

Krank Kasnağında Kullanılan Kauçuk Bileşenin Hızlandırılmış Test Yaklaşımı İle Yorulma Ömrünün Tahmin Edilmesi

Cihangir Kaplan^{1*} , Ömer Faruk Ünal¹ , Cem Güleç¹ 

¹Kentpar Otomotiv, Ar-Ge Merkezi, Konya, Türkiye.

*cihangir.kaplan@kentpar.com.tr

Özet

Kauçuk, otomotiv endüstrisinin başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında titreşim sönümleyicisi olarak kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda burulma titreşimini sönümlemek için kullanılan krank kasnağının en önemli bileşeni kauçuktur. Bu kauçuk bileşenin yardımıyla krank kasnakları ayarlandığı burulma frekansında burulma titreşim genliğini düşürmektedir. Böylece krank mili ömür dayanımı arttırmaktadır. Krank kasnağının görevini uzun ömürlü bir şekilde gerçekleştirmesi için kauçuk dayanım ömrü oldukça önemlidir. Otomotiv endüstrisinde oluşturulan regülasyonlara göre krank kasnağı dinamik dayanım ömrü yaklaşık 10-20 milyon çevrimdir. Bu çalışmada krank kasnağında kullanılan kauçuk bileşenin dinamik dayanım ömrü hızlandırılmış test yaklaşımıyla burulma doğal frekansına bağlı olarak belirlenmiştir. Seçilen bir krank kasnağının birinci atalet kütlelerinin kauçuk formu referans alınıp özgün bir kauçuk numunesi üretilmiştir. Bu kauçuk numunesi, krank kasnağında oluşan burulma titreşimini simüle edebilmek için kendi doğal frekansında ve belirlenmiş genliklerde kaymaya maruz bırakılmıştır. Bunun için özel bir krank biyel test sistemi tasarlanmıştır. Kauçuk kayma numuneler test sistemi üzerinde 1, 1.5, 2, ve 2.5 mm genliklerde testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları genlik ve frekansa bağlı ömür tahminleri deneysel verilerden yararlanarak oluşturulmuştur. Tahmin modelinden elde edilen veriler ile çevrim sayısının genliğin bir fonksiyonu olacak şekilde logaritmik/üstsel bir eğri bulunmuştur. Eğrinin fonksiyonu $9.0103e^{(-0,352x)}$ bu şekilde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Krank Kasnağı, Kauçuk, Hızlandırılmış Test, Kauçuk Ömür Tahmini

Estimation of Durability Life of Rubber Component Used in The Torsional Vibration Damper with Accelerated Testing Approach

Abstract

Rubber is used as a vibration damper in many engineering applications, especially in the automotive industry. The most important component of the torsional vibration damper used to absorb torsional vibration in internal combustion engines is rubber. With the help of this rubber component, the torsional vibration dampers reduce the torsional vibration amplitude at the torsional resonancel frequency at which it is adjusted. Thus, the crankshaft life increases the endurance. The durability of the rubber is very important for the torsional vibration damper to perform its task in a long-lasting manner. According to the regulations created in the automotive industry, the dynamic endurance life of the torsional vibration damper is approximately 10-20 million cycles. In this study, the dynamic endurance life of the rubber component used

in the torsional vibration damper was determined with the accelerated test approach depending on the torsional resonance frequency. A unique rubber sample was produced by taking the rubber form of the first inertial mass of a selected the torsional vibration damper as reference. This rubber sample has been subjected to shifting at its natural frequency and specified amplitudes in order to simulate the torsional vibration occurring in the torsional vibration damper. For this, a special crank connecting rod test system was designed and tests were carried out on this system. Finally, amplitude and frequency dependent life estimates were created by using experimental data. The working performance of the created prediction model is discussed.

Keywords: Crankshaft Pulley, Rubber, Accelerated Test, Durability Life of Rubber

1. GİRİŞ

Krank kasnakları, krank millerinde düzensiz piston patlamalarından meydana gelen burulma titreşimlerini azaltan ve aynı zamanda aktarma organı olarak görev yapan bir motor elemanıdır. İçten yanmalı motorlarda, krank milinde birden çok tipte titreşimler oluşmaktadır. Bu titreşimler arasında en kritik olanı burulma titreşimidir. İçten yanmalı motorlarda burulma titreşimi kaynaklı oluşan bu problemlerin önüne geçilebilmesi için krank kasnağı kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile krank kasnaklarının sönüm kabiliyetleri artmış ve farklı tiplerde sönüm elemanı kullanılan krank kasnakları ortaya çıkmıştır [1]. Bu farklı tiplerine rağmen krank kasnağının ana amacı burulma titreşim genliğini kabul edilebilir seviyelere indirmektir. Burulma titreşim damperi poly-V kayış ile klima, kompresör, su pompası ve alternatör gibi motor ön düzeneklerinde bulunan kasnaklara aktarılır [2].



Şekil 1. Motor ön düzeneginin gösterimi [2]

Krank kasnaklarının çalışma ömürleri otomotiv endüstrisinde belirlenen regülasyonlara göre belirlenmektedir. Bu regülasyonlara göre krank kasnaklarından beklenen ömür dayanımı 10 ile 20 milyon arasında değişmektedir. Krank kasnaklarının ömür dayanımı aynı zamanda kauçuk elemanın ömür dayanımıdır. Kauçuk, titreşim sönümlenme özelliğinden otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kauçuk ömür tahminleri için bazı deneysel modeller önerilmiştir [3]. Krank kasnaklarının ömür dayanımındaki en önemli parametre rezonans frekansıdır. Kauçuğun belli çevrimlerde çalıştıktan sonra rezonans frekansının değişmesi krank kasnağı çalışma performansını doğrudan etkilemektedir. Krank kasnağı rezonans dayanım testi yüksek çevrim sayılarından dolayı oldukça uzun sürmektedir. Bu uzun sürelerin önüne geçmek için hızlandırılmış test yaklaşımları kullanılarak ömür tahmini yapılabilmektedir. Bu hızlandırılmış test metotları krank kasnağına özgün bir şekilde

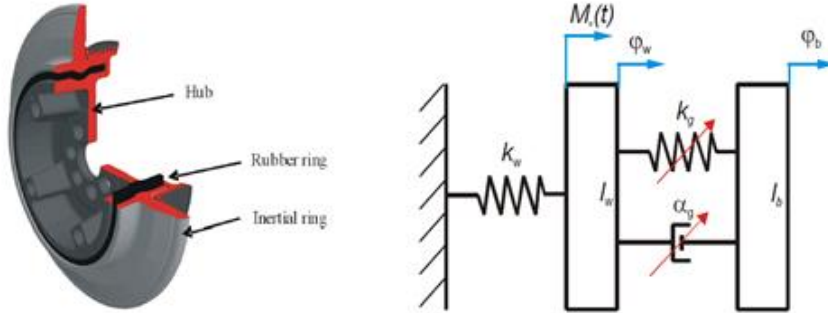
hazırlanabilmektedir. Bu çalışmanın ana amacı da krank kasnağına özgün bir hızlandırılmış test yaklaşımı sunmaktır.

Bu çalışmada krank kasnağında kullanılan kauçuk bileşeni dinamik dayanım ömrü hızlandırılmış test yaklaşımıyla burulma doğal frekansına bağlı olarak belirlenmiştir. Seçilen bir krank kasnağının birinci atalet kütesinin kauçuk formu referans alınıp özgün bir kauçuk numunesi üretilmiştir. Bu kauçuk numunesi, krank kasnağında oluşan burulma titreşimini modellemek için kendi doğal frekansında ve belirlenmiş genliklerde kaymaya maruz bırakılmıştır. Bunun için özel bir krank biyel test sistemi tasarlanmış ve testler bu sistemde gerçekleştirilmiştir. Son olarak genlik ve frekansa bağlı ömür tahminleri deneysel verilerden yararlanarak oluşturulmuştur. Oluşturulan tahmin modelin çalışma performansı tartışılmıştır.

2. KRANK KASNAĞI DİNAMİĞİ

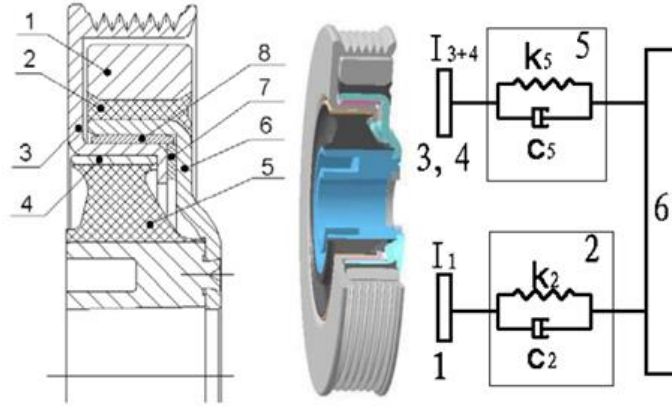
2.1 Krank Kasnağı

Krank kasnakları, krank mili burulma titreşimlerini azaltmak için kullanılmaktadır. Krank milinin dönme sırasında oluşan burulma titreşimleri sisteme zara vermekte ve yorulmalara sebep olmaktadır [2]. İçten yanmalı motorlarda kullanılan krank kasnaklarında dinamik eleman olarak genelde elastomer malzeme kullanılmaktadır. Elastomer malzemeli krank kasnakları kompakt bir yapı içinde bir veya birden çok frekans hedef alacak şekilde tasarlanabilir ve bu tasarıma göre tek modlu, iki modlu çok modlu gibi isimlendirirler. Tek modlu krankları krank mili ucuna monte edilmiş bir göbek, orta kısmında elastomer ring ve hareketin iletilmesi için kanallı bir yapıya sahip olan dış halkadan oluşmaktadır.



Şekil 2. Tek modlu krank kasnağının şematik gösterimi [4]

Şekil 3’de iki modlu kauçuklu bir krank kasnağı görülmektedir. İki modlu kasnak aynı zamanda iki tek modlunun paralel bağlanmasından oluşur. 6 numaralı parça bir göbektir ve göbek krank miline bağlıdır. Parça 3 (kanallı) ve parça 4 birbirine sıkı geçmiştir ve birinci atalet kütesini oluşturur. Parça 5 ve atalet kütesi (3,4) tek modlu sönümleyicisi oluşturur. Parça 7 ve Parça 8 PPS (Polifenilen Sülfid), teflonlu veya metal malzemelerden oluşan parçalardır. Göbeğe (6) temas eden bu iki parçanın (7,8) temas yüzeyleri göreceli hareket edebilir. İkinci atalet kütesi (flaş), (1) ve parça 2 (elastomer) ikinci tek modlu sönümleyiciyi oluşturur [5].

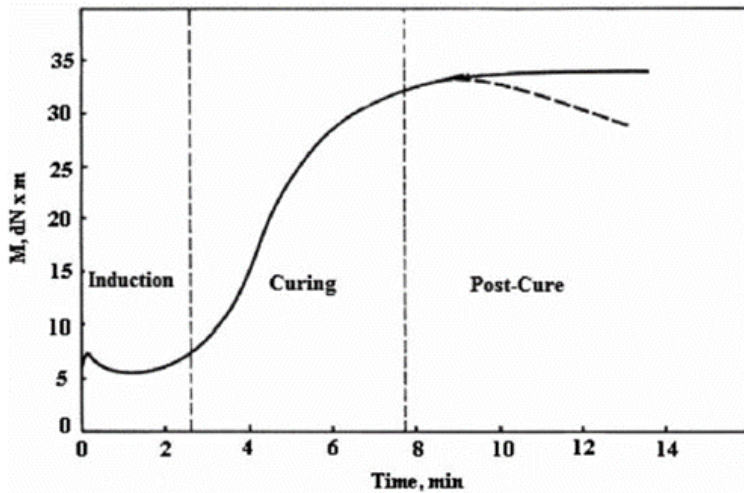


Şekil 3. İki modlu krank kasnağının şematik gösterimi [5]

2.2 Krank Kasnağında Kauçuk

Tek ve çok modlu krank kasnaklarının doğru çalışması; krank mili burulma rezonans frekansına göre ayarlanması için dinamik karakteristiğinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Dinamik karakteristiği belirleyen en önemli bileşen ise kauçuk elemandır. Kauçuk, uzay ve havacılık, makine, otomotiv ve savunma sanayiinde yaygın olarak titreşim çözümlerinde kullanılan bir malzemedir. Krank kasnaklarında birden fazla kauçuk türü kullanılmaktadır. Doğal kauçuk (NR), etilen propilen dien kauçuk (EPDM), nitril kauçuk (NBR) ve stiren bütadien kauçuk (SBR) gibi kauçuk türleri kullanım yerlerine göre değişmektedir [6]. Krank kasnakların rezonans frekansı sönümlenmesinde kullanılan kauçukta sürekli çalışma sıcaklığı, düşük deformasyon, yağa dayanımı ve mekanik (kopma mukavemeti, kopmada uzama, elastikiyet, yırtılma direnci, sürtünmeye dayanım) gibi özelliklerine sahip olması gerekmektedir.

Krank kasnaklarında dinamik karakteristiğinin belirlenmesinde kauçuk elemanın ana etken olmasından dolayı, kürlenme karakteristiğinin dinamik özelliklerin belirlenmesinde doğrudan belirleyici bir rolü vardır. Kauçuk malzemelerde kürlenme, optimum süre ve sıcaklıklarda kimyasal yapı değişikliğine uğrayarak (çapraz bağlanma reaksiyonu) kauçuğun istenilen elastik özellikleri kazanmasıdır. Kauçuk kürlenme karakteristiğinin belirlenmesinde kürlenme eğrisinden faydalanılmaktadır. Standartlara uygun şekilde hazırlanan kauçuk numunenin, belirlenen sıcaklıktaki iki plaka arasında basınç ile sıkıştırılarak sinüzoidal bir salınımla zorlanması ve kayma gerilmesine maruz kalmasıyla zamana karşı tork değeri elde edilir. Şekil 4’de kauçuk numunesine yapılmış tipik bir kürlenme eğrisi görülmektedir.



Şekil 4. Kauçuk kürlenme eğrisi [7]

Kürlenme eğrisinde bazı önemli parametreler hem kauçuk kalıplama prosesinde hem de kauçuk dinamik özelliklerinin öngörülmesinde belirleyici olmaktadır. Bu parametreler sırayla ML, MH, t90, ts1'dir. ML ve MH sırasıyla minimum ve maksimum torktur. MH aynı zamanda kauçuktaki katılığı temsil eder. Nihai üründe, özellikle krank kasnağı gibi dinamik karakteristiğın kalıplama süresi ile etkilendiğı ürünlerde kürlenme süresinin belirlenmesi oldukça kritiktir [8].

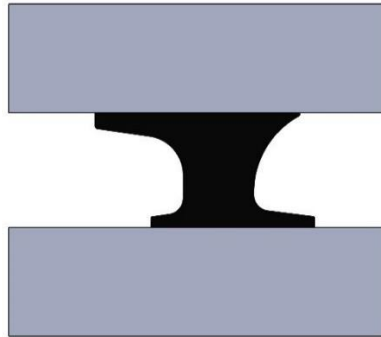
3. KRANK KASNAKLARINDA ÖMÜR TESTİ

Krank kasnağı krank miline doğrudan bağı olarak çalışan dinamik bir parçadır. Krank milinde düzensiz patlamalarla meydana gelen burulma titreşimleri krank kasnağı ile absorbe edilir. Krank milinin kritik hızına (kritik burulma frekansı) göre tasarlanan ve o frekansta sönüm gerçekleştiren krank kasnaklarının ömür dayanımlarından en önemli parametre rezonans frekansıdır. Krank kasnaklarının çalışma koşullarında rezonans frekansının \pm %5 oranından daha fazla değışmemesi beklenir. Bunun için krank kasnağı çalışma koşulları test sisteminde uygulanır. Krank kasnağı rezonans frekansında belirli burulma genliklerinde 10-20 milyon çevrim arasında çalıştırılır. Yüksek çevrimlerde test süreleri çok uzun olduğundan dolayı endüstriyel uygulamalarda hızlandırılmış test yaklaşımıyla test süreleri düşürülmelidir. Bunun için, krank kasnağında kullanılan kauçuk kesitine uygun numuneler üretilerek bu numunelere doğal frekanslarında kayma gerilmesi uygulanır. Bu kayma gerilmesi krank kasnağından kauçuk elemanının burulmasına eşdeğerdır. Böylece numune üzerinden elde edilen çevrime bağı ömür eğrisi, çevrime bağı krank kasnağı ömür eğrisi tahminlerinde kullanılabilir.

3.1 Kauçuk Numunelerin Hazırlanması

Yapılan literatür araştırmaları ışığında, kauçuk ömür tahminlerinde birçok metot kullanılmaktadır. Bu metotlarla birlikte nümerik yaklaşımlar kullanılarak sonlu elemanlar analiziyle ömür tahminleri yapıldığı gibi ömür parametresi belirlenerek parametrik yaklaşımlarla kurulan ömür tahmin modelleri de kullanılmaktadır. Bu kapsamda çevrim sayısı, bir parametrenin fonksiyonu olarak belirlenmekte ve bu parametrenin kauçuk ömrünü etkileyen diğere bir parametreye karşı (genlik, sıcaklık, frekans vb.) değışimi ile ilişkilendirilmektedir. Parametrik yaklaşımlar ile kurulan modellerde, deney sonuçlarına göre elde edilen katsayılarla, kauçuk ömür tahmini belirlenen parametreye göre (örn. genlik) tespit edilebilmektedir. Hızlandırılmış test prosedürü, oluşturulan bu ömür modeli ile test kısıtlarıyla beraber belirlenen ömür parametresine bağı toplam enerji kaybının eşit tutulması ilkesine göre oluşturulmaktadır.

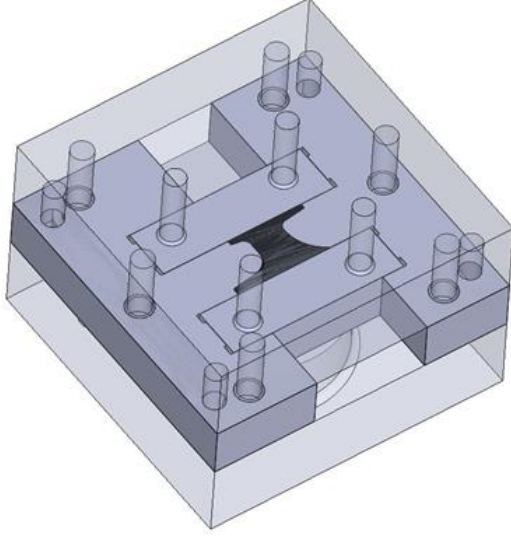
Numune tasarımı, iki metal parça arasında hedef ürün krank kasnağının birinci atalet kütlelerinde kullanılan kauçuk kesit tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'de kauçuk kesit tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 5. Kauçuk-Metal numune tasarım görünümü

Numuneler, birinci atalet kütlelerinde içerisinde bulunan NR 55 Shore A kauçuk malzeme ile seçilmiştir. Kauçuk için yukarıda bahsedilen kürlenme grafiğı elde edilmesi için reometre testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre kürlenmenin tam gerçekleşmesi hedeflenmektedir. Böylece gereğinden fazla

kürlenme sonucunda mekanik özellik artışı veya azalışı önlenmiş olmakta, kauçuk beklenen dinamik özelliklere ulaşmaktadır. Kürlenme eğrisinden elde edilen parametreler, kauçuk kalıplama ve kauçuk dinamik özellikleri için belirleyici öneme sahiptir. Bu parametreler göz önünde bulundurularak kompresyon kalıbı ile kauçuk-metal numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6 ve 7’de gösterilmektedir.



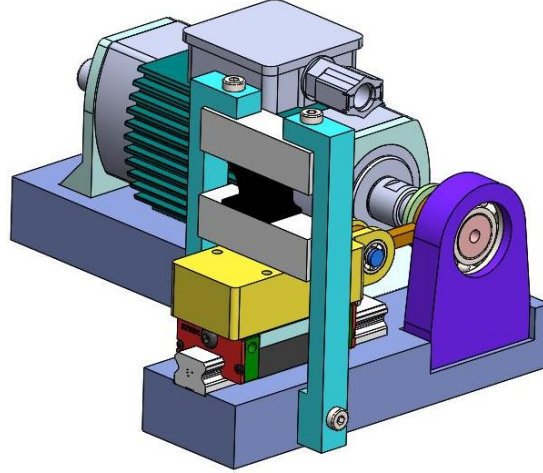
Şekil 6. Numune kompresyon kalıp tasarımı



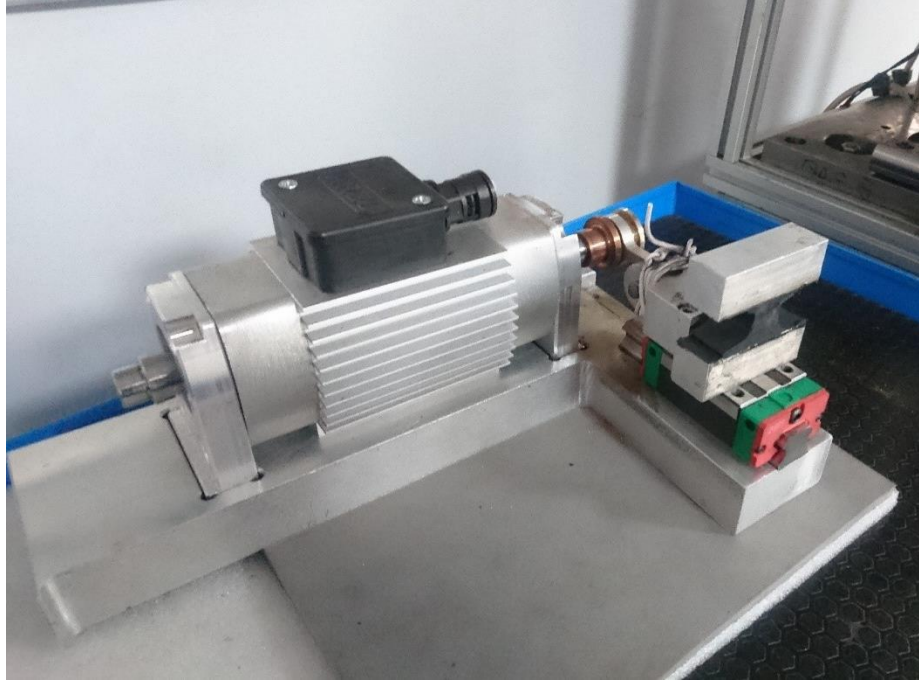
Şekil 7. Üretimi gerçekleştirilen numuneler

3.2 Hızlandırılmış Test Düzenine Hazırlanması

Kauçuk numuneler için hazırlanan test düzeneği Şekil 8’de gösterilmiştir. Bu test düzeneğine göre krank biyel mekanizması maksimum 50 Hz’e kadar tahrik edilebilmektedir. Bu tahrik Spindle motor ile gerçekleştirilmektedir. Düzeneğin üstüne montajlanan numunenin kayma gerilmesine maruz bırakılması için üst tarafından da sabitlenmiştir. Böylece numune kaymaya maruz bırakılır. Numune doğal frekanslarının ölçümü tek eksenli ivme (model) ve modal çekiç (model) kullanılarak ölçülmüştür. Tek eksenli ivme ölçer ağırlığı ihmal edilebilir seviyededir. Ayrıca genliğin etkisinin incelenmesi için 1, 1.5, 2 ve 2.5 mm deplasmanlarında kayma zorlaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. Hızlandırılmış Test Düzenegi



Şekil 9. Numune Test Görünümü

Numunelere ömür testi aşağıdaki prosedür izlenerek uygulanmıştır:

- Numune doğal frekansı darbe çekiç testiyle ölçülür.
- Motor numune doğal frekansında sürülür.
- Her 1 milyon çevrimde bir doğal frekans ölçülmüştür.
- 5 milyon çevrimde test sonlandırılmıştır.
- Yukarıdaki işlemler her bir genlik için tekrar uygulanmıştır.

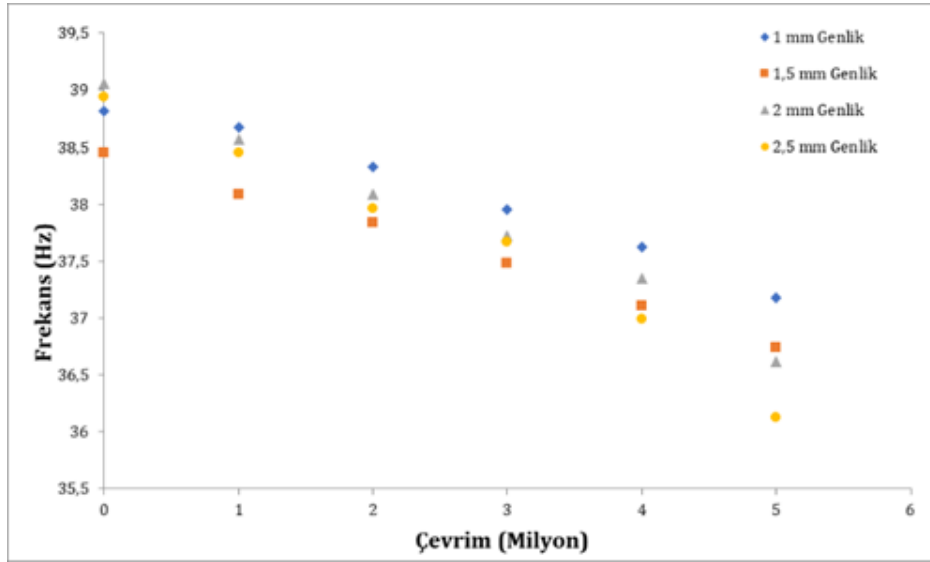
Yapılan doğal frekans ölçümlerinde frekansın değişim oranı deplasmana göre çevrime bağlı olarak incelenmiştir.

3. HIZLANDIRILMIŞ TEST PROSEDÜRÜNE GÖRE KAUCUK ÖMÜR TAHMİNİ

Kauçuk ömür tahmini için geliştirilen deney düzeneği ve hazırlanan numuneler ile sistemik bir çalışma yapılarak parametrik bir yorulma fonksiyonu ve buna bağlı olarak hızlandırılmış dayanım test prosedürü oluşturulmuştur. Bu oluşturulan prosedür ile seri testler gerçekleştirilmiştir. Testler için 4 adet numune kullanılmıştır. Numunelerin ilk doğal frekansları ve genliğe göre her bir 1 milyondaki doğal frekansları Tablo 1 de verilmiştir. Ayrıca genliğe bağlı frekans değişimi grafiği Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 1. Frekans-çevrim ilişkisi

	1 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm
İlk Frekans	38.82	38.45	39.06	38.94
1 milyon	38.67	38.09	38.57	38.45
2 milyon	38.33	37.84	38.09	37.96
3 milyon	37.95	37.48	37.72	37.67
4 milyon	37.62	37.11	37.35	36.99
5 milyon	37.17	36.74	36.62	36.13

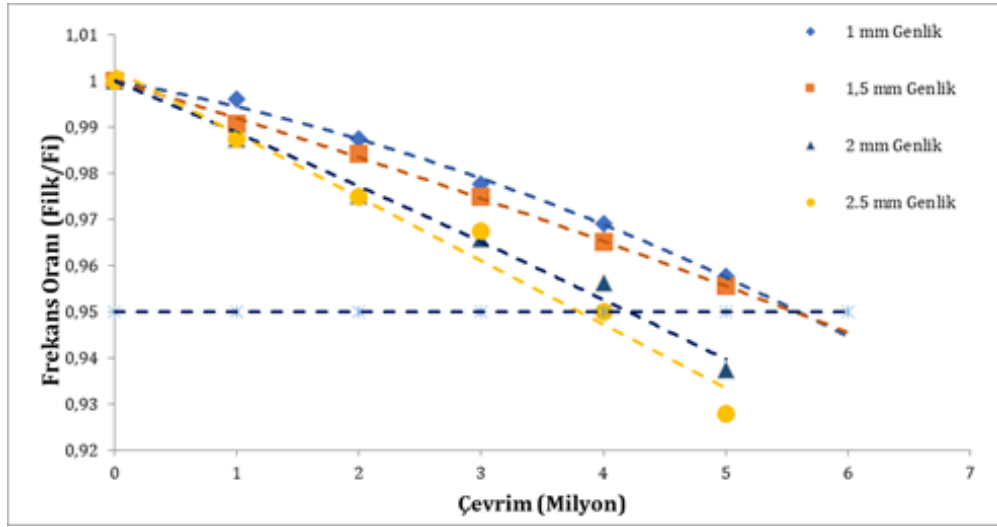


Şekil 10. Frekans-çevrim grafiği

Krank kasnaklarında dayanım, kauçuk malzemenin karakteristiğinin değişimine bağlı olarak doğal frekansın değişimiyle ifade edilmektedir. Bu sebeple bu çalışmada da çevrim sayısı ile frekansın değişimi incelenmiştir. Numune üzerinde yapılan testler sonucunda frekansın çevrim sayısı ile değişimi aşağıdaki şekil 11 ve tablo 2'de gösterilmektedir. Grafikten de görüleceği üzere çevrim sayısı ile birlikte doğal frekansın düşme eğiliminde olduğu, zorlama genliğinin artmasıyla birlikte düşme eğiliminin daha fazla olduğu net olarak görülebilmektedir.

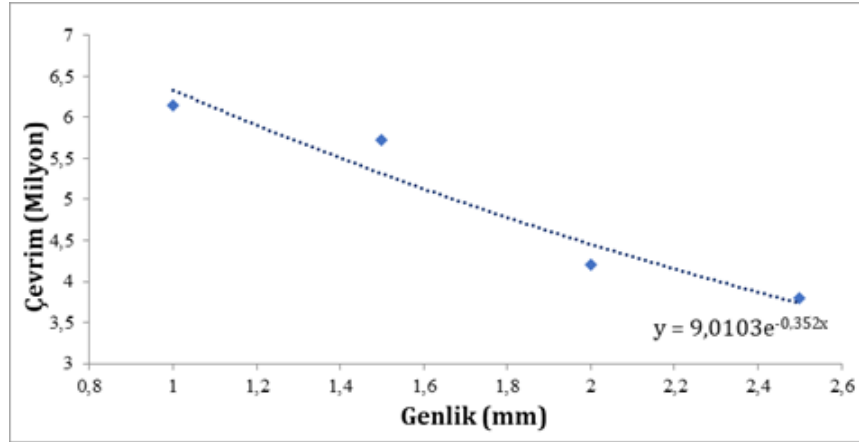
Tablo 2. Frekans oranı-çevrim ilişkisi

İlk Frekans	1	1	1	1
1 milyon	0.9961	0.9906	0.9875	0.9874
2 milyon	0.9874	0.9841	0.9752	0.9748
3 milyon	0.9776	0.9748	0.9657	0.9674
4 milyon	0.9691	0.9651	0.9562	0.9499
5 milyon	0.9578	0.9555	0.9375	0.9278



Şekil 11. Frekans oranı-çevrim grafiği

Kauçuk malzemenin hızlandırılmış yorulma dayanımı karakteristiğini elde etmek için yukarıdaki grafik kullanılarak parametrik bir fonksiyon elde edilmiştir. Frekans değeri (frekanstaki düşme) dayanımın bir ölçüsü olarak verildiği için bu grafikte yatay olarak çizilen eğri eşdeğer yorulma dayanımını ifade etmektedir. Görüldüğü gibi bu yatay eğri farklı genliklerde yapılan testleri farklı noktalarda, diğer bir deyişle farklı çevrim sayılarında kesmektedir. Bu kesişim noktalarındaki sayısal değerler alınarak aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere zorlama genliği ile eşdeğer zorlama çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi gösterilen grafik çizilmiştir.



Şekil 12. Çevrim-genlik grafiği

Grafikten görüldüğü üzere, genliğin artışı ile yorulma dayanımı arasında doğrusal olmayan bir ilişki gözlenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar da göz önüne alınarak, elde edilen veriler üzerinden çevrim sayısının genliğin bir fonksiyonu olarak ifade edecek şekilde logaritmik/üstsel bir eğri uydurulmuş ve bu eğrinin fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$N = f(A) = 9.0103e^{(-0,352x)} \quad (1)$$

Bu fonksiyon kullanılarak numuneler için gerçekleştirilmesi düşünülen hızlandırılmış testler planlanabilir. Örneğin, testlerin hedeflenen yorulma dayanımı için ± 1 mm genlikte gerçekleştirilmesi planlanıyor ise numunenin 6.336.764 çevrim zorlanması gerekmektedir. Bunun yerine aynı numune ± 2 mm genlikte zorlandığında gerekli çevrim sayısı 4.456.520 olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, planlanan bu %29,67 kadar hızlandırılabilir.

4. SONUÇ

Krank kasnaklarında rezonans dayanım testleri 10-20 milyon çevrim sürelerinden dolayı oldukça uzun sürmektedir ve endüstriyel uygulamalarda bu uzun test sürelerinin azaltılması test maliyetleri ve enerji kullanımı açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, krank kasnağı hızlandırılmış dayanım test prosedürü oluşturulmuştur. Bu test prosedürü oluşturulurken krank kasnağı kauçuk kesiti referans alınmış ve buna uygun numuneler üretilmiştir. Bu numuneler krank biyel sistemiyle çalışan bir test düzeneğinde doğal frekansında kayma zorlamasına bırakılmıştır. Kayma zorlaması krank kasnağında kauçuk elemanın burulmasına eşdeğerdir. Oluşturulan test prosedürüne göre numunelerin farklı genliklerde (1, 1.5, 2 ve 2.5 mm) test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar için önce çevrime bağlı farklı genlikler için frekans oranı-çevrim ilişkisi kurulmuştur. Bu ilişkide, oluşturulan eğrilerin kabul edilebilir frekans oranına (\pm %5) çekilen sınır doğrusuyla kesişim noktalarındaki çevrim sayıları belirlenmiştir. Belirlenen çevrim sayılarına göre, genliğe bağlı yorulma çevrim sayısı ilişkisi kurulmuş ve uydurulan eğri üstsel bir fonksiyonlar ifade edilmiştir. Bu fonksiyona göre değişkene girilen genlik miktarı, krank kasnağı burulma frekansının \pm %5 değiştiği çevrim sayısını verecektir. Çevrim sayısı eğer regülasyonda belirtilen dayanım limitini aşmıyorsa ömür dayanımı kriterinin sağlandığı söylenebilir. Bu modelin çalışma performansının iyileştirilmesi için birçok farklı krank kasnağı kauçuk elemanları test edilmesi ve deney verileri artırılmalıdır. Buna göre model üzerinde uygun katsayı değişimleri yapılabilir.

REFERANSLAR

- [1] Homik, W. (2011). Damping of torsional vibrations of ship engine crankshafts-general selection methods of viscous vibration damper. *Polish Maritime Research*, 18(3), 43-47.
- [2] Silva, C. A. F., Manin, L., Rinaldi, R. G., Besnier, E., & Remond, D. (2019). Dynamics of Torsional Vibration Damper (TVD) pulley, implementation of a rubber elastomeric behavior, simulations and experiments. *Mechanism and Machine Theory*, 142, 103583.
- [3] Zhang, J., Xue, F., Wang, Y., Zhang, X., and Han, S. (2018). Strain energy-based rubber fatigue life prediction under the influence of temperature. *Royal Society Open Science*, 5(10), 180951.
- [4] Homik, W., & Grzybowski, P. (2015). The simulation model of small-dimension rubbery torsional vibration damper. *Vibroengineering PROCEDIA*, 6, 78-82.
- [5] Shanguan, W. B. and Pan, X. Y. (2008). Multi-mode and rubber-damped torsional vibration absorbers for engine crankshaft systems. *International Journal of Vehicle Design*, 47(1-4), 176-188.
- [6] Nagar, A., Chokkalingam, V., Umashankar, N., and Shankar, S. R. (2013). Improvement in crank train torsional vibration (TV) performance of multi-cylinder diesel engine. *SAE Technical Paper*, (No. 2013-01-2777).
- [7] Khimi, S. R., & Pickering, K. L. (2014). A new method to predict optimum cure time of rubber compound using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6).
- [8] Sommer, J. G. (2009). *Engineered Rubber Products: Introduction to Design, Manufacturing and Testing*. Chapter, 2, 14-24.