ESNEK VOLAN MODAL ANALİZİ

Onur Yalnızca
oyalnizca@gmail.com

İlker Özelgin[1]
ozelgin@yahoo.com

Ercan Aksoy[1]
ercan_aksoy@yahoo.com

[1] *Valeo Otomotiv Sis. End. AŞ, Bursa*

ÖZET

Otomobillerde meydana gelen titreşimlerin en büyük kaynağı içten yanmalı motordur. Aktarma organları bu titreşimlerden etkilenir. Volan, doğrudan krank miline bağlı çalışan bir elemandır. Aktarma organları içinde büyük atalet momentine sahip volanın doğal frekansı kritik bir önem taşır. Bu sebeplerden dolayı volanın doğal frekansı, dizayn aşamasında belirli değerler arasında öngörülmelidir ve sonraki aşamalarda testler ile doğrulanmalıdır. Bu çalışmada, esnek volanın modal analizi, bilgisayar destekli analiz programları ile karşılaştırılması ve rijit volana göre üstünlükleri üzerinde durulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Volan, modal analiz, rezonans, otomotiv

MODAL ANALYSIS OF FLEXIBLE FLYWHEEL

ABSTRACT

Main source of vibrations on cars are internal combustion engines. Powertrain elements are effected by these vibrations. The flywheel is directly connected to crankshaft. Flywheel with its huge inertia, holds a critical place beyond these elements. For these reasons, natural frequency of flywheel should be considered during design phase and have to be validated on further steps by measurements. In this paper, modal analysis of flexible flywheel, comparisons with CAE results and main advantages of flexible flywheel over conventional flywheels will be examined.

Geliş tarihi : 21.05.2013
Kabul tarihi : 18.07.2014

Keywords: Flywheel, modal analysis, resonance, automotive

Yalnızca, O., Özelgin, İ., Aksoy, E. 2014. "Esnek Volan Modal Analizi," Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 656, s. 30-41.

1. GİRİŞ

Doğal frekans, bir sistemdeki belirli frekansların diğer frekanslara nazaran sistemi daha fazla büyüklükte titreten frekans aralığıdır. Bu titreşimler sonucu ortaya çıkan fiziksel olaya ise rezonans adı verilir. Sistem, rezonans frekansında çok küçük tetiklemelere bile büyük salınımlar ile yanıt verebilir.

Yaşantımızın vazgeçilmez parçası haline gelen otomobillerde ise titreşimin en önemli kaynaklarından biri içten yanmalı motorlardır. Bu motorlarda meydana gelen titreşimleri temel olarak, torsiyonel ve eksenel olarak iki ana başlık altında toplayabiliriz. Esnek volan, torsiyonel titreşimlerden ziyade eksenel titreşimlerin sönümlenmesinde etkin rol oynadığından dolayı, bu çalışmada eksenel titreşimler üzerinde durulacaktır.

2. VOLAN

Volan, aktarma organları içerisinde yüksek eylemsizlik momentine sahip oldukça ağır bir elemandır. İçten yanmalı motorların dışında da bir çok alanda kullanılır. En temel amacı, dönen mekanizmalarda dönme hareketin devamlılığını sağlamaktır. İçten yanmalı motorlarda pistonlardaki her patlama esnasında ortaya çıkan enerjiyi muhafaza eder ve düzensiz olan hareketi bir miktar daha düzenli hale getirir.

Volan, genellikle krank miline doğrudan bağlıdır. Motor hareketi devam ettikçe onunla birlikte dönmeye devam eder. Debriyaj, volanın üzerine monte edilir. Debriyaj baskı komplesi sürekli volan ile birlikte hareket ederken, debriyaj diski yalnızca kavrama pozisyonunda sistemle birlikte hareket eder. Ayırma pozisyonunda ise durağan hale geçer.

Grafik 1'de görüldüğü gibi, volanın eylemsizlik momenti motor düzensizliği ile ters orantılıdır. Eylemsizlik momenti arttırılırarak motor düzensizliği azaltılabilir.

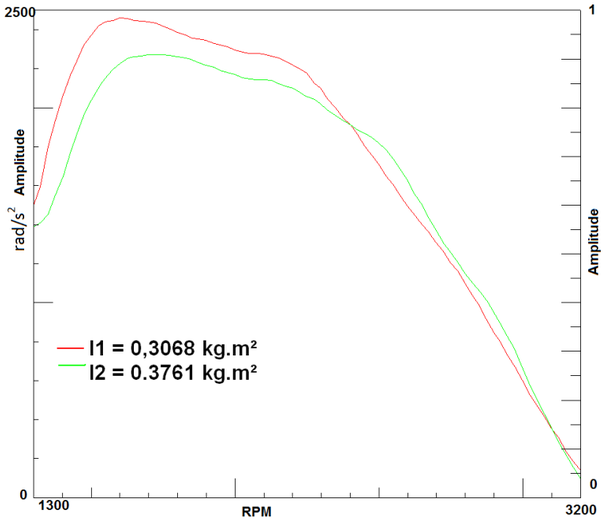
2.1 Rijit Volan ve Esnek Volan Sistem Modeli

Genelde en çok kullanılan volan tipi rijit volandır. Rijit volanlar çok basit yapıya sahiptir. İki ana parçadan oluşur; kütle ve volan dişlisi. Kütleyi oluşturan döküm gövdenin gerekli kısımları talaşlı imalat yöntemleri ile işlenir ve volan dişlisi kütleye çakılır.

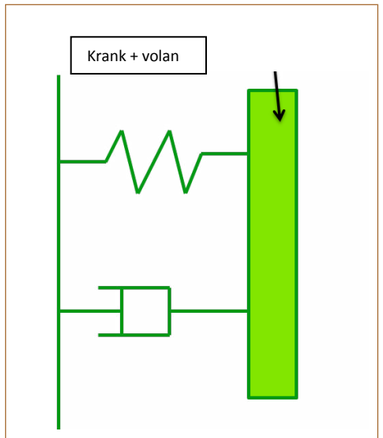
Rijit volanın eksenel titreşim modelini oluşturmak istediğimizde, tek serbestlik dereceli, aşağıdaki modeli kullanabiliriz (Şekil 1) [1].

Esnek volanı rijit volandan ayıran temel fark esnek plakadır. Esnek plaka ana kütleyi krank miline bağlayan ara elemandır. Adından da anlaşılacağı üzere, esneyerek eksenel titreşimleri sönümler ve bir sonraki sistem elemanına iletilmesini engeller. Şekil 2'de görüleceği gibi, esnek plaka krank mili üzerine monte edilir. Diğer taraftan ise kütleyle bağlantılıdır.

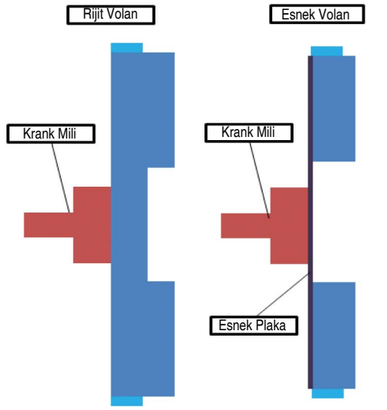
Esnek volanın en büyük avantajı, eksenel yönde azalan titreşimler sayesinde debriyajın görevi olan ayırma fonksiyonunu iyileştirir. Bu sayede, vites geçişlerinde iyileşme ve aktarma organlarında koruma sağlar[2]. Diğer avantajı, krank mili üzerinde oluşan streslerde azaltıcı etki gösterir [3]. Bu konulara esnek volanın modal analizi üzerinde daha detaylı değinilecektir.



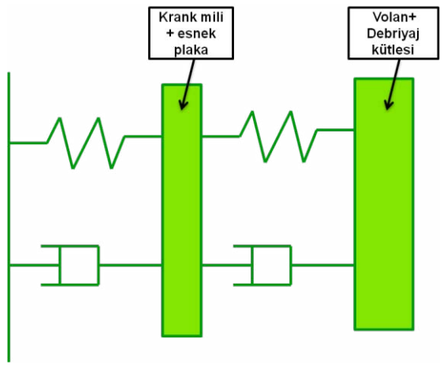
Grafik 1. Farklı Eylemsizlik Momentlerine Sahip İki Volanın Aynı Araç Üzerinde 4. Vitese Alınmış Motor İvmelenme Eğrisi (2. mertebeden kesit alınmış.) [dev/dak – rad/s²]



Şekil 1. Tek Serbestlik Dereceli Rijit Volan Modeli



Şekil 2. Rijit Volan ve Esnek Volan



Şekil 3. Birden Fazla Serbestlik Derecesine Sahip Esnek Volan Modeli

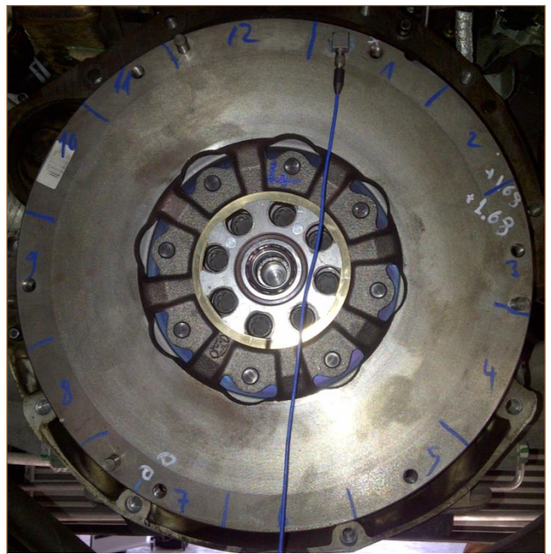
Volana monte edilen esnek plaka ile krank mili ve rijit volanın arasına ilave bir eleman eklenmiş şeklinde düşünülebilir. Eksenel yöndeki titreşim modeli ise Şekil 3'teki gibi oluşturulur [1].

3. VOLANDA MODAL ANALİZ UYGULAMASI

Modal analiz, bir yapının titreşim karakteristiğini belirlemek ve analiz etmek için kullanılır. Titreşim karakteristiği, yapının mod şekilleri ve doğal frekansı olarak tanımlanabilir [4, 5]. Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) programlarının yardımıyla veya gerçek ölçüm ile toplanan verileri inceleyerek yapının modal analizi gerçekleştirilebilir. Erken safhalarda, örneğin tasarım aşamasında bilgisayar destekli simulasyonlar ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilse de gerçek ölçüm sonucunda hesaplamaları doğrulamak muhakkak gerekmektedir.

Volan üzerinde yapılacak olan "frekans tepki fonksiyonlarını" deneysel olarak elde etme tekniği için gerekli olan ekipmanlar; veri toplama sistemi, darbe çekici ve ivmeölçerdir. Simulasyonlar ve tecrübeler ile öngörülen frekans aralıklarında veri toplama yeteneğine sahip ekipmanlar ile çalışmak doğru sonuç elde etmek için muhakkak gereklidir. Ölçüme başlamadan önce, volan üzerinde pizza dilimi şeklinde en az 12 eş parça oluşturmak, analiz sonucunda oluşacak mod şekilleri hakkında fikir sahibi olmak için esastır. Oluşturulan bölmeler 1'den 12'ye kadar numaralandırılır ve parça ölçüme hazır hale getirilir (Resim 1). Ölçüm için iki yöntem mevcuttur: İvmeölçer, bir noktaya sabitlenip ve darbe çekici her noktada gezdirilebilir veyahut darbe çekici sabit bir noktada kalır, ivmeölçer her sekmede gezdirilir. İlk yöntem daha pratik olduğu için genelde ivmeölçer sabitlenip darbe çekicinin gezdirildiği yöntem çokça kullanılır [2].

Ölçüme hazır hale getirilen volanın üzerine ivmeölçer sabitlenir. Ölçüm sonucunu etkilememesi için ivme ölçer kütlesinin toplan kütleye oranın 5/100'den küçük olması tercih edilir [6]. Darbe çekici 1 numaralı sekmeden başlamak üzere 12



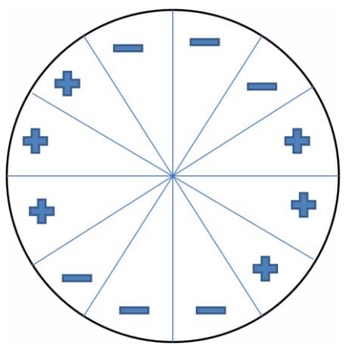
Resim 1. Araç Üzerinde Ölçüme Hazır Numaralandırılmış Volan: İvmeölçer sabitlenmiş, çekiç gezdirilecek

bölge üzerinde yapıyı tetikleyerek kayıt alınır. Her bölge üzerinde alınan kayıtlar işlenerek yapının hangi frekanslarda hangi yöne doğru hareket ettiği tespit edilir. Bu sayede, yapının rezonans frekansları ve mod şekilleri tayin edilir.

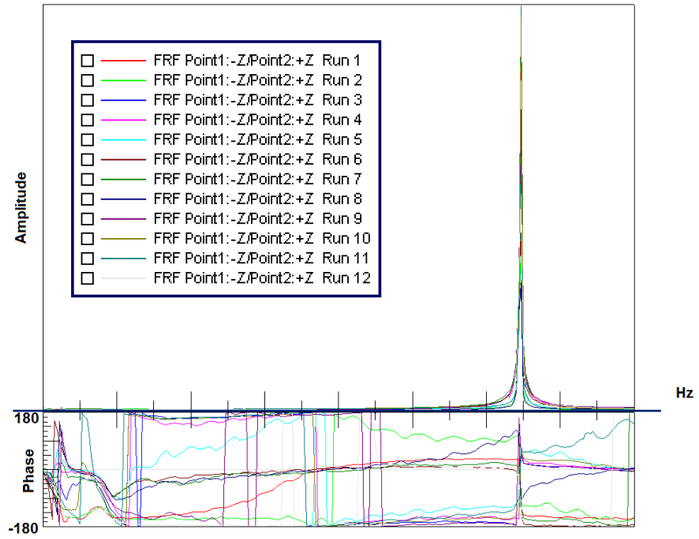
Modal analizi yapılan herhangi bir volan ölçümünde, yapının tetiklemelere verdiği cevap aşağıdaki şekilde gözlemlenmiştir.

Grafik 2'deki Bode Diyagramında açıkça görüleceği gibi, 12 noktadan toplanan veriler aynı frekansta pik yapıp, bu rezonans frekansının bulunduğu faz açısında ani kırılmalar meydana getirmiştir. Sistemin rezonans frekansı kolayca tespit edilebilir.

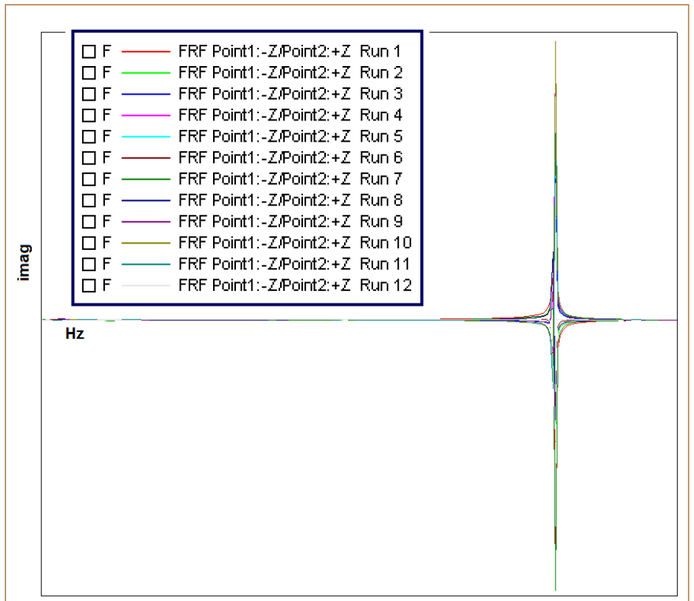
Aynı titreşim verilerinin yönlerinin tespiti için Grafik 3'te frekans tepki fonksiyonunun imajiner kısmı kullanılmaktadır [7]. Büyüklüklerin negatif olduğu yerleri eksiyle, pozitif olduğu bölgeleri artıyla işaretlendirerek mod şekli haritasını oluştururuz. Modal analiz sonucunda toplanan sinyallerde artı değerler volanın o bölgede artı yönde hareket ettiğini, eksi değerler volanın o bölgede eksi yönde hareket ettiğini gösterir. Yapılan bu ölçüm sonucunda volanın Şekil 4'te görülen mod şeklini aldığı gözlemlenmiştir.



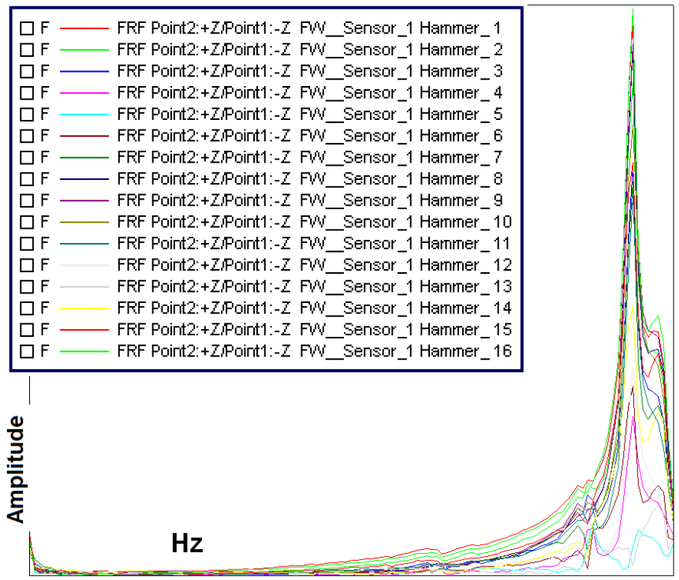
Şekil 4. Ölçümü Yapılan Volanın Rezonans Frekansında Aldığı Mod Şekli



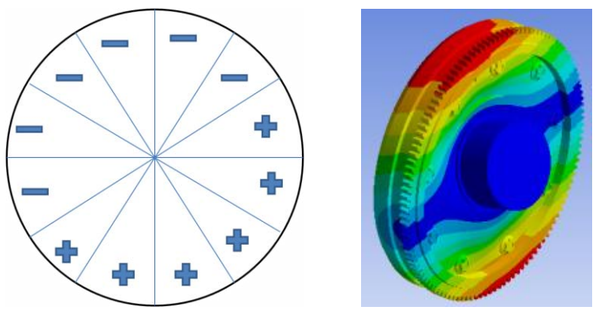
Grafik 2. Titreşim Verilerinin Bode Diyagramında İncelenmesi [Hz - Amplitude] – [Hz - °]



Grafik 3. Aynı Titreşim Verilerinin Yönlerinin Tayini [Hz - (m/sn²)/N]



Grafik 4. Rijit Volan Üzerinde Modal Analiz [Hz - (m/sn²)/N]



Şekil 5. Rijit Volan Ölçümünde İlk Rezonans Frekansında Eğilme (Bending) Mod Şekli

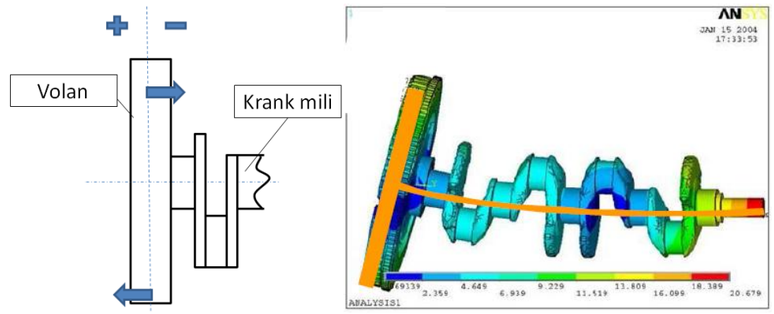
Yukarıdaki ölçümde ise bu kez rijit volan üzerinde yapılan modal analiz sonuçları incelenmiştir (Grafik 4).

Mod şeklini tayin etmek için titreşimlerin yönleri incelendiğinde sistemin eğilmeye(bending) zorlandığı tespit edilmiştir (Şekil 5).

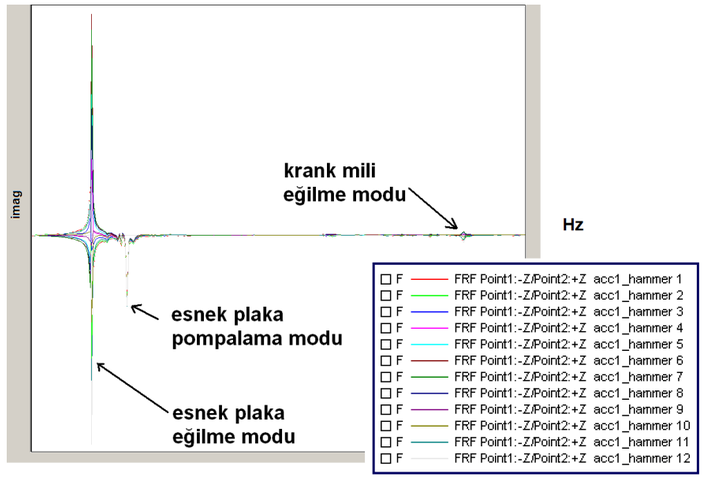
Bu şekilde bir zorlamanın krank mili üzerinde ilave bir gerilim yaratacağı aşikardır (Şekil 6).

Esnek volan üzerinde yapılan "frekans tepki fonksiyonlarını" deneysel olarak elde etme tekniğinde ise 0 – 400 Hz aralığında iki adet rezonans frekansı göze çarpmaktadır. İlave edilen esnek plaka sayesinde *K* değerinin düşeceği ve düşen frekans nedeniyle eğrinin pik noktasının sola doğru kayacağı öngörülür.

Öyleyse, Grafik 5'te görülen ilk pik, esnek plakanın eğilme



Şekil 6. Rijit Volan İle Birlikte Krank Mili Eğilme Modu

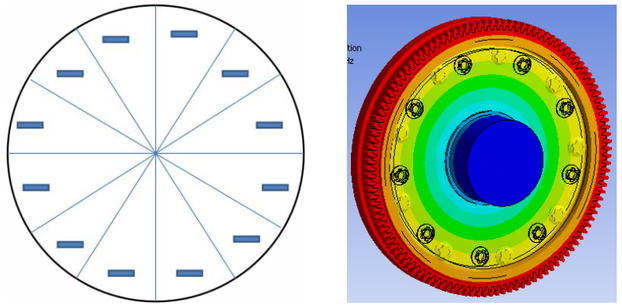


Grafik 5. Esnek Volan Üzerinde Modal Analiz [Hz - (m/sn²)/N]

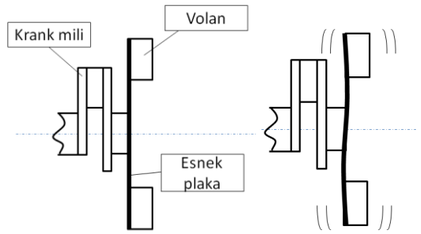
modudur. Öte yandan, eğilme modundaki rezonans frekansına yakın bir başka pik daha görülür. Şekli ise esnek plakanın pompalama (pumping) modudur (Şekil 7).

Rijit volanda karşılaştığımız krank milinin eğilme modunun ise yüksek frekanslara doğru ötelendiği görülmüştür. Çünkü sistem modelinde (Şekil 1 ve 3) görüleceği gibi, krank mili sönümleme ve esnekliği sabit kalırken, volan ve krank milinden oluşan kütlenin yerini krank mili ve esnek plaka kütlesi almıştır (Şekil 8). Volanın kütlesi ile kıyaslandığında esnek plakanın kütlesi çok çok düşüktür. *K* değerinin sabit kalıp *M* değerinin düştüğünü varsayararsak; krank mili eğilme modu için, esnek plaka ve krank mili kütlesinden oluşan sistemin frekansının rijit volana kıyasla artacağı ve grafikte sağa doğru öteleneceğini doğrulamış oluruz. Öyle ki, artık, motor çalışma frekansı aralığının dışına çıkmış haldedir.

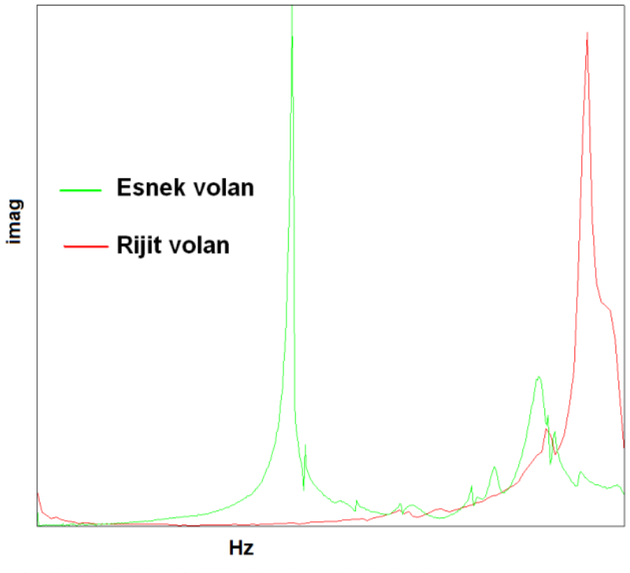
0-400 Hz aralığında her iki volan tipi için karşılaştırma yaptığımızda (Grafik 6) esnek plaka sayesinde bahsi geçen frekans ötelemeleri rahatlıkla görülebilir. Esnek volan için ilk pik esnek plakanın eğilme modu, ikinci pik ise esnek plakanın pompalama modudur. Krank mili eğilme modu ise incelenen



Şekil 7. Esnek Volan Ölçümünde İkinci Rezonans Frekansında Pompalama (Pumping) Mod Şekli



Şekil 8. Esnek Volan ile Birlikte Esnek Plaka Eğilme Modu



Grafik 6. Esnek Volan – Rijit Volan Kıyaslaması [Hz - (m/sn²)/N]

aralığın çok dışındadır. Rijit volan için ise görülen pik, krank mili eğilme modudur.

Bu sayede, volanın eğilme modu rezonans frekansı 200 Hz'in altına düşürülerek, motorda 200 – 400 Hz aralığında meydana gelen gürültüleri önemli ölçüde azaltacak şekilde ayarlanabilir [8].

4. ESNEK VOLANDA MODAL ANALİZ UYGULAMASI

Esnek plakanın rezonans frekanslarına nasıl tesir ettiğini yapılan çalışmalar ile izah etmeye çalıştık. Esnek plakanın rezonans frekanslarına sağladığı değişimlerden faydalanarak çeşitli esnek plakalar ile aşağıda belirtilen şekilde çalışmalar yapılmıştır (Tablo 1)

Tablo 1. Hazırlanan Esnek Volan Konfigürasyonları

Çalışma No	Esnek Plaka Kalınlığı [mm]	Toplam Kütle [kg]	Sönümleme Halkası*
Çalışma 1	2.7	9.1	Yok
Çalışma 2	3	9.1	Yok
Çalışma 3	2.7	9.26	Var
Çalışma 4	3	9.28	Var

*Sönümleme halkası esnek plaka ile volan kütlesi arasına yerleştirilen ve edinilen tecrübelere göre esnek volanın eğilme frekansını yaklaşık 30-40 Hz sağa öteleyen bir sönümleme elemanıdır. Bilgisayar destekli simulasyonlarda sönümleme halkasının yaratacağı etkiyi tam olarak tanımlamak oldukça zor ve karmaşıktır. Hesaplama süresini de epey uzatacağı için sönümleme halkası kullanılacak olan esnek volan tasarımlarında gerçek ölçüm esastır (Şekil 9).

Tablo 2. Hazırlanan Esnek Volan Prototiplerinin Bilgisayar Destekli Simulasyon Sonuçlarına Göre Beklenen Rezonans Frekansları ve Mod Şekilleri

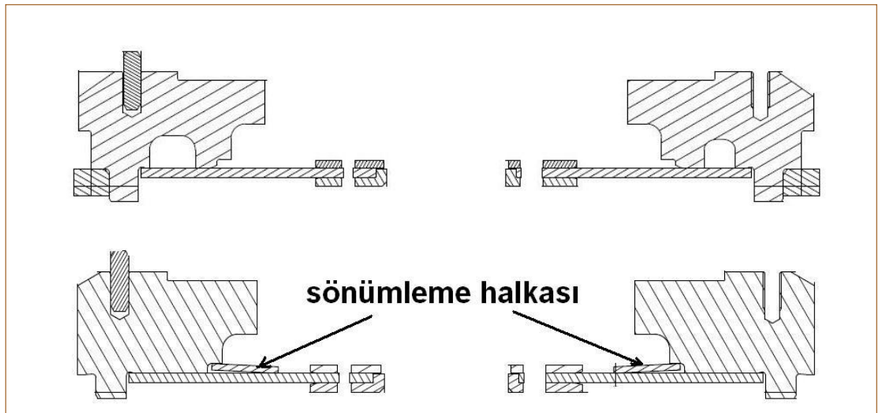
Çalışma No	Öngörülen Rezonans Frekansı [Esnek Plaka Eğilme Modu]	Öngörülen Rezonans Frekansı [Esnek Plaka Pompalama Modu]
Çalışma 1	120 Hz	189 Hz
Çalışma 2	140 Hz	218 Hz
Çalışma 3	160 Hz	-
Çalışma 4	180 Hz	-

Bu yapılan çalışmalarda amaç; esnek plakanın eğilme mod rezonans frekansı için 120 Hz'den başlayarak 20 Hz aralıklarla 4 farklı esnek volan prototipi oluşturmak ve bu parçaların araç testlerindeki performanslarını kıyaslamaktır. Bilgisayar destekli simulasyonlar yardımıyla hazırlanan çalışmaların öngörülen frekansları şu şekildedir (Tablo 2).

Bilgisayar destekli analiz çalışmaları, sonlu eleman analizi yöntemiyle "Ansys12" simulasyon programında yapılmıştır (Grafik 7, 8, 9, 10).

4.1 Sonlu Eleman Modeli ve Sonuçları

ANSYS ortamında ağ model oluşturularak uygun malzemeler tanımlanmıştır. Statik hesaplama modulünde, krank mili ucu fikslenerek rijit masada yapılacak ölçümlerdeki ortam simüle edilmiştir. Marş dişlisi, döküme rijit kontak ile bağlanmıştır. Diğer parçalar arasında sürtünmeli kontak tanımlanmıştır.



Şekil 9. Sönümleme Elemansız ve Sönümleme Elemanlı Esnek Volan Kesiti

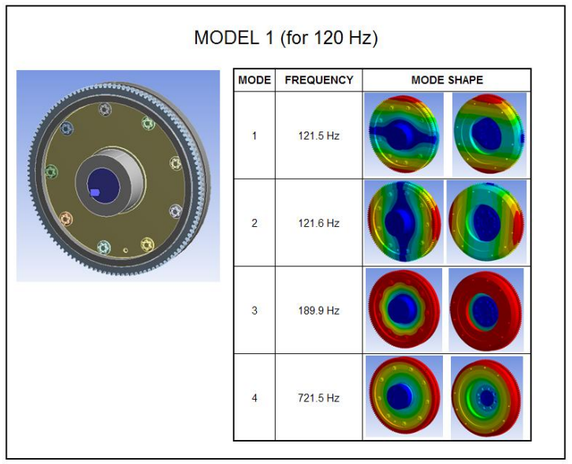
Esnek plaka civataları ile döküm arasında civata dişli kontağı biçiminde uygun tork değeri ile bağlanarak esnek plaka montajı gerçeğe yakın olacak biçimde tanımlanmıştır. Krank mili civataları için de rondelalar üzerinden krank civatası yükleri uygulanmıştır. Statik hesaplama aracı çözümlemesini tamamladıktan sonra modal analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar statik modelden gelen "0" serbeslik derecesinde hesaplanmıştır. 2,7 mm ve 3 mm kalınlığındaki esnek plakalar ile istenilen 120 Hz ve 140 Hz doğal frekanslara yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 10, 11).

4.2 Ölçüm Sonuçları

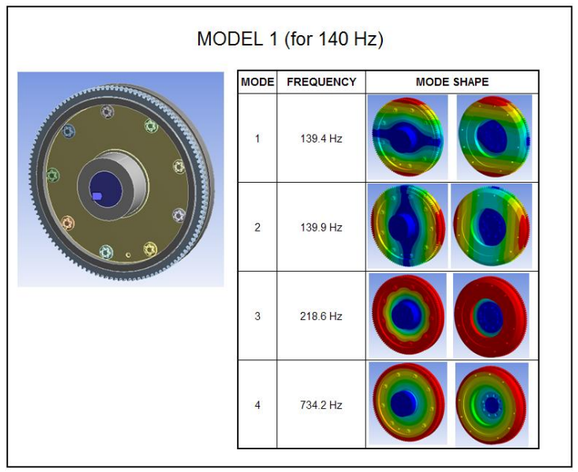
Ölçümler, LMS Test. Lab. 10B programında Test. Lab. Impact Testing modülünde analiz edilmiştir.

Tablo 3. Ölçüm Özellikleri

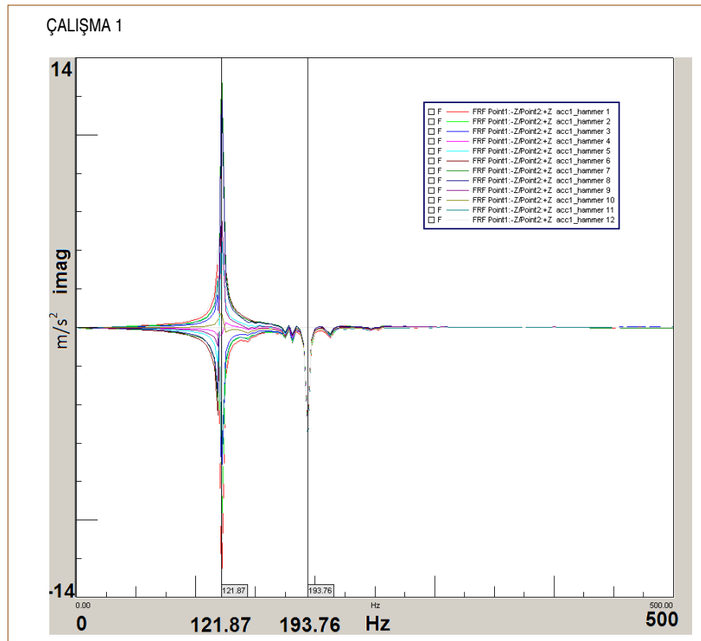
İncelenen frekans aralığı	0 – 500 Hz
Kayıt cihazı	LMS.Scadas III
Darbe çekici	IMI Sensors 086C40
İvmeölçer	PCB Piezotronics 333B32



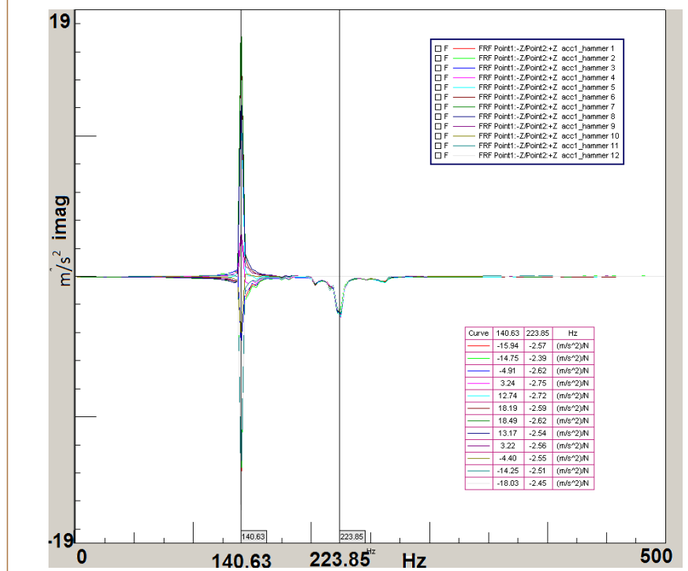
Şekil 10. 120 Hz İçin Sonlu Eleman Modal Analiz Sonuçları



Şekil 11. 140 Hz İçin Sonlu Eleman Modal Analiz Sonuçları

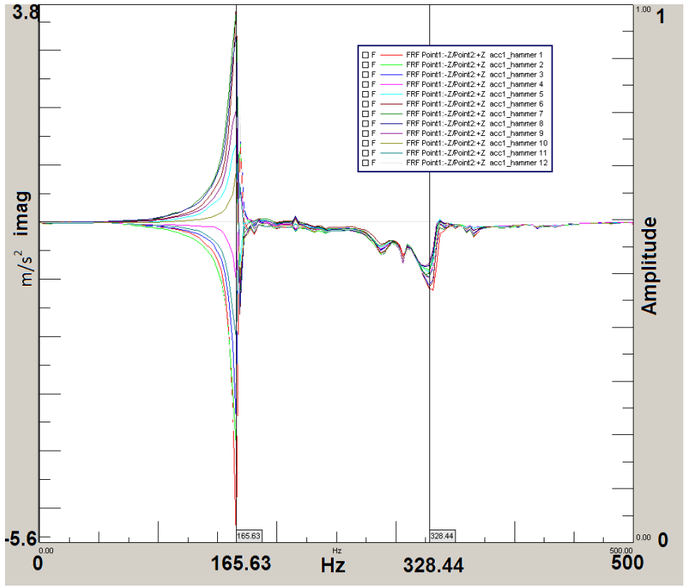


Grafik 7. Mod 1, Esnek Plaka Eğilme-122 Hz; Mod 2, Esnek Plaka Pompalama - 194 Hz



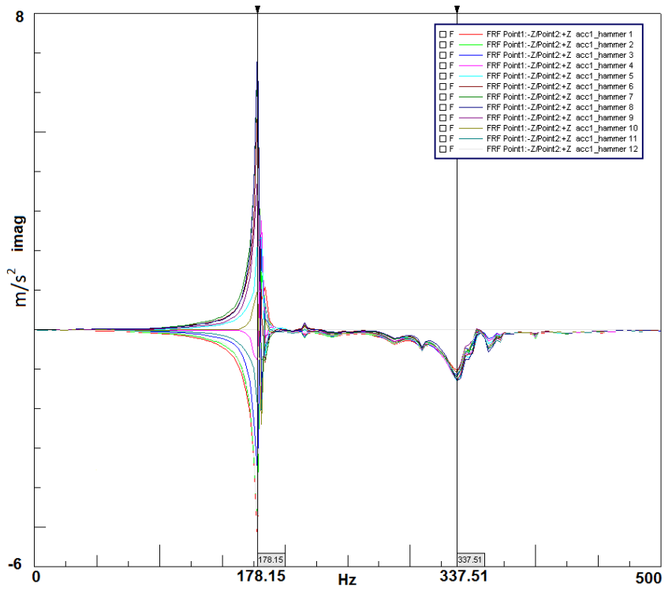
Grafik 8. Mod 1, Esnek Plaka Eğilme -141 Hz; Mod 2, Esnek Plaka Pompalama - 224 Hz

ÇALIŞMA 3



Grafik 9. Mod 1, Esnek Plaka Eğilme -166 Hz; Mod 2, Esnek Plaka Pompalama - 328 Hz

ÇALIŞMA 4



Grafik 10. Mod 1, Esnek Plaka Eğilme -178 Hz; Mod 2, Esnek Plaka Pompalama - 338 Hz

Sonlu elemanlar yöntemiyle modal analiz yapılan volanın üretimi yapıldıktan sonra rijid masaya bağlanarak gerçek frekans tepki fonksiyonlarını deneysel olarak elde etme çalışmaları yapılmıştır. 120 Hz, 140 Hz, 160 Hz ve 180 Hz için prototip üretimi yapılan ürünler için alınan sonuçlar aşağıdadır (Grafik 7, 8, 9, 10).

5. SONUÇ

Esnek plakanın eğilme modu için bilgisayar destekli simulasyonlarla elde edilen hesap sonuçlarında azami %4 yakınlıkta hata payıyla gerçek ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Esnek plakanın eğilme modu için oldukça tatmin edici değerlerdir.

Tablo 4. Bilgisayar Destekli Hesaplamalar ile Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması

Çalışma No	Öngörülen Rezonans Frekansı [Esnek Plaka Eğilme Modu]	Ölçülen Rezonans Frekansı [Esnek Plaka Eğilme Modu]	Hata payı [%]
Çalışma 1	120 Hz	121 Hz	%1
Çalışma 2	140 Hz	141 Hz	%1
Çalışma 3	160 Hz	166 Hz	%4
Çalışma 4	180 Hz	178 Hz	%1

Yeni geliştirilen bir motorun test aşamalarında kullanılmak üzere çeşitli frekanslarda esnek volan talebi, bu yöntemler sayesinde hızlıca modellenip protorip aşamasına geçilebilmiştir. Esnek volan tasarımında esnek plaka sayesinde volanın rezonans frekanslarının değiştirilebileceği ve tasarımda yalnızca esnek plakanın parametrelerini değiştirerek istenilen rezonans frekans aralığında parçalar oluşturabileceği sonucuna varılmıştır. Bu şekilde farklı taleplere küçük tasarım değişiklikleriyle hızlı cevap verebilme yeteneği geliştirilmiştir.

SEMBOLLER

f (frekans) : Birim zamanda tekrar eden olay sayısı
I (inertia) : Eylemsizlik momenti
K (stiffness): Esneklik
M (mass) : Kütle

KAYNAKÇA

1. **Wagg, D.** 2010. Nonlinear Vibration with Control, Springer, 978-90-481-2836-5, Bristol, UK.
2. Valeo Teknik Bilgi Veritabanı.
3. **Wang, S., Baron, E.** 2013. "Study of influences of flywheel bending stiffness on powertrain acceleration noises," 3NVC-103, Renault Powertrain NVH Department.
4. **Çağlayan, İ. H.** 2009. "Rezonans: Makinaların ve Yapıların Gizli Düşmanı," Mühendis ve Makina, cilt 50, sayı 598, s. 55-60.
5. LMS. 2012. "Fundamentals of Vibration and Modal Analysis," LMS Türkiye Teknoloji Konferansı, 20-21 Haziran, Bursa.
6. LMS. 2012. "How Modal Analysis Helps to Determine the Root Cause of Excecssive Vibrations," LMS Türkiye Teknoloji Konferansı, 20-21 Haziran, Bursa.
7. Agilent Technologies, 2000. "The Fundamentals of Modal Testing, Application Note 243-3," http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5954-7957E.pdf, p. 42. son erişim tarihi: 01.06.2014.
8. **Ide, S., Uchida, T., Ozawa, K., Izawa, K.** 1990. "Improvement of Engine Sound Quality Through a New Flywheel System Flexiby Mounted to the Crankshaft," Nissan Motor Co. Ltd., SAE Technical Paper, no. 900391.