadır. Alternatör boşta ve tam yükteyken ölçümler alınmıştır.



Şekil 7.12 : Gaz kuvvetleriyle tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan standart motorun şematik gösterimi.

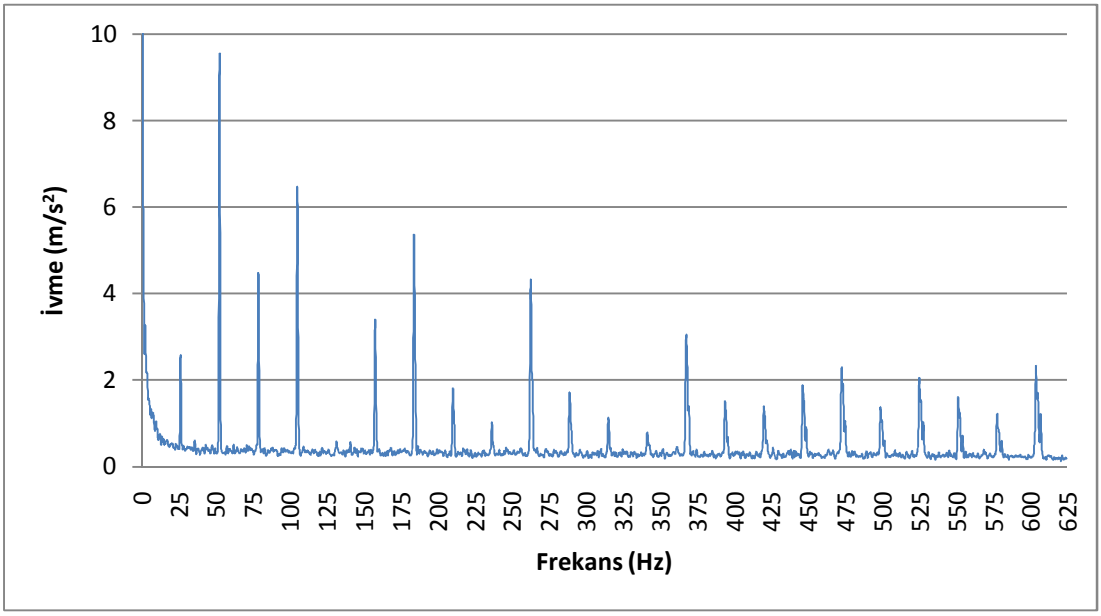
7.2.1.1 Standart motor boştayken gövde yanından alınan ölçümler

Standart motor boşta çalışırken alternatör frekansı 52 Hz'e ayarlandığı için ölçüm sonucunda oluşan harmoniklerin 52 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir.



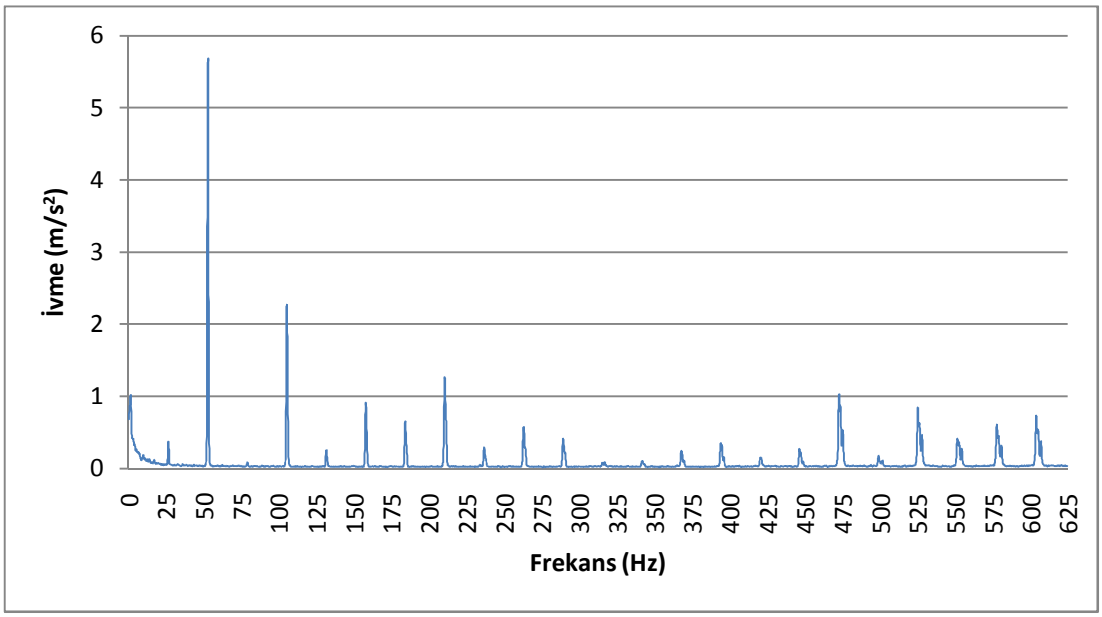
Şekil 7.13 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.13'te standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,04 Hz'de 1,58598 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.14 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.14'te standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,04 Hz'de 9,46578 m/s^2 olmaktadır.

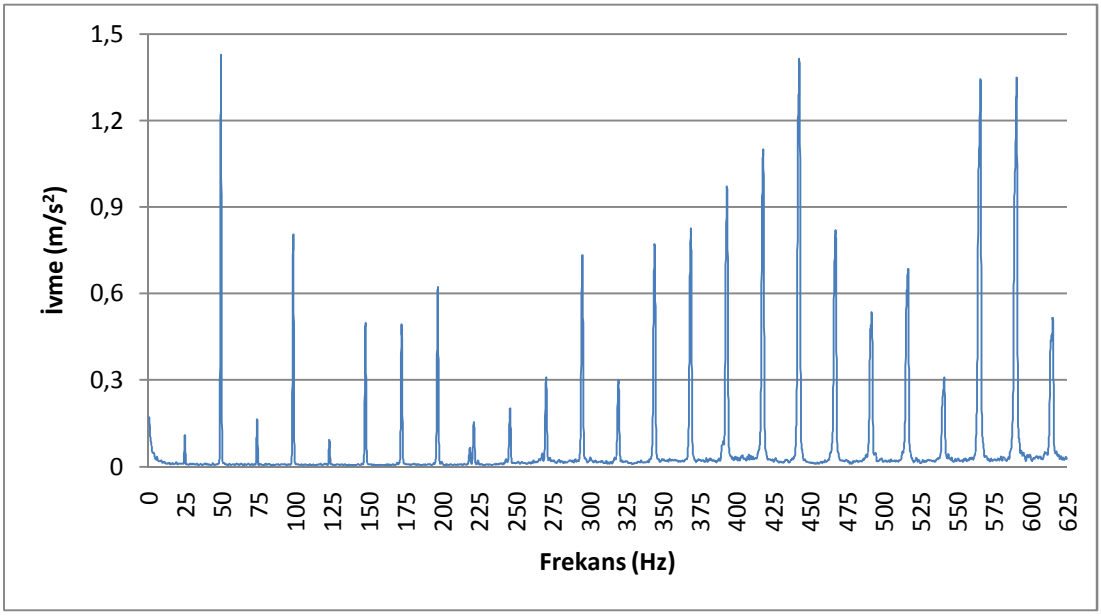


Şekil 7.15 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.15'te standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,04 Hz'de 5,62756 m/s^2 olmaktadır.

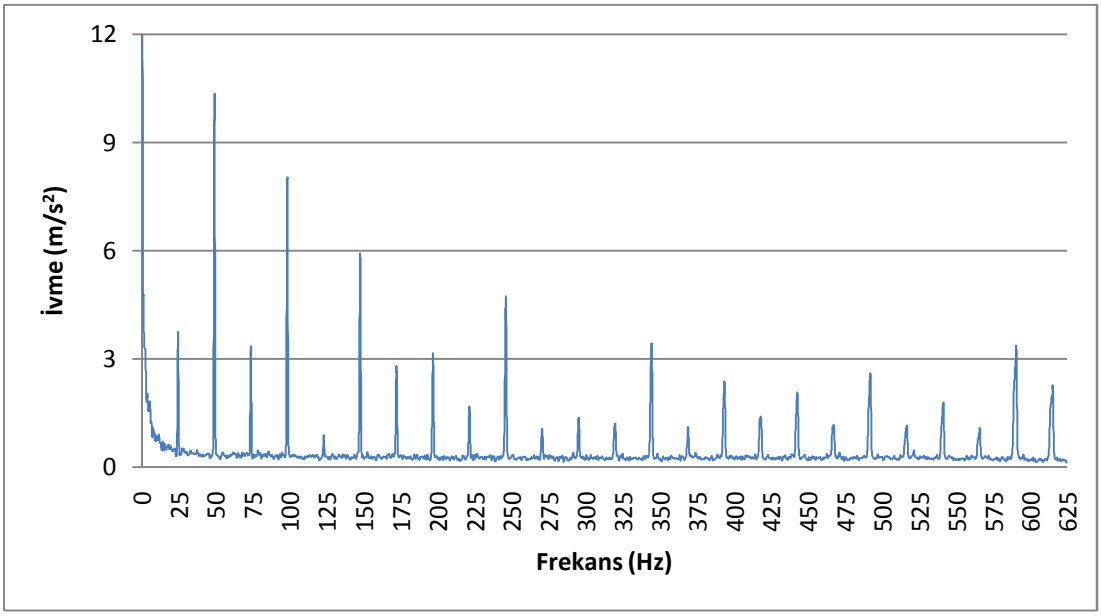
7.2.1.2 Standart motor tam yükteyken gövde yanından alınan ölçümler

Standart motor tam yükte çalışma koşullarında yapılan ölçüm sonuçlarında oluşan harmoniklerin 50 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir.



Şekil 7.16 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

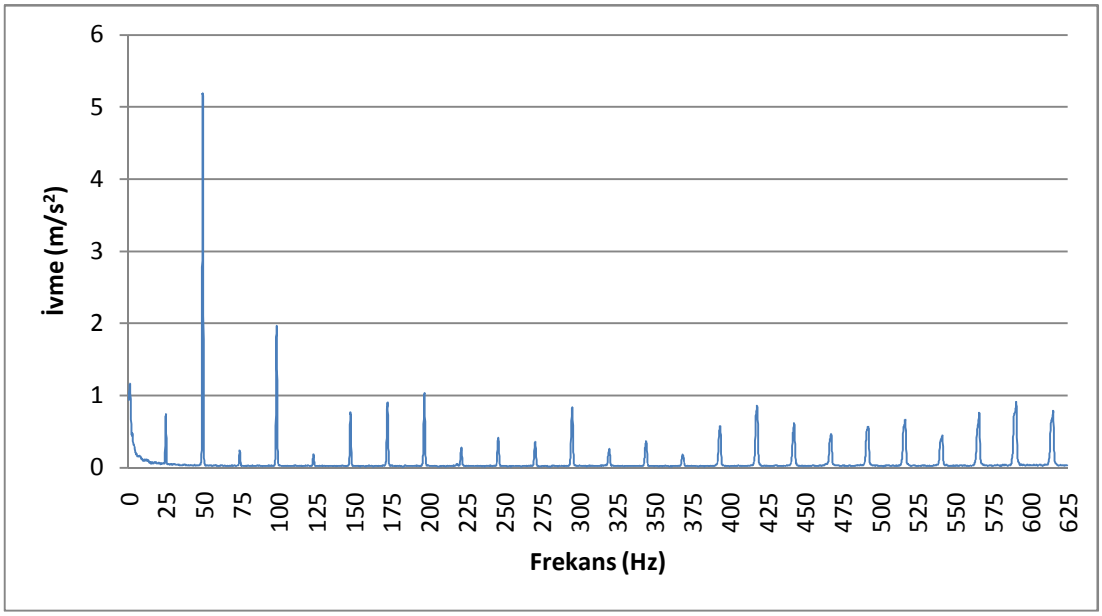
Şekil 7.16'da standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 1,42618 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.17 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.17'de standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 10,3505 m/s^2 olmaktadır.

Standart motorun boşta olması durumuna göre Y yönündeki ivme değerleri % olarak $\frac{10,3505-9,46578}{10,3505}\times 100=8,54$ kötüleşmiştir.



Şekil 7.18 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.18'de standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 49,53 Hz'de 5,19544 m/s^2 olmaktadır. Z yönündeki ivme değerleri standart motorun boşta olması durumuna göre % olarak $\frac{5,62756-5,19544}{5,62756}\times 100=7,67$ iyileşmiştir.

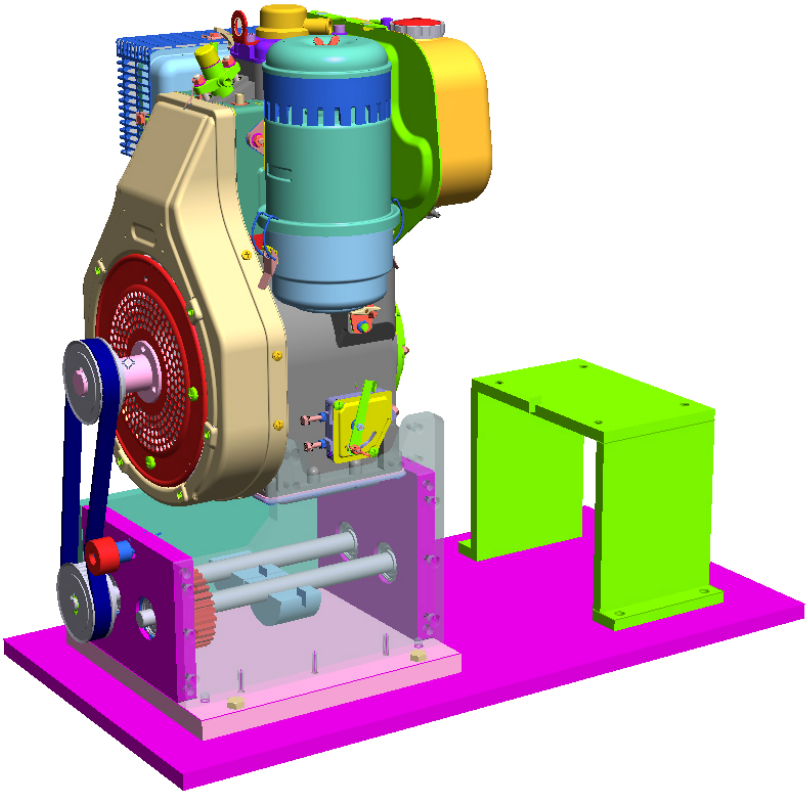
7.2.2 Çift mille dengelenmiş denge milli motorda gövde yanından alınan ölçümler

Şekil 7.19'da gaz kuvvetleriyle tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik resmi görülmektedir. Dengeleme millerinin içinde bulunduğu dengeleme aparatı motorun altına konulduğu için motorun boyunun uzaması nedeniyle alternatör de bir plaka üzerine yerleştirilmiştir. Krank hareketi kayış kasnak mekanizmasıyla dengeleme millerine aktarılmıştır.

Bölüm 7.1.2. ve 7.1.3.'te bahsedildiği gibi Anadolu Motor tarafından yapılan analizler sonucunda çift mille dengelenmiş denge milli motor için krank karşı ağırlıkları 1157,331 g ve bu ağırlıkların ağırlık merkezlerinin krank dönme eksenine uzaklığı da 32,36 mm olarak belirlenmiştir. Dengeleme milleri üzerinde bulunan

karşı ağırlıkların her birinin de 1056,458g ve bu ağırlıkların ağırlık merkezlerinin dengeleme millerinin dönme eksenine uzaklığı da 20,149 mm olarak belirlenmiştir.

Ölçümler bu değerler esas alınarak yapılmasına rağmen Mehmet Olgun'un "Tek Silindirli Bir Motorun Atalet Kuvvetlerinin Analizi ve Dengeleme Hesaplamaları" konulu yüksek lisans tez çalışmasında krank karşı ağırlıklarının 1134,42 g olması, bu ağırlıkların ağırlık merkezlerinin krank dönme eksenine uzaklığının da 32,36 mm olması ve dengeleme milleri üzerinde bulunan karşı ağırlıkların her birinin 1230,45 g olması, bu ağırlıkların ağırlık merkezlerinin dengeleme millerinin dönme eksenine uzaklığının da 17,38 mm olması durumunda motorun daha dengeli duruma geleceği gösterilmiştir.

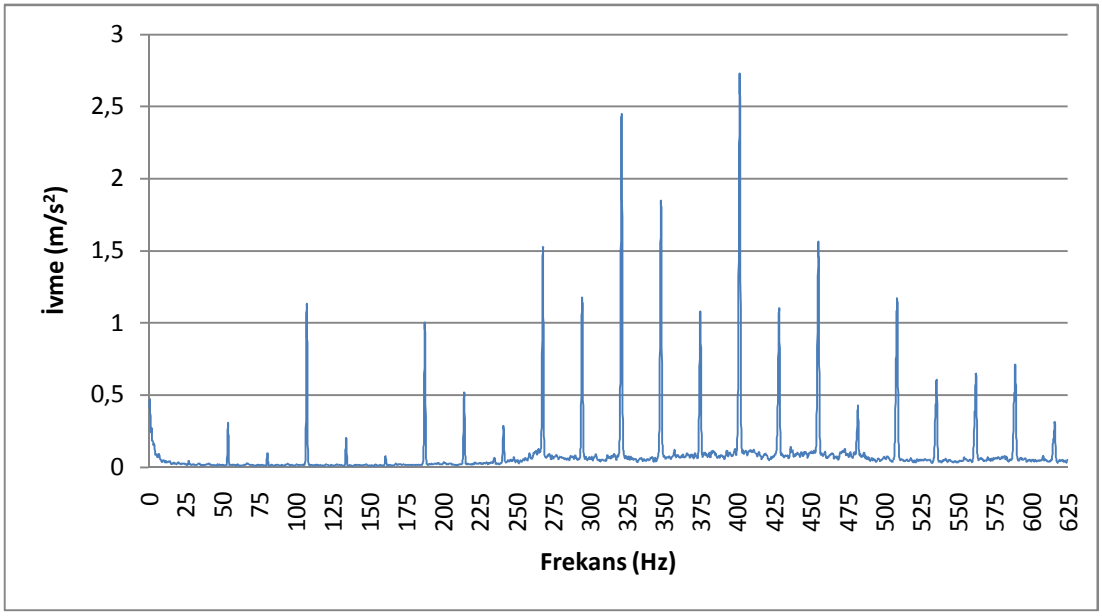


Şekil 7.19 : Gaz kuvvetleriyle tahrik edilerek yapılan ölçümlerde kullanılan çift mille dengelenmiş denge milli motorun şematik gösterimi.

7.2.2.1 Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gövde yanından alınan ölçümler

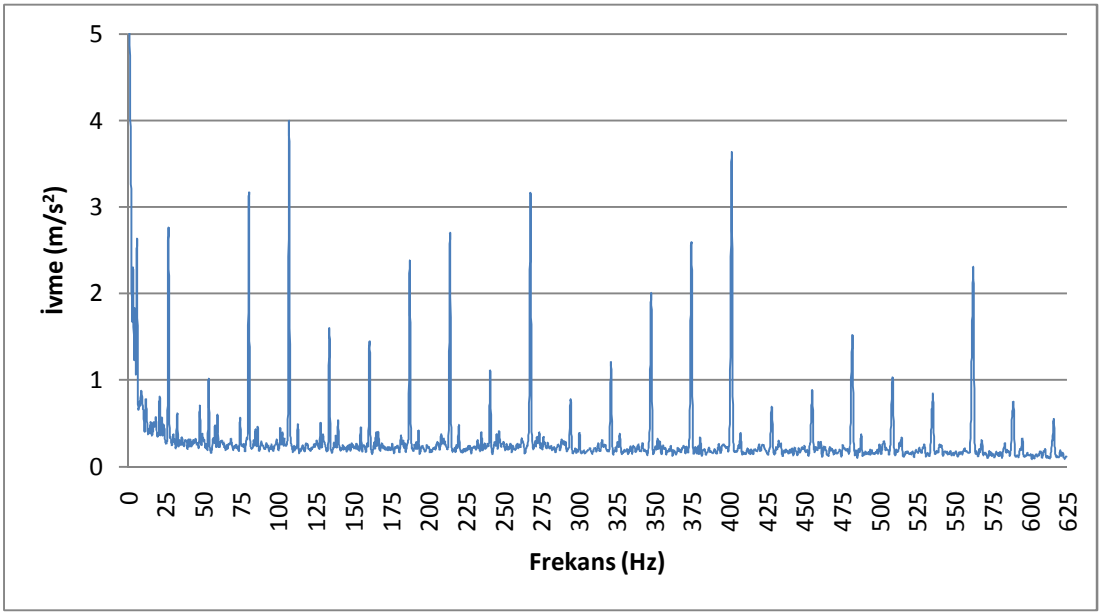
Çift mille dengelenmiş denge milli motor boşta çalışırken alternatör frekansı 52 Hz'e ayarlandığı için ölçüm sonucunda oluşan harmoniklerin 52 Hz ve katlarında oluşması

beklenmektedir. Ölçümler sonucunda dengelenmiş motorun krank karşı ağırlıklarının azalmış olması nedeniyle standart motorun boşta çalışma durumuna göre yatay yöndeki (Y) ivmenin azalması beklenmektedir. Birinci dereceden atalet kuvvetleri denge millerindeki ağırlıklarla karşılanacağı için dikey yöndeki (Z) ivme değerinde de standart motorun boşta çalışması durumuna göre azalması beklenmektedir.



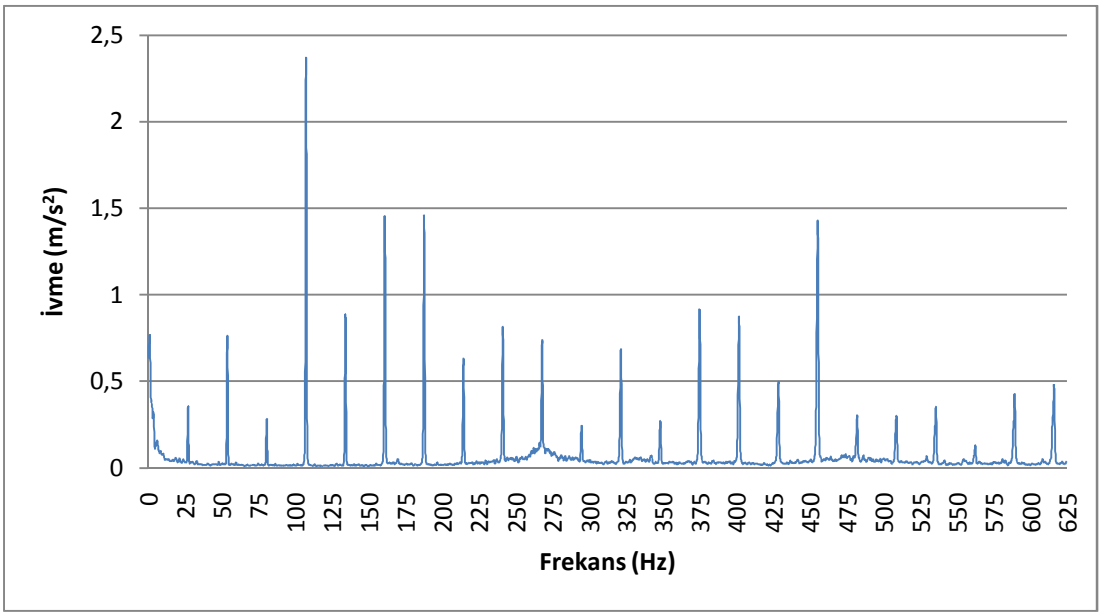
Şekil 7.20 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.20'de çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,82 Hz'de 0,307662 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.21 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.21'de çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,82 Hz'de 1,01144 m/s^2 olmaktadır. Standart motorun gaz kuvvetleriyle tahrikte boşta çalışmasına göre Y yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{9,46578-1,01144}{9,46578}\times 100 = 89,3$ oranında iyileşmiştir.

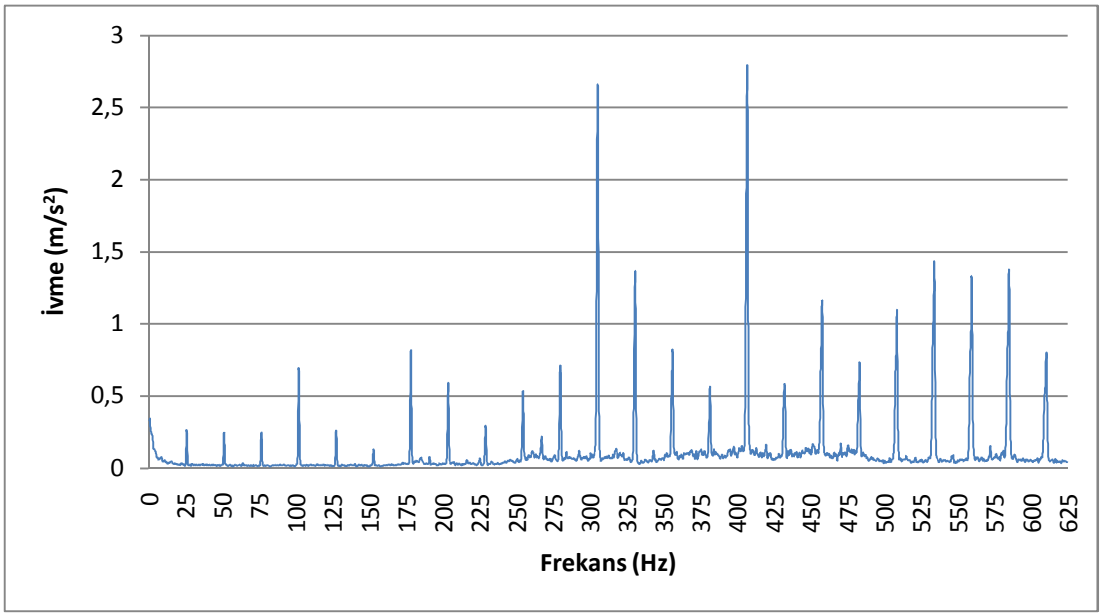


Şekil 7.22 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.22'de çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,82 Hz'de 0,760855 m/s^2 olmaktadır. Z yönündeki ivme değeri standart motorun gaz kuvvetleriyle tahrikte boşta çalışmasına göre % olarak $\frac{5,62756-0,760855}{5,62756}\times 100 = 86,4$ oranında iyileşmiştir.

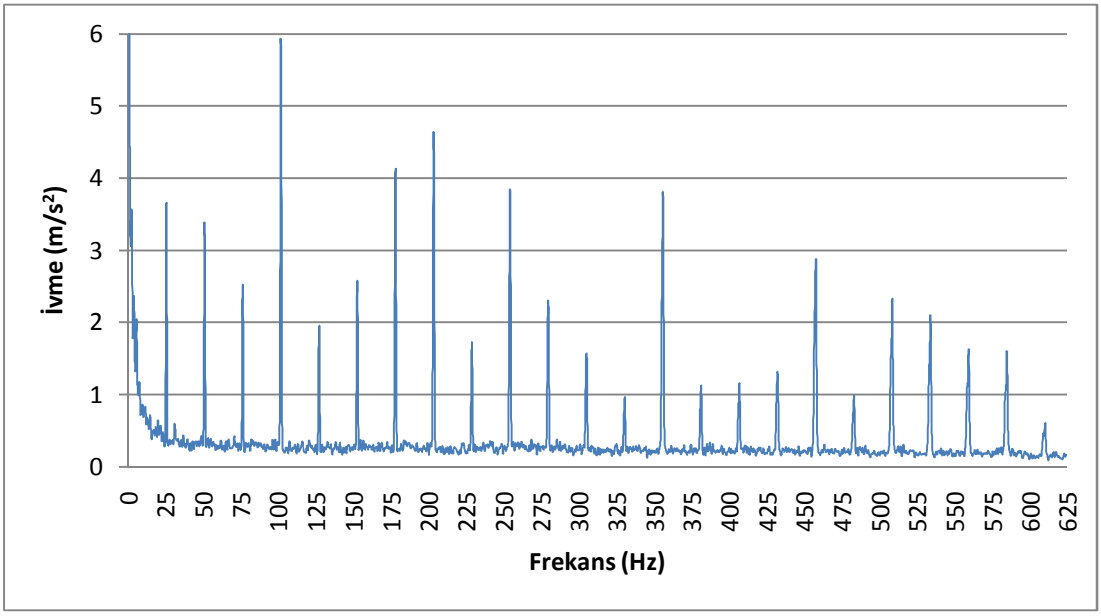
7.2.2.2 Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gövde yanından alınan ölçümler

Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükte çalışma koşullarında yapılan ölçüm sonuçlarında oluşan harmoniklerin 50 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir. Ölçümler sonucunda dengelenmiş motorun krank karşı ağırlıklarının azalmış olması nedeniyle standart motorun boşta çalışma durumuna göre yatay yöndeki (Y) ivmenin azalması beklenmektedir. Birinci dereceden atalet kuvvetleri denge millerindeki ağırlıklarla karşılanacağı için dikey yöndeki (Z) ivme değerinde de standart motorun boşta çalışması durumuna göre azalması beklenmektedir.



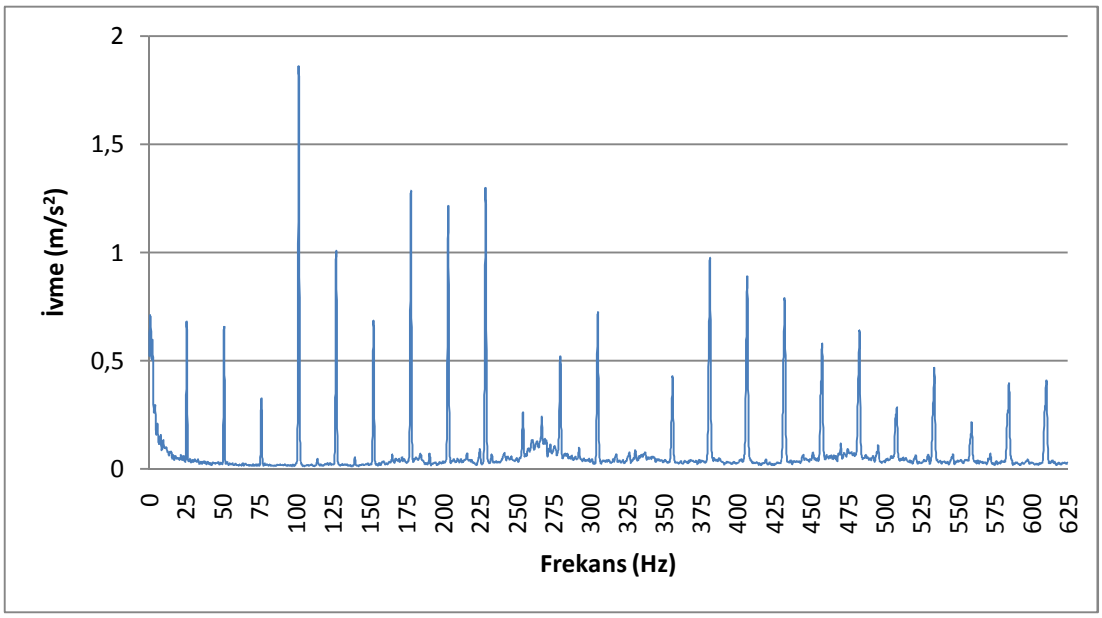
Şekil 7.23 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.23'te çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 51,09 Hz'de 0,245154 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.24 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.24'te çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 51,09 Hz'de 3,3642 m/s^2 olmaktadır. Standart motorun gaz kuvvetleriyle tahrikte tam yükte olması durumuna göre Y yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{10,3505-3,3642}{10,3505}\times 100 = 67,49$ oranında iyileşmiştir. Çift mille dengelenmiş denge milli motorun boşta olması durumuna göre ise Y yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{3,3642-1,01144}{3,3642}\times 100 = 69,93$ oranında kötüleşmiştir.



Şekil 7.25 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

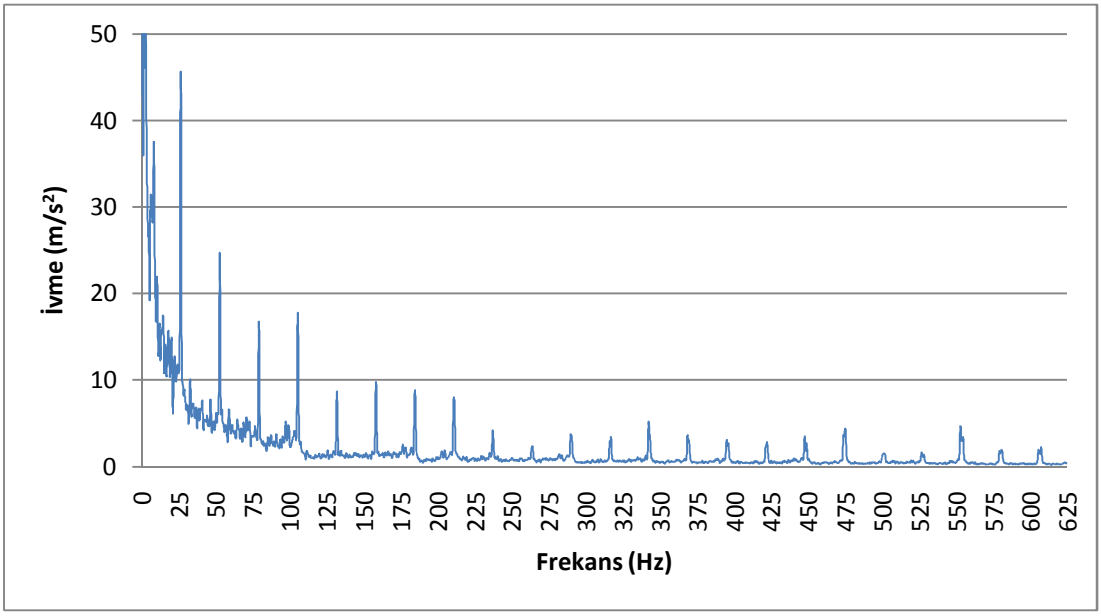
Şekil 7.25'te çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 51,09 Hz'de 0,65153 m/s^2 olmaktadır. Standart motorun gaz kuvvetleriyle tahrikte tam yükte olması durumuna göre Z yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{5,19544-0,65153}{5,19544}\times 100 = 87,45$ oranında iyileşmiştir. Çift mille dengelenmiş denge milli motorun boşta olması durumuna göre ise Z yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{0,760855-0,65153}{0,760855}\times 100 = 14,3$ oranında iyileşmiştir.

7.2.3 Standart motorda külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler

Gaz kuvvetleriyle tahrikte külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler standart motor boştayken ve tam yük durumlarında incelenmiştir. Gaz kuvvetlerinin etkisi külbütör kapağı üstünden alınan ölçümlerde, krank ekseni doğrultusunda gövde yanından alınan ölçümlere göre daha büyük olacağı için ölçüm sonuçlarında okunan ivme değerlerinin de daha büyük olması beklenmektedir.

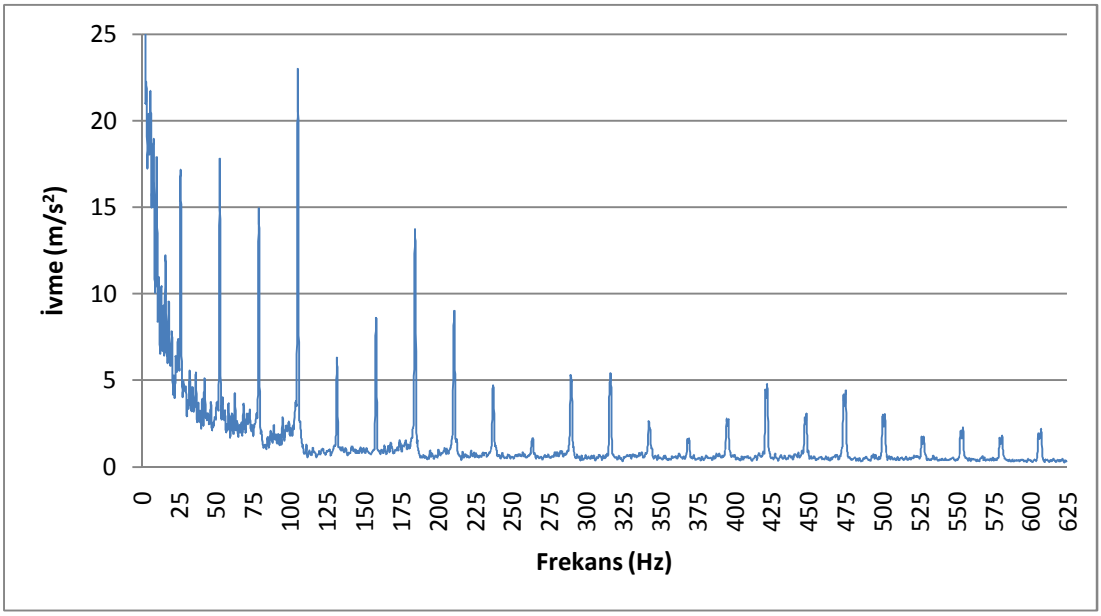
7.2.3.1 Standart motor boştayken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler

Standart motor boşta çalışırken alternatör frekansı 52 Hz'e ayarlandığı için ölçüm sonucunda oluşan harmoniklerin 52 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir.



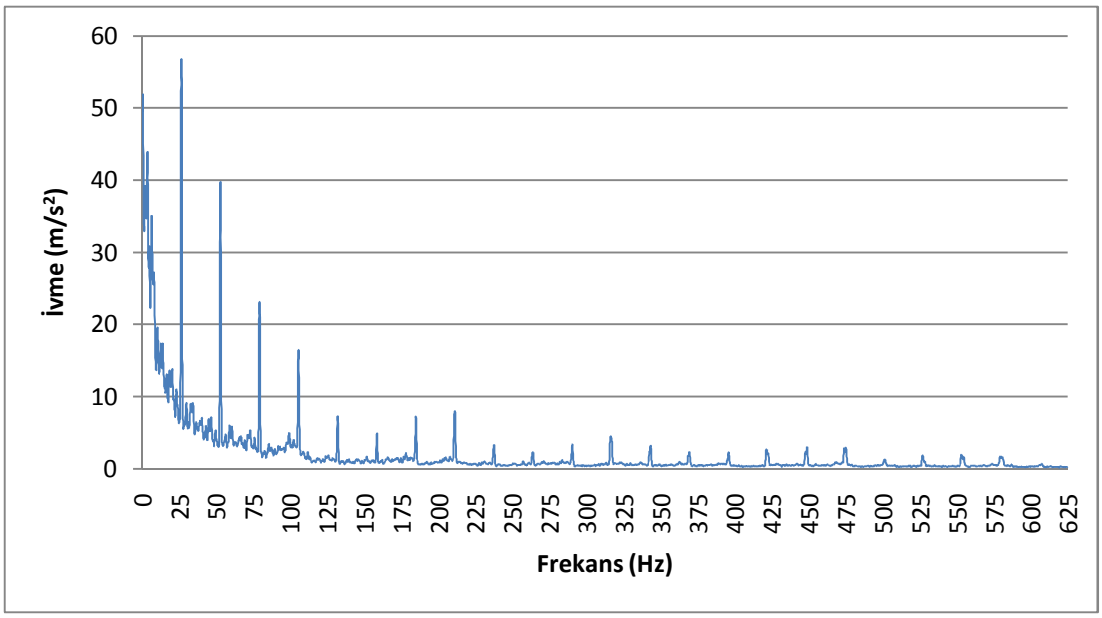
Şekil 7.26 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.26'da standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,04 Hz'de 24,6566 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.27 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.27'de standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,04 Hz'de 17,7965 m/s^2 olmaktadır.

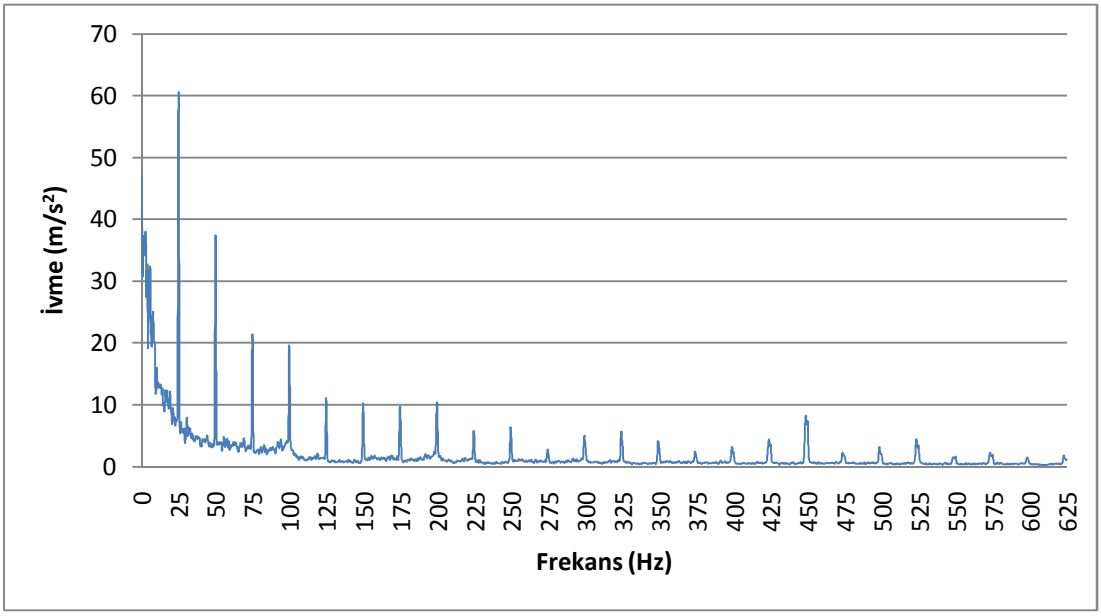


Şekil 7.28 : Standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.28'de standart motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,04 Hz'de 39,7514 m/s^2 olmaktadır.

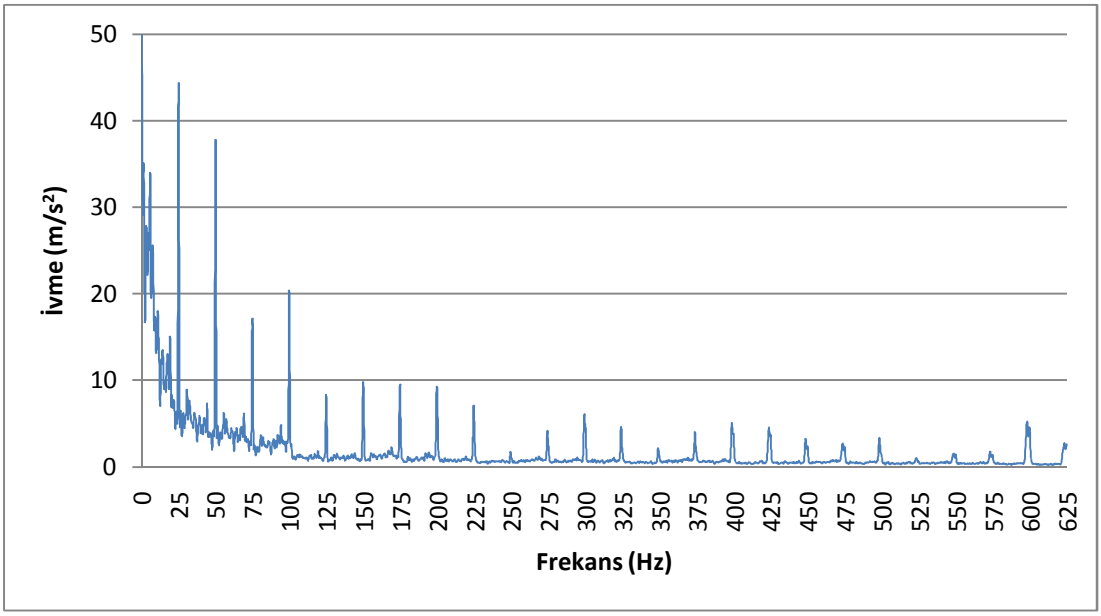
7.2.3.2 Standart motor tam yükteyken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler

Standart motor tam yükte çalışma koşullarında yapılan ölçüm sonuçlarında oluşan harmoniklerin 50 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir.



Şekil 7.29 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

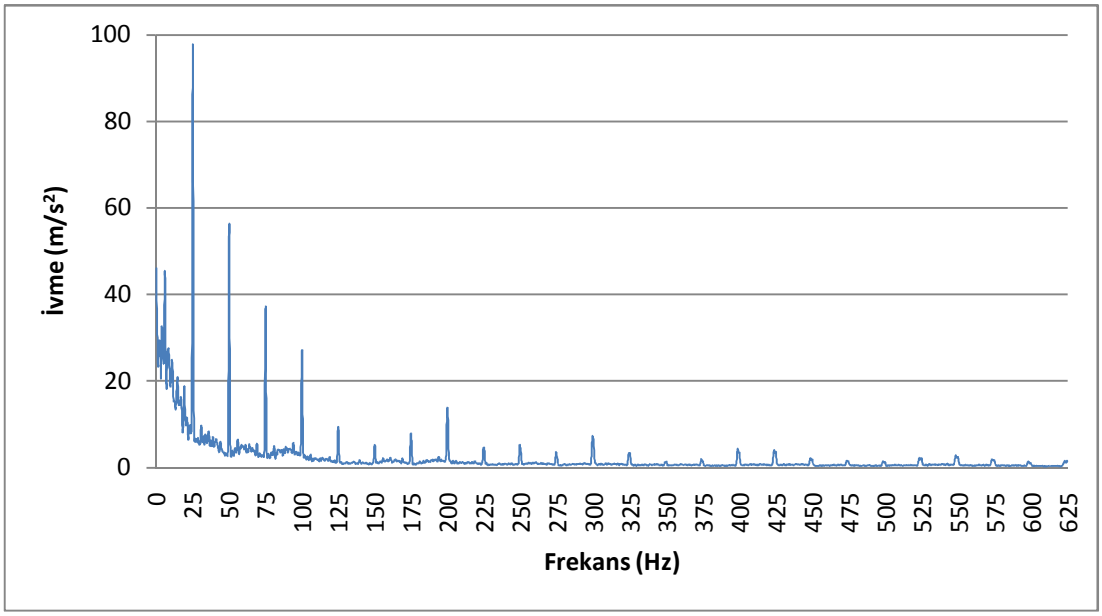
Şekil 7.29'da standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 50,31 Hz'de 37,054 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.30 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.30'da standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 50,31 Hz'de 37,4974 m/s^2 olmaktadır.

Gaz kuvvetleriyle tahrikte standart motorun boşta olması duruma göre Y yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{37,4974-17,7965}{37,4974}\times 100 = 52,5$ oranında kötüleşmiştir.



Şekil 7.31 : Standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

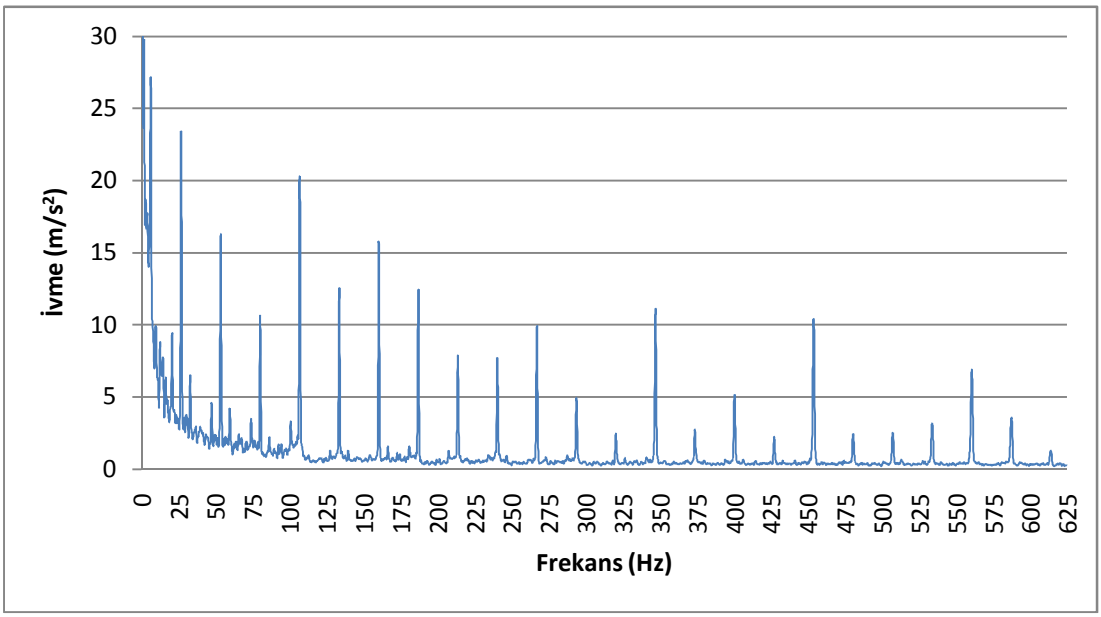
Şekil 7.31'de standart motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 50,31 Hz'de 55,8925 m/s^2 olmaktadır. Gaz kuvvetleriyle tahrikte standart motorun boşta olması duruma göre Z yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{55,8925-39,7514}{55,8925}\times 100 = 28,8$ oranında kötüleşmiştir.

7.2.4 Çift mille dengelenmiş denge milli motorda külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler

Gaz kuvvetleriyle tahrikte külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler çift mille dengelenmiş denge milli motor boşta ve tam yük durumlarında incelenmiştir. Gaz kuvvetlerinin etkisi külbütör kapağı üstünden alınan ölçümlerde, krank ekseni doğrultusunda gövde yanından alınan ölçümlere göre daha büyük olacağı için ölçüm sonuçlarında okunan ivme değerlerinin de daha büyük olması beklenmektedir.

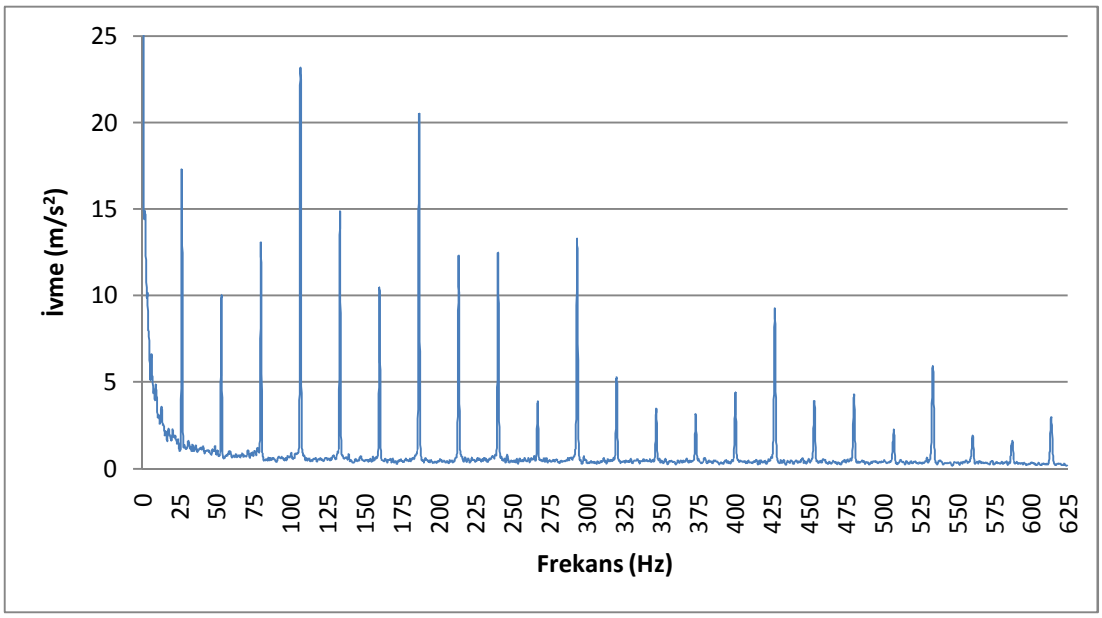
7.2.4.1 Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler

Çift mille dengelenmiş denge milli motor boşta çalışırken alternatör frekansı 52 Hz'e ayarlandığı için ölçüm sonucunda oluşan harmoniklerin 52 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir. Ölçümler sonucunda dengelenmiş motorun krank karşı ağırlıklarının azalmış olması nedeniyle standart motorun boşta çalışma durumuna göre yatay yöndeki (Y) ivmenin azalması beklenmektedir. Birinci dereceden atalet kuvvetleri denge millerindeki ağırlıklarla karşılanacağı için dikey yöndeki (Z) ivme değerinde de standart motorun boşta çalışması durumuna göre azalması beklenmektedir.



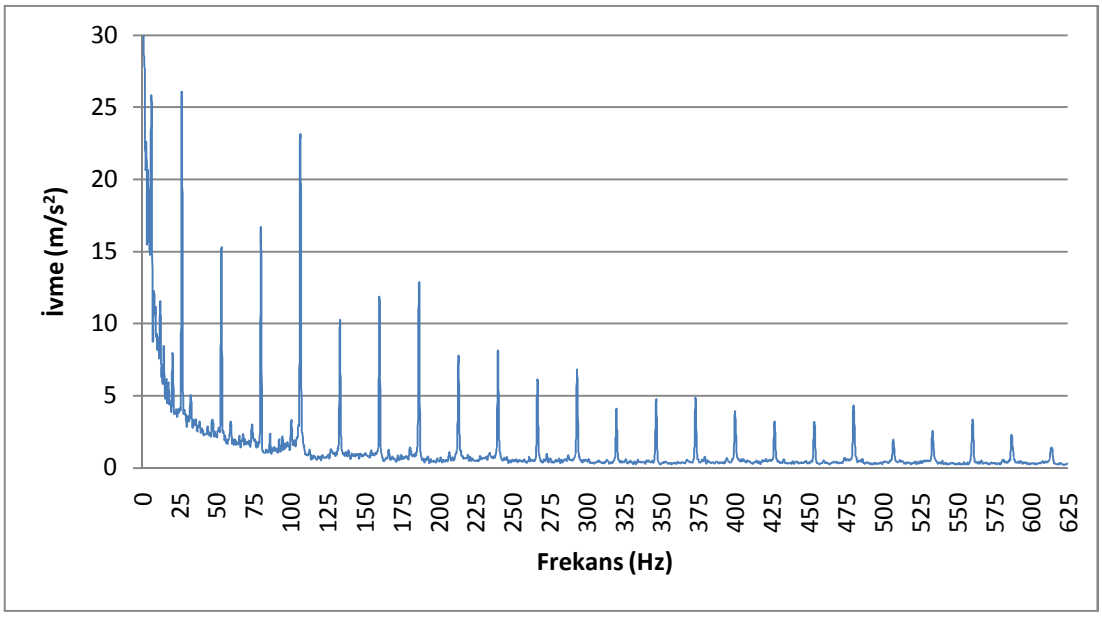
Şekil 7.32 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.32'de çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,82 Hz'de 16,1747 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.33 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.33'te çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,82 Hz'de 9,93738 m/s^2 olmaktadır. Y yönündeki ivme değeri standart motorun gaz kuvvetleriyle tahrikte boşta çalışmasına göre % olarak $\frac{17,7965-9,93738}{17,7965}\times 100 = 44,1$ oranında iyileşmiştir.

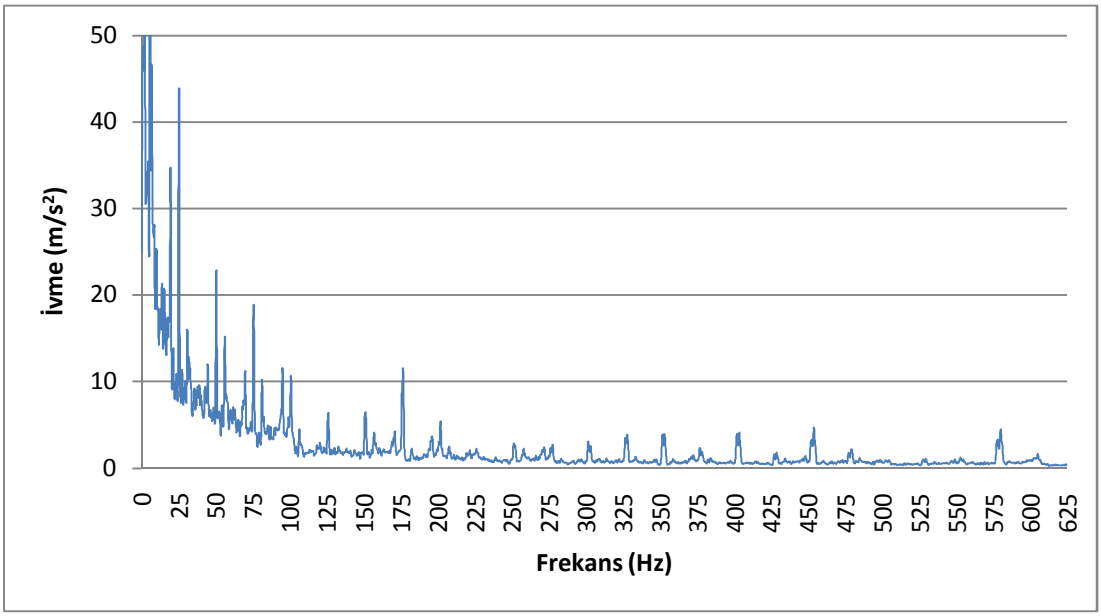


Şekil 7.34 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.34'te çift mille dengelenmiş denge milli motor boştayken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 53,82 Hz'de 15,1681 m/s^2 olmaktadır. Z yönündeki ivme değeri standart motorun gaz kuvvetleriyle tahrikte boşta çalışmasına göre % olarak $\frac{39,7514-15,1681}{39,7514}\times 100 = 61,8$ oranında iyileşmiştir.

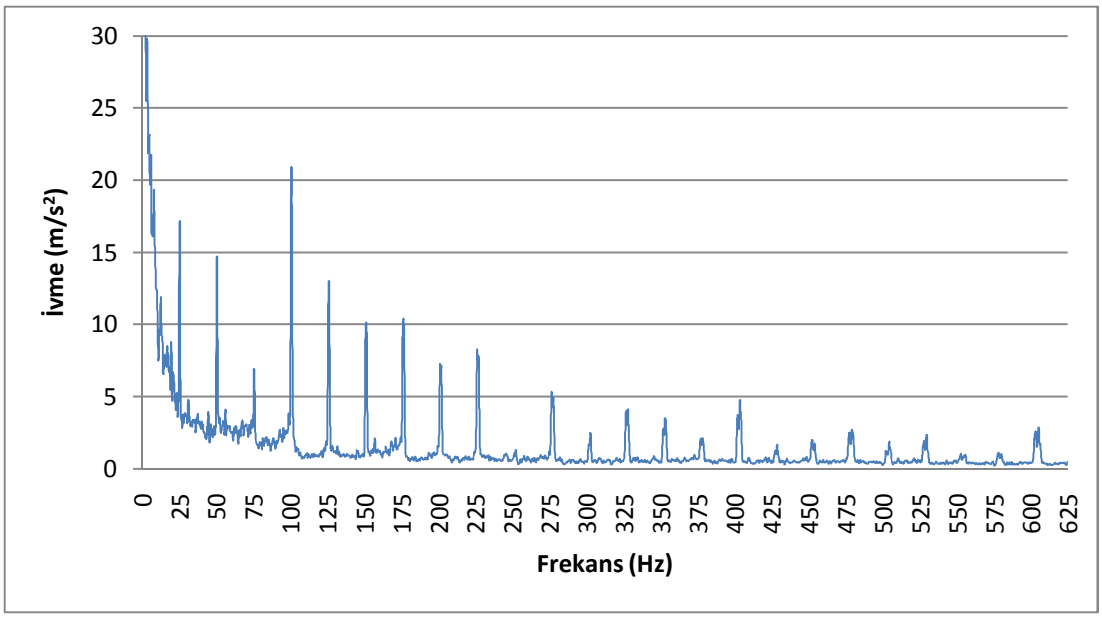
7.2.4.2 Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken külbütör kapağı üstünden alınan ölçümler

Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükte çalışma koşullarında yapılan ölçüm sonuçlarında oluşan harmoniklerin 50 Hz ve katlarında oluşması beklenmektedir. Ölçümler sonucunda dengelenmiş motorun krank karşı ağırlıklarının azalmış olması nedeniyle standart motorun boşta çalışma durumuna göre yatay yöndeki (Y) ivmenin azalması beklenmektedir. 1.dereceden atalet kuvvetleri denge millerindeki ağırlıklarla karşılanacağı için dikey yöndeki (Z) ivme değerinde de standart motorun boşta çalışması durumuna göre azalması beklenmektedir.



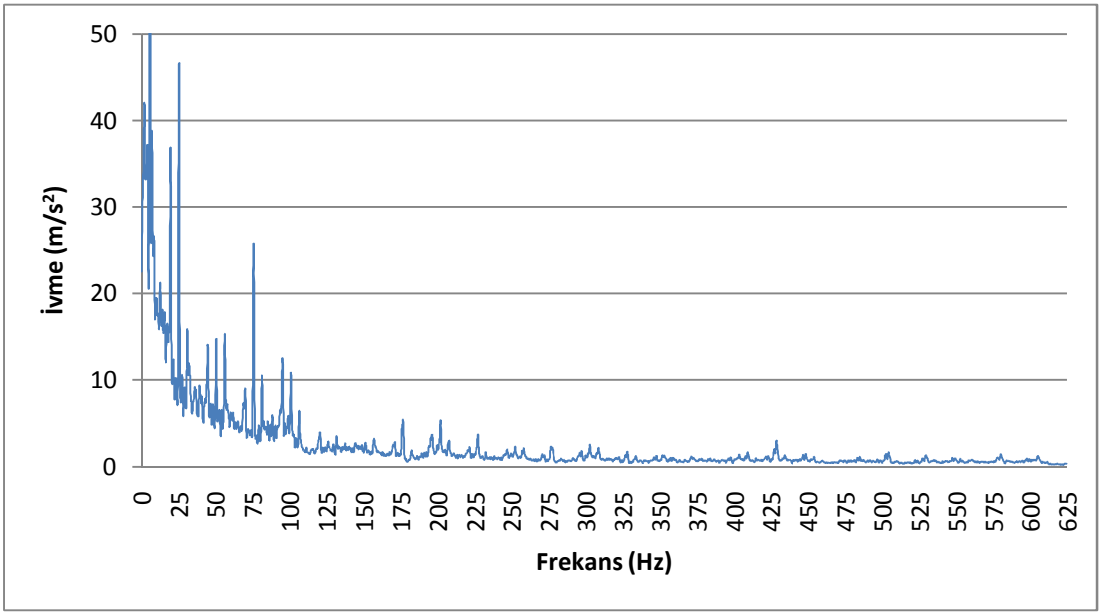
Şekil 7.35 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte x yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.35'te çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte X yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 50,7 Hz'de 22,8437 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 7.36 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte y yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.36'da çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Y yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 50,7 Hz'de 14,7545 m/s^2 olmaktadır. Standart motorun tam yükte olması durumunda Y yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{37,4974-14,7545}{37,4974}\times 100 = 60,6$ oranında iyileşmiştir. Çift mille dengelenmiş denge milli motorun boşta olması durumuna göre ise Y yönündeki ivme değeri % olarak $\frac{14,7545-9,93738}{14,7545}\times 100 = 32,6$ oranında kötüleşmiştir.



Şekil 7.37 : Çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte z yönündeki ivmenin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 7.37'de çift mille dengelenmiş denge milli motor tam yükteyken gaz kuvvetleriyle tahrikte Z yönünde birinci harmonik için maksimum ivme değeri 50,7 Hz'de 15,2568 m/s^2 olmaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Anadolu Motor tarafından üretilen ANTOR 3 LD 510 dizel motorunun kuvvet analizleri ve titreşim ölçümlerini kapsayan bu çalışma sonunda elde edilen veriler, çift mil kullanılarak yapılan dengelemenin titreşim açısından olumlu sonuçlarını ortaya koymaktadır.

Kuvvet analizleri yapılarak standart motor ile çift mille dengelenmiş motor, krank muylusuna gelen yatak kuvvetleri ve volan açısından da kıyaslanmıştır. Her iki durum içinde standart motor ile çift mille dengelenmiş motor verileri birbirine oldukça yakındır. Standart motorda krank muylusundaki maksimum yatak kuvveti 363,7º KMA'da 38266,9101 N olmuştur. Çift mille dengelenmiş motorda ise maksimum yatak kuvveti 363,7º KMA'da gerçekleşmiş olup 38541,0291 N olmuştur.

Bu durum incelendiği zaman çift mille dengelenmiş denge milli motordaki yatak kuvveti ile standart motordaki yatak kuvvetinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Çift mille dengelenmiş motorda krank ağırlığı sadece merkezkaç kuvvetleri dengeleyecek şekilde azaltılmış olmasına rağmen biyel ve piston ağırlığında herhangi bir değişiklik olmaması nedeniyle $P_j = P_{j_1} + P_{j_2} = m_j R w^2 (\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha)$ formülüne göre toplam atalet kuvvetinde de değişiklik beklenmemektedir. Burada m_j ötelenen parçaların kütlesidir. Yani piston ve biyelin piston tarafına indirgenen kütlesinin toplamıdır.

Aynı şekilde gaz kuvvetleri de standart motordakiyle eşdeğer olduğu için standart motora göre çift mille dengelenmiş motorda pistona etkiyen toplam kuvvette de değişiklik beklenmemektedir. Tüm bu nedenlerle de çift mille dengelenmiş motorda krank muylusundaki maksimum yatak kuvveti, standart motorda ki krank muylusu yatak kuvvetine yakın olmaktadır.

Volan için yapılan analizlerinde ise standart motorda düzgünsüzlük katsayısı 1/25,4327, çift mille dengelenmiş motorda ise düzgünsüzlük katsayısı 1/25,4812

olmaktadır. Bu nedenle standart motorda kullanılmakta olan volanın çift mille dengelenmiş motorda da kullanılabileceği görülmektedir.

Çift mille dengelenmiş motorun hem denge milli hem denge milsiz olarak analiz ve ölçümleri yapılarak titreşimlerin ne ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Çift mille dengelenmiş denge milsiz motorda krank karşı ağırlıklarıyla sadece merkezkaç kuvvetleri dengelenmeye çalışılmıştır. Bu nedenle krank karşı ağırlığı standart motor durumuna göre azalmıştır. Buna bağlı olarak yatay yönde (Y) standart motora göre %91,64 oranında iyileşme sağlanmıştır. Ancak krank karşı ağırlıklarının azalmasına bağlı olarak dengesiz atalet kuvvetleri nedeniyle dikey yöndeki (Z) ivme değerleri standart motora göre %30,45 oranında kötüleşmiştir. Denge milli motor üzerinden alınan ölçümlerde ise Z yönündeki ivme değerlerinin standart motora göre %80,9 oranında iyileştiği, denge milsiz motora göre ise %86,7 iyileştiği görülmektedir. Yatay yöndeki ivme değerlerinin ise denge milli motor ile denge milsiz motorda oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Yapılan ölçümlere göre şu sonuçlar çıkarılmaktadır;

- Çift mille dengelenmiş denge milli motorda miller üzerindeki ağırlıklar dikey yöndeki (Z) kuvvetleri dengelemektedir.
- Miller birbirlerine göre zıt yönde döndükleri için ve mil ağırlıklarının da eşit olması nedeniyle yatay yönde (Y) oluşturdukları kuvvetler kendi içinde sıfır olmaktadır. Bu yüzden miller nedeniyle sisteme yatay yönde dengesizlik yaratabilecek herhangi bir kuvvet etkimemektedir.
- Çift mille dengelenmiş motorda yatay yöndeki kuvvetler krank karşı ağırlığıyla dengelendiği için, krank karşı ağırlığı yatay yöndeki kuvveti minimum yapacak şekilde optimum değerde seçilmelidir.

Çift mille dengelemede birinci dereceden atalet kuvvetleri dengelenirken nispeten daha küçük olan ikinci dereceden atalet kuvvetleri dengelenmez. Tek silindirli bir motorda ikinci mertebeden atalet kuvvetlerinin dengelenmesi için açısal hızları 2ω olan iki karşı ağırlık çift mil sistemine ek olarak konabilir. Daha hassas dengeleme sonuçları elde edilmek istendiği zaman dört mille dengeleme yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Sandalcı T.,** 2007. *Motor Dinamiği Ders Notları*, Y.T.Ü, İstanbul.

[2] **Palavan S.,** 1975. *Pistonlu Makinalar Dinamiği*, İ.T.Ü Kütüphanesi, Sayı 1020, 6. Baskı, İstanbul.

[3] **Chen Y., Zhiyong H., Guangtai Z.,** 2009. *Balance Mechanism Design of Single Cylinder Engine Based On Continuous Mass Distribution of Connecting Rod*, Tianjin University, China

[4] **Koman H. C.,** 2008. *İçten Yanmalı Motorlarda İndikatör Diyagramının Çıkarılması ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] **Alpay O.,** 2008. *1500 D/D'da 90 kw Üretecek Dört Silindirli Dizel Motoru İçin Krank-Biyel-Piston Zinciri ve Volan: Hesap, Tasarım ve Numune Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] **Çetinkaya S.,** 1999. *Motor Dinamiği*, Nobel Yayın Dağıtım LTD.ŞTİ., Yayın No:94, Ankara.

[7] **Url-1** <http://www.01db-metravib.com/nvh-instruments.477/pro-117ext-4-1-channels-professional-usb-ii-data-acquisition-unit.1485/?L=1> (Alındığı Tarih:12.03.2010)

[8] **Url-2** <http://www.01db-metravib.com/nvh-instruments.477/dbfa-suite-software-for-frequency-analysis.556/?L=1> (Alındığı Tarih:12.03.2010)

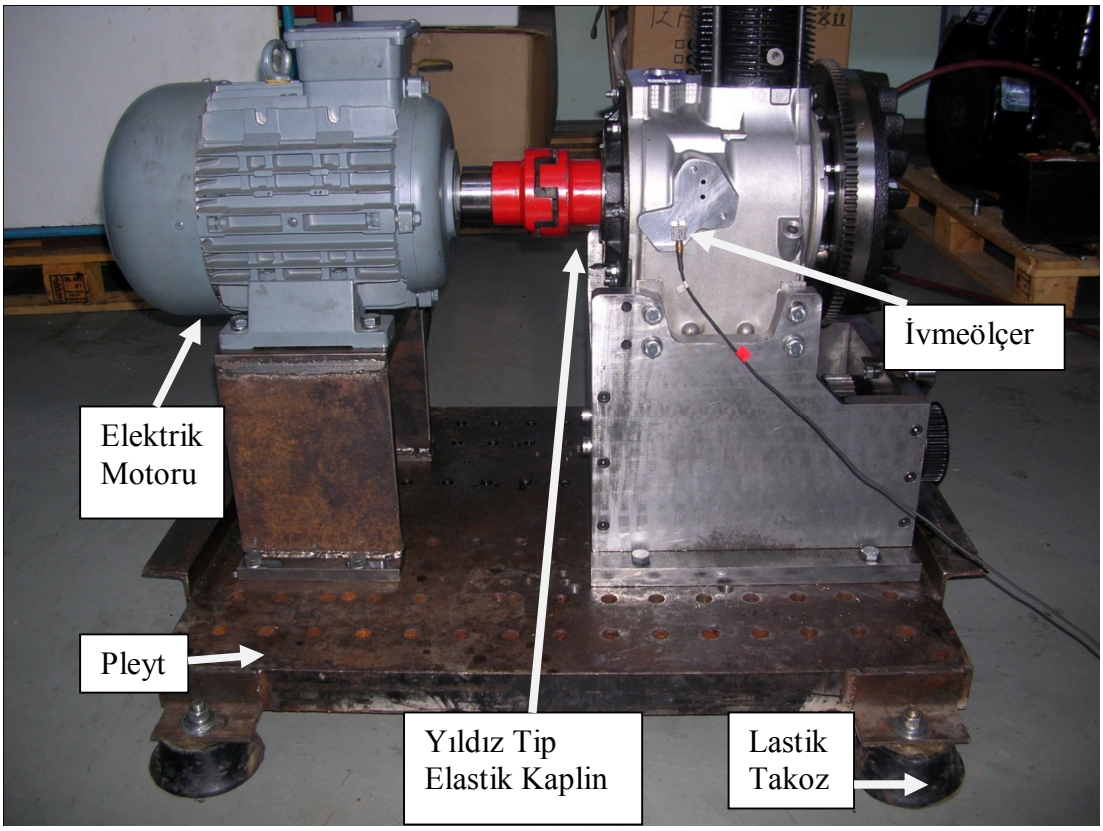
[9] **Chapra C. S., Canale P. R.,** 2003. *Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler*, Literatür Yayıncılık, Çevirenler: Hasan Heperkan&Uğur Kesgin, İstanbul.

[10] **Wickramarachi P.,** 2003. *Effects of Windowing on The Spectral Content of a Signal*, Data Physics Corporation, San Jose, California

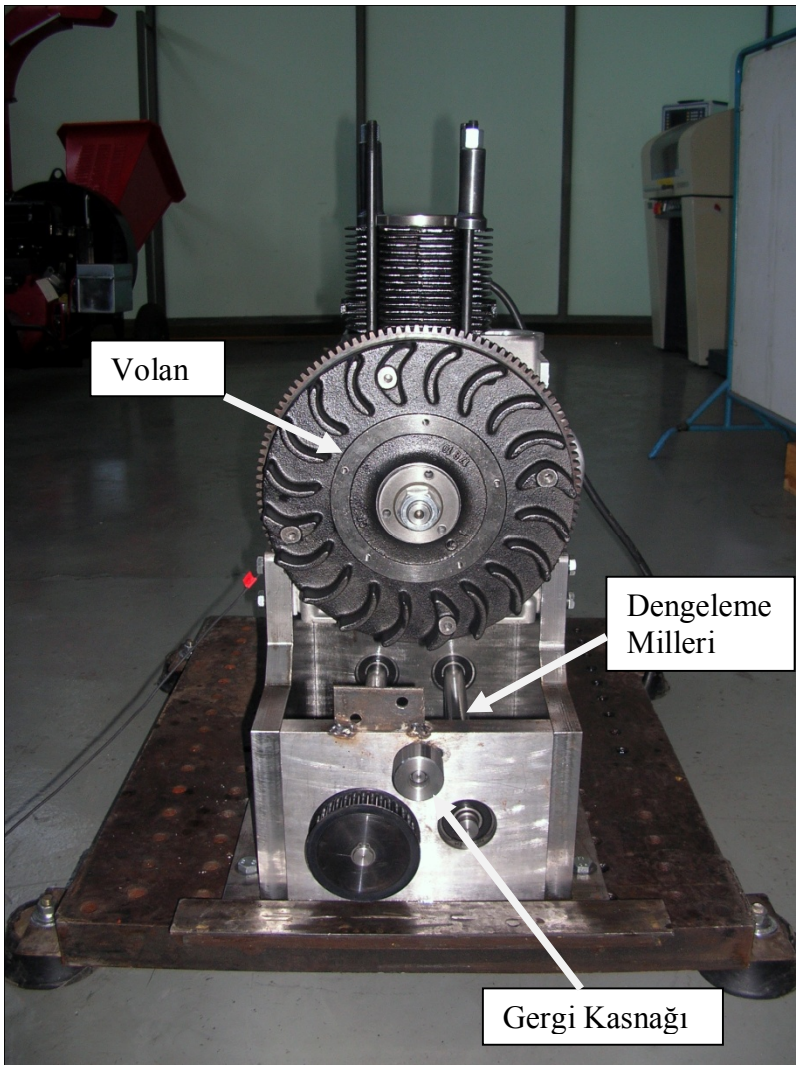
[11] **Özer Ş., Güney K.,** 2002. Porla Metodu İle Tahmin Edilen Arma Model Parametreleri Üzerinde Pencere Fonksiyonların Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **2**, 173-178.

EKLER

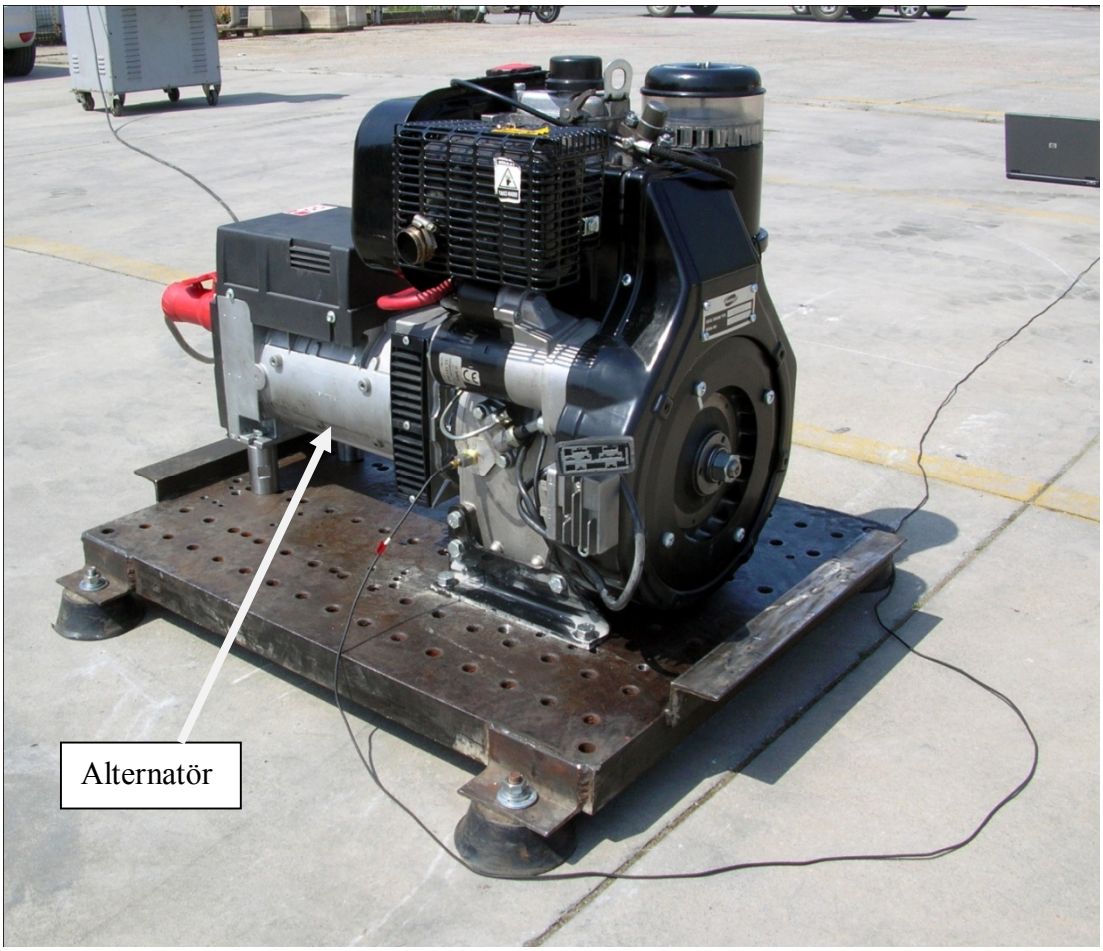
EK A.1 : Resimler



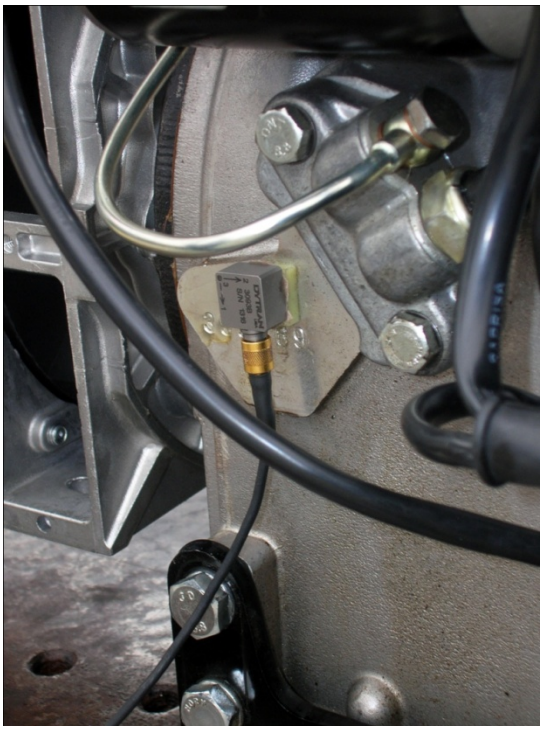
Şekil A.1 : Elektrik motoruyla tahrikte çift mille dengelenmiş motor üzerinden alınan ölçümler.



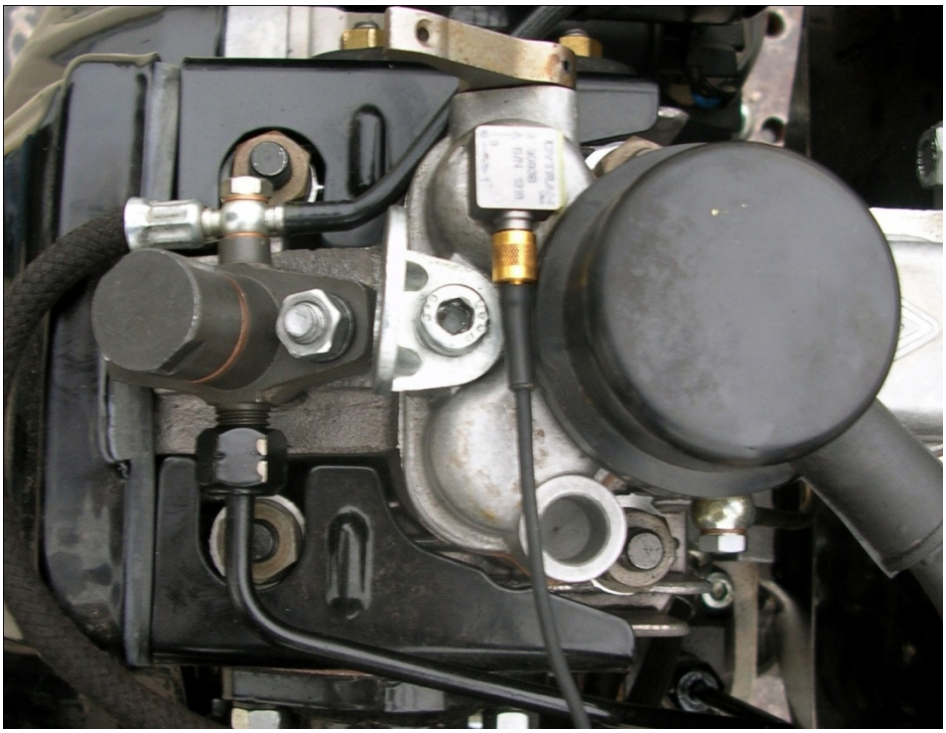
Şekil A.2 : Elektrik motoruyla tahrikte çift mille dengelenmiş motorda denge milleri kullanılmadan yapılan ölçümler.



Şekil A.3 : Gaz kuvvetleriyle tahrik altında çalışan motorda gövde yanından alınan ölçümler.



Şekil A.4 : Gövde yanı ölçüm noktası.



Şekil A.5 : Külbütör kapağı ölçüm noktası.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Cem Türkmen

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 02.09.1985

Lisans Üniversite: Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü