

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAUÇUK ÖMÜR TESTİ İÇİN BİR TEST DÜZENİĞİNİN VALİDASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Baybora ÇORBACIOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAUÇUK ÖMÜR TESTİ İÇİN BİR TEST DÜZENİĞİNİN VALİDASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Baybora ÇORBACIOĞLU
(503191712)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Alper Tolga ÇALIK

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

VALIDATION OF A RUBBER FATIGUE LIFE TEST RIG



M.Sc. THESIS

**Baybora ÇORBACIOĞLU
(503191712)**

Department of Mechanical Engineering

Automotive Programme

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Alper Tolga ÇALIK

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503191712 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Baybora ÇORBACIOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KAUÇUK ÖMÜR TESTİ İÇİN BİR TEST DÜZENİĞİNİN VALİDASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Alper Tolga ÇALIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Orkun ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 12 Haziran 2024



ÖNSÖZ

Çalışma konumun belirlenmesinde ve çalışmanın sürecinin her aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve vaktini esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli Sayın Asil Arif AKSEKİLİ'ye, çalışmam boyunca destekleyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Alper Tolga ÇALIK'a, akademik hayatım boyunca arkamda olan aileme ve tezime olan katkıları ve tez süresince inancıyla manevi desteği için Beyzanur HİTAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2024

Baybora ÇORBACOĞLU
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kauçuğun Tarihçesi.....	1
1.2 Kauçuğun Genel Özellikleri.....	2
1.3 Kauçuğun Fiziksel İncelemesi	3
1.4 Doğal Kauçuk.....	4
1.4.1 Genel bilgiler.....	4
1.4.2 Doğal kauçuğun vulkanizasyonu	4
1.4.3 Doğal kauçuğun özellikleri	6
1.4.4 Doğal kauçuğun avantajları	6
1.5 Kauçuk Parça İmalatında Kullanılan Prosesler	6
1.5.1 Kauçuk hammaddenin karıştırılması	7
1.5.2 Kauçuğun şekillendirilmesi.....	7
1.5.2.1 Kompresyon kalıplama	7
1.5.2.2 Transfer kalıplama	8
1.5.2.3 Enjeksiyon kalıplama	8
1.5.2.4 Ekstrüzyon	8
1.5.2.5 Kalenderleme	9
1.6 Şaft Askı Lastiği.....	9
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
2.1 Giriş.....	11
2.2 Bulgular	12
3. KAUÇUK MALZEME NUMUNE ÖMÜR TESTLERİ VE ANALİZİ	19
3.1 Numune Sonlu Elemanlar Analizi.....	19
3.2 Test Takozlarının Ömür Testleri	22
3.3 Test Cihazı Ömür Karakteristik Eğrisinin Eldesi ve Kabul Sınırlarının Belirlenmesi	25
4. ŞAFT ASKI LASTİĞİ ANALİZLERİ VE ÖMÜR TESTLERİ.	27
4.1 Şaft Askı Lastiği Analizleri.....	27
4.2 Şaft Askı Lastiği Ömür Testleri	29
5. SONUÇ	37
6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR	41



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing And Materials
ISO	: International Organization for Standardization
MRPRA	: Malezya Kauçuk Üreticileri Araştırma Derneği
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi





SEMBOLLER

C_{10}, C_{01}, D	: Mooney-Rivlin modeli katsayıları
ϵ	: Gerinim
I_1, I_2, I_3	: 1., 2. ve 3. deviatorik gerinim invariantları
J	: Elastik hacim oranı
N_f	: Ömür çevrimi
t	: Zaman
W	: Gerinim enerjisi yoğunluğu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Ömür test takozu ağ yapısı modelleme parametreleri.	19
Çizelge 3.2: Sonlu elemanlar analizi parametreleri ve testteki karşılıkları.	21
Çizelge 3.3: Farklı açılarla yerleştirilen takozlarda okunan gerinim değerleri.	22
Çizelge 3.4: Ömür test takozu test cihazı özellikleri ve test parametreleri.	23
Çizelge 3.5: Ömür testi sisteminde kullanılan kuvvetölçerin ölçüm belirsizliği.....	24
Çizelge 3.6: Farklı açılarda takozların, çevrim cinsinden, ömür performansı.....	24
Çizelge 3.7: Farklı açılarla yerleştirilen takozların ortalama ömür değerleri.....	25
Çizelge 4.1: Sonlu elemanlar analizi parametreleri ve testteki karşılıkları.	27
Çizelge 4.2: Sonlu elemanlar analizine ait düğümlerin gerinim genlikleri.	29
Çizelge 4.3: Ömür test takozu test cihazı özellikleri ve test parametreleri.	31
Çizelge 4.4: 3 shaft askı lastiğinin direngenlik ve ömür testi sonuçları.	33



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Polimerde meydana gelen çapraz bağlanma.	5
Şekil 1.2: Kardan miline bağlı şaft askı lastiği.	10
Şekil 3.1: Kauçuk ömür testi takozu numunesi geometrisi.	19
Şekil 3.2: 10° açılı konumlandırılmış kauçuk ömür testi takozu numunesi modeli. .	20
Şekil 3.3: 20° açılı konumlandırılmış kauçuk ömür testi takozu numunesi modeli. .	21
Şekil 3.4: 30° açılı konumlandırılmış kauçuk ömür testi takozu numunesi modeli. .	21
Şekil 3.5: Üretimden çıkan ömür testi test takozu.	222
Şekil 3.6: Ömür testi test cihazı.	23
Şekil 3.7: Ömür testi cihazı kullanıcı arayüzü.	24
Şekil 3.8: Test takozu S-N eğrisi ve limit değerleri.	25
Şekil 4.1: Parça ön yüzündeki kritik düğüm noktaları.	28
Şekil 4.2: Parça ön yüzündeki kritik düğüm noktaları.	28
Şekil 4.3: Enjeksiyonla üretim için kullanılan vulkanizasyon kalıbı.	30
Şekil 4.4: Vulkanizasyondan yeni çıkmış askı lastikleri.	31
Şekil 4.5: Ömür testi için montajlanmış şaft askı lastiği.	32
Şekil 4.6: Ömür testini kopma sonucu tamamlayan numune.	33
Şekil 4.7: Test sonuçlarının kabul limitlerine göre durumu.	34
Şekil 4.8: 1. test numunesinin test boyunca direngenlik ölçümü.	34
Şekil 4.9: 2. test numunesinin test boyunca direngenlik ölçümü.	35
Şekil 4.10: 3. test numunesinin test boyunca direngenlik ölçümü.	35
Şekil 5.1: İzlenen yol haritası blok diyagramı.	357



KAUÇUK ÖMÜR TESTİ İÇİN BİR TEST DÜZENEĞİNİN VALİDASYONU

ÖZET

Kauçuk malzemeler, özellikle tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalmakta ve çeşitli mühendislik uygulamalarında gerek birincil gerek ikincil fonksiyonlarda kritik bir rol oynamaktadır. Kauçuğun yorulma özelliklerini anlamak, ürün performansını ve dayanıklılığını öngörebilmek; kaliteyi ve emniyeti garanti ederken ticari olarak rekabetçi kalabilmek için hayati önem taşır.

Kauçuk yorulma testi cihazları, kauçuğun tekrarlayan yüklemelere karşı performansını test etmek için kullanılan makinalardır. Kauçuğu sabitlemek ve ölçüm sonuçlarının gürültüden etkilenmemesi için sağlam bir çerçeveye, gerilmeyi uygulamak için aktüatörlere ve bunu ölçmek için sensörlere sahiptirler. Kontrol sistemi, gerilme seviyelerini ayarlar, verileri kaydeder. Bazı cihazlar farklı ortamları (sıcaklık, frekans, ...) taklit edebilirler. Bu cihazlar, kauçuk ürünlerin kalite standartlarını karşıladığından ve parçalar gerçek koşullarda kullanıldığında istenen ömür dayanımına sahip olmasını sağlar. Kauçuk ömrü; malzeme özellikleri, çevresel faktörler, yükleme koşulları, yükleme geçmişi, parça geometrisi, imalat süreçleri, işletme koşulları ve yaşlanma etkileri gibi birçok faktörün kombinasyonuna bağlıdır. Tüm bu faktörlerin takip edilerek kauçuk yorulma davranışının incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle test cihazları belli başlı karakteristiklere, birbirine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu senaryolara sahiptir. Bu farklılıklara; test edilebilen sıcaklık aralığı, frekans aralığı, yükleme tipleri, ölçüm hassasiyetleri, parça boyutları vb. birçok etken örnek verilebilir.

$R = -1$, bileşenlerin simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kaldığı durumu temsil etmektedir. İncelenen test cihazının doğrulaması bu yükleme tipinde kauçuk ömrünün tespiti içindir.

Kauçuk sektöründe genelgeçer kabul edilen standart $R = 0$ durumu sadece çekme durumu için ömür testine yöneliktir. İncelenen diğer çalışmalarda farklı yükleme tipleri haricinde, $R = -1$ koşulunun farklı bir mekanizmayla sağlandığı ya da cihaz validasyon çalışmalarının zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmayla silindirik numuneleri eksenine göre farklı açılarda gerdirerek konumlandırdıktan sonra motordan alınan güç aracılığıyla numunelere dönme hareketi vermek suretiyle numunede sıkışan bölgede basma, genişleyen bölgede çekme gerilmesi uygulamak suretiyle; sinüzoidal basma-çekme yükleme koşulunda kauçuk numunelerin ömür dayanımları tespit edilebilecektir. Yeni cihazla ve bu cihaza uygun test takozlarından elde edilen Wöhler eğrisiyle hesaplanan ömür tahminlerinin fiziki şaft askı lastiği ömür testlerinden çıkan sonuçlarla örtüşüp örtüşmediği irdelenmiştir.



VALIDATION OF A RUBBER FATIGUE LIFE TEST RIG

SUMMARY

Rubber materials are subjected to cyclic loading conditions, playing a critical role in various engineering applications, both in primary and secondary functions. Understanding the fatigue properties of rubber is vital for predicting product performance and durability, ensuring quality and safety, and remaining competitive in the market.

Tension and compression stresses in rubber lead to different mechanical responses due to the unique nature of rubber as a material. Here's how tension and compression stresses affect rubber differently. Rubber is highly elastic in tension, meaning it can deform significantly under tension stress and return to its original shape once the stress is removed while it is also highly resilient in compression, meaning it can recover its original shape after being compressed. Rubber generally exhibits stiffer behavior in compression compared to tension, meaning it requires higher stresses to achieve the same level of deformation in compression as in tension. In addition, rubber materials exhibit hysteresis, which means that its response to loading and unloading is not entirely reversible. This phenomenon is more pronounced in compression compared to tension.

Rubber fatigue testing devices are machines used to test the performance of rubber under repeated loading conditions. They consist of sturdy frames to hold the rubber, actuators to apply stress, and sensors to measure it, ensuring that measurement results are not affected by noise. The control system adjusts stress levels and records data. Some devices can mimic different environments (temperature, frequency, etc.). These devices ensure that rubber products meet quality standards and have the desired lifespan when used under real conditions. However, the study of rubber fatigue behavior is inherently complex due to the interplay of numerous factors including material properties, environmental conditions, loading history, part geometry, manufacturing processes, operating conditions, and aging effects. These multifaceted considerations necessitate testing devices with specific characteristics tailored to different testing scenarios, each with its own advantages and disadvantages. Therefore, testing devices have specific characteristics, advantageous and disadvantageous scenarios compared to each other. These differences include factors such as the range of testable temperatures, frequency ranges, loading types, measurement accuracies, part sizes, etc. so that they can offer the capability to mimic various environmental conditions such as temperature and frequency. By simulating real-world conditions, these testing devices ensure that rubber products meet stringent quality standards and possess the desired lifespan when deployed under actual operating conditions.

R = -1 represent the situation where components are subjected to symmetrical cyclic loading conditions. The validation of the examined test device is for the determination of rubber life under this loading condition.

One critical aspect of fatigue testing is the validation of devices under $R = -1$ loading conditions, where components are subjected to symmetrical cyclic loading conditions. Despite its importance, many studies lack thorough validation under this condition, often resorting to the conventional $R = 0$ standard, which fails to fully capture the behavior of materials under compression. In the examined studies, except for different loading types, it has been observed that the $R = -1$ condition is achieved through a different mechanism or that the validation studies of the device are not carried thoroughly. The worldwide used ISO 6943 and ASTM D4482 standards used for rubber fatigue tests is also a pure tensile test which represents the $R=0$ condition. It doesn't account for the behaviour of the material in the compressed state which is known to lead to better strength and fatigue performance of strain crystallizing rubbers like natural rubber.

To address this limitation, this study focuses on determining the fatigue resistance of rubber samples under sinusoidal compression-tension loading conditions. This novel approach involves a rubber fatigue test rig which can utilize cylindrical shaped rubber samples, also known as diabolo specimens, at various angles relative to their axis and applying compressive stress in the constricted region and tensile stress in the expanding region. The rig can hold and test up to 6 diabolo samples for fatigue test at 10 Hz. Through the power obtained from the motor, the fatigue resistance of rubber samples under sinusoidal compression-tension loading conditions will be determined. To create the Wöhler curve of our rubber compounds for compression-tensile loading scenario, we need to extract two information. Fatigue cycle counts and the strain values corresponding to the aforementioned fatigue cycle value. Samples are placed at angles of 10, 20, 30 and 45 degrees relative to the center of the shaft connected to the rotor. For each angle value the fatigue test has been repeated 6 times. Meanwhile finite element analysis has been conducted to measure the strains at each region to determine the compressive strain at constricted region and tensile strain at expanding region. Total strain has been calculated from the computed compressive and tensile strain, which is then used to determine the strain of the fatigue cycles denoted in our Wöhler curve. To validate the correct determination of fatigue resistance, the consistency of the Wöhler curve obtained with this device has been compared to the test results performed on a center bearing according to the specified test procedure of the product.

A separate literature review has been carried out to determine the acceptable coefficient of determination (R^2) value and the acceptable limits of validation tests according to the obtained Wöhler curve.

Coefficient of determination value represents the deviation of the diabolo sample test results from our ideal Wöhler curve. It has been observed that a value as low as 0,85 is deemed to be acceptable for the coefficient of determination, the coefficient of the obtained Wöhler curve is deemed to be acceptable and shows that diabolo sample fatigue tests results do not scatter from our Wöhler curve.

The research has shown that a prediction within a factor of two (when the experiment output is within half or twice of the calculated result) is a widely accepted criterion and can be used for center bearing validation results to consider a prediction of rubber fatigue test result as successful. The results of the fatigue test conducted on physical parts fall within the range of 1.4 million to 2 million cycles for three center bearing samples which is within the lower and upper limits set with a limit factor of 2.

In conclusion, physical tests conducted on center bearing samples demonstrate remarkable alignment with these criteria, affirming the fidelity of the testing device

and procedures in faithfully replicating compression-tension stress scenarios. This comprehensive approach not only enables precise interpretation of fatigue performance data but also empowers stakeholders with actionable insights for informed decision-making, ultimately enhancing product reliability and customer satisfaction





1. GİRİŞ

1.1 Kauçuğun Tarihçesi

Doğal kauçuk, tropikal bölgelerde yetişen kauçuk ağaçlarından (*Hevea brasiliensis*) elde edilir. Kauçuk ağaçlarının sütümsü sıvısı olan lateksin işlenmesiyle elde edilen bu malzeme, insanlık tarihi boyunca çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Kauçuğun ilk kullanımı, M.Ö. 1600'lü yıllarda Orta ve Güney Amerika'daki Mayalar ve Aztekler gibi yerli halklar tarafından gerçekleştirilmiştir. Kauçuk ağacından elde ettikleri lateksi, top yapımı ve su geçirmez giysiler üretiminde kullanmışlardır. Kauçuğun Avrupa'da tanınması, 15. yüzyılda Kristof Kolomb'un Amerika'ya yaptığı seyahatler sonrasında gerçekleşmiştir. Kolomb ve diğer kaşifler, kauçuğun yerli halklar tarafından çeşitli amaçlarla kullanıldığını gözlemlemişlerdir.

1736'da Fransız kaşif Charles Marie de La Condamine, Amazon bölgesinde kauçuk ağaçlarını incelemiş ve Avrupa'ya kauçuk örnekleri getirmiştir. Ancak, bu dönemde kauçuğun pratik kullanımı sınırlı kalmıştır. 1839 yılında Charles Goodyear, vulkanizasyon işlemini keşfetmiştir. Bu süreç, kauçuğun elastikiyetini ve dayanıklılığını artırarak sanayi devrimi ile birlikte kauçuğun geniş çapta kullanımını mümkün kılmıştır. Bu keşif, kauçuk sanayisinde bir devrim niteliği taşımıştır. Stern, Hancock'un bir sanatçı arkadaşının bu süreç için "vulkanizasyon" terimini türettiğini, Yunan tanrısı Vulcan'a atıfta bulunarak söylediğini belirtiyor. Bu terim daha sonra "Vulkanize etmek", "iyileştirmek" ve "çapraz bağ" terimleri ile eşanlamlı olarak kullanılacaktır.

Doğal kauçuk, otomotiv sektöründe birçok alanda kritik bir malzeme olarak kullanılmıştır. Otomobilin icadı ile birlikte, kauçuk otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. İlk otomobil lastikleri, doğal kauçuktan yapılmıştır. Bu dönemde, lastiklerin dayanıklılığı ve performansı üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. 1900'lerin başında, otomobil üretimi hızlandıkça kauçuk talebi de artmıştır.

Stern'ün ilginç bir gözlemi, İngiltere'de 1904'te karbon siyahı adı verilen bir tozun, kauçuğa karıştırıldığında ve mekanik özelliklerinin birçok açıdan önemli ölçüde

arttığını belirtir. Bu büyük keşfin yaklaşık 8 yıl boyunca şaşırtıcı bir şekilde "rafta kaldığı" görünüyör. 1910'da, otomobilin kullanımının halk nezdinde de artışıyla doğal kauçuğa olan taleple beraber kauçuğun fiyatı da arttı. 1913 yılında Henry Ford'un seri üretim hattını devreye sokmasıyla, otomobillerin kitlesel üretimi başlamış ve kauçuk lastiklere olan ihtiyaç katlanarak artmıştır.

Dünya Savaşı sırasında kauçuk talebi zirveye ulaşmıştır. Savaş sırasında doğal kauçuk tedarikinde yaşanan sıkıntılar, sentetik kauçuğun geliştirilmesine yol açmıştır. Savaştan sonra, otomobil üretiminde hem doğal hem de sentetik kauçuk kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bugün, otomotiv sektöründe kullanılan kauçuk ürünlerin çoğu hala doğal kauçuk içermektedir. Lastikler, motor bağlantı elemanları, contalar, hortumlar ve çeşitli diğer otomobil parçaları, kauçuk malzemelerden üretilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte, kauçuk ürünlerinin performansı ve dayanıklılığı sürekli olarak iyileştirilmektedir.

Blow, 'rubbers' kelimesinin birkaç farklı anlamı olduğu yorumlarında benzer yorumlar yapar. Vulkanize edilmiş malzemenin "elastomer" olarak adlandırılması gerektiğini önerir. ASTM Standart D 1566-98, "elastomer" teriminin sıkça kauçuk ve kauçuğa benzer özelliklere sahip polimerler için kullanılan bir terim olduğunu tanımlar.

1.2 Kauçuğun Genel Özellikleri

Kauçuk, yumuşak ve yapışkan olanından aşırı sert olanına kadar geniş bir özellik yelpazesi sağlamak için bileşiklendirilebilir. Ekstra dayanıklılık gerektiğinde, tekstil kordları veya kumaşlar kauçuk ile kaplanabilir. Lifler yükü taşır ve kauçuk, kordları bir araya getiren bir matris olarak hizmet ederken onları birbirinden izole eder ve sürtünmeyi önler. Sert hizmetler için, yük taşıma ortamı olarak çelik teller kullanılabilir. Araç lastikleri ve ağır hizmet konveyör bantları bu teknolojinin örnekleridir.

Kauçuk, benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Kauçuğun gerilme-gerinim davranışı Mullins etkisini, Payne etkisini gösterir ve genellikle hiperelastik olarak modellenir. Her bir tekrar biriminde bir çift bağın bulunması nedeniyle, doğal kauçuk ozon çatlamalarına duyarlıdır. Doğal kauçuğun özellikleri onu bir elastomer ve bir termoplastik malzeme yapar. Kauçuk kükürtleştirildiğinde termoset bir yapıya dönüşeceği unutulmamalıdır.

Kauçuk gerildiğinde, gevşek halat parçaları gerilir ve bu nedenle artık salınım yapamazlar. Kinetik enerjileri fazla ısı olarak verilir. Bu nedenle, gevşekten gerilmiş duruma geçerken entropi azalır ve rahatlama sırasında artar. Bu entropi değişimi, bir sıkı zincir bölümünün belirli bir sıcaklıkta daha az şekilde katlanabileceği gerçeğiyle de açıklanabilir. Gerilmiş bir kauçuk bandın rahatlatılması böylece entropide bir artış tarafından yönlendirilir ve hissedilen kuvvet elektrostatik değil, malzemenin ısı enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesinin bir sonucudur.

Kauçuk rahatlama endoısıl bir olaydır ve bu nedenle, gerilmiş bir parçanın sıcaklığı arttıkça uygulanan kuvvet de artar. Malzeme kasılırken adiabatik soğuma geçirir. Bu kauçuk özelliği kolayca gerilmiş bir kauçuk bandı dudaklarınıza tutarak ve onu rahatlatarak doğrulanabilir.

Bir kauçuk bandın gerilmesi, bir ideal gazın sıkıştırılmasıyla eşdeğerdir ve rahatlama, genişlemesiyle eşdeğerdir. Bir sıkıştırılmış gaz da elastik özellikler gösterir. Buna şişirilmiş bir otomobil lastiği örnek gösterilebilir. Kauçukta da gerilmenin sıkıştırmaya eşit olması ilk başta mantıksız gelebilir ancak kauçuğun bir boyutlu gaz olarak görülmesi mantıklıdır. Gerilme, her bir polimer zincirinin kullanılabilir alanını azaltır.

1.3 Kauçuğun Fiziksel İncelemesi

Kauçuk, rastgele yönlendirilmiş uzun molekül zincirlerinden oluşur. Bu uzun zincirler, dolaşım ve çapraz bağlanmaya maruz kalır. Dolaşım, stres rahatlama gibi viskoelastik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bir kauçuk, strese veya gerilme enerjisine maruz kaldığında, polimer zincirlerinin dönmesi ve uzaması gibi içsel yeniden düzenlemeler meydana gelir. Bu değişiklikler, uygulanan enerjinin miktarı, süresi ve hızı ile birlikte uygulanan sıcaklığın fonksiyonu olarak gerçekleşir. Kauçuğun uygulanan bir enerjiye yanıtı, elastik enerji depolama veya viskoz enerji dağılımı olabilir.

Sızdırmaz elastomerler için, elastik bileşenin tepkisi önemlidir. Uygulanan bir stres, temas stresi veya sızdırmazlık kuvveti oluşturur. Polimer zincirleri, bu iç enerjiyi azaltmak için yeniden düzenlendiğinde veya depolanan kuvveti azalttığında, bir sızdırmazlık kuvveti kaybı meydana gelir.

Kauçuk ürünleri yüksek sıcaklık ve basınçta kür edilir. Kürleyicilerin ve hızlandırıcıların eklenmesi, polimer zincirleri arasında çapraz bağlar oluşturur. Çapraz

bağların ağı, genellikle çekme dayanımı, basınç dayanımı ve uzama gibi fiziksel özellikleri belirler. Dolgu maddeleri, kauçuk teknolojisinde büyük bir rol oynar. Karbon siyahı ve silika dolgular, sertliği, aşınma direncini, çekme özelliklerini ve yırtılma dayanıklılığını artırabilir. Titanyum dioksit ve baryum sülfat gibi siyah olmayan dolgular, parça tanımlaması için pigment özellikleri sağlayabilir ve güçlü oksitleyici ortamlarda daha iyi stabilite sunabilir. Ancak, dolgu maddelerinin kullanımıyla viskoelastik tepki ve histeretik kayıplar büyük ölçüde artar. Bir elastomerin fiziksel özellikleri, özellikle sıcaklık değişiklikleri nedeniyle test koşullarıyla değişir.

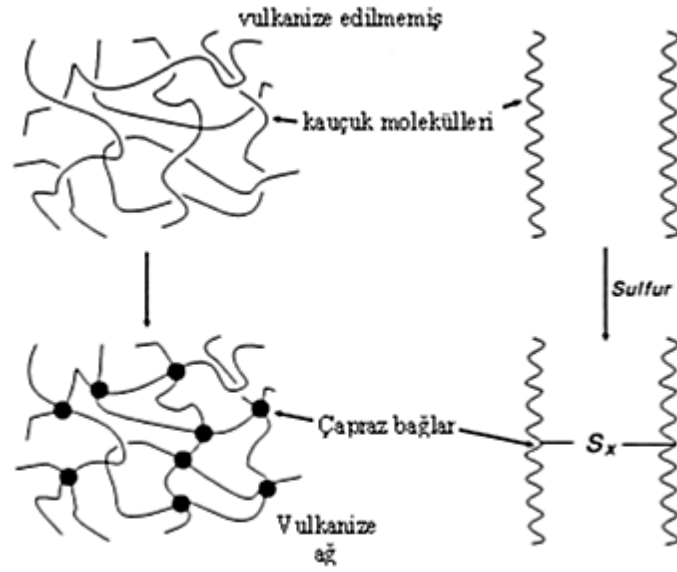
1.4 Doğal Kauçuk

1.4.1 Genel bilgiler

Doğal kauçuk ticari olarak *Hevea brasiliensis* ağacının lateksinden üretilir. Doğal kauçuğun kaynağı, kauçuk içeren çok küçük parçacıklar içeren bir süspansiyon olan latekstir. Sıvı lateks ağaçlardan toplanır ve bir işleme merkezine götürülür, burada sıvı lateks %15 kauçuk içeriğine seyreltilir ve formik asit ile pıhtılaştırılır. Pıhtılaşan malzeme daha sonra suyun uzaklaştırılması ve bir levha malzeme üretilmesi için silindirler aracılığıyla sıkıştırılır. Levhalar genellikle sıcak hava akımları veya duman ateşinin ısıtmasıyla kurutulur. Rulo halindeki levhalar ve diğer çeşitli ham kauçuklar genellikle uzun polimer zincirlerinin bir kısmını kıran ve ortalama moleküler ağırlıklarını azaltan ağır silindirler arasında öğütülür. 1980'de doğal kauçuk üretimi dünya kauçuk pazarının yaklaşık %30'unu oluşturuyordu. Doğal kauçuk genellikle küçük miktarlarda protein, lipidler, inorganik tuzlar ve birçok diğer bileşenle karışmış cis-1, 4 poliisopren olan, ortalama moleküler ağırlığı yaklaşık 500000 g/mol olan birincil olarak cis-1, 4 poliisopren ile karışık halde bulunur. Doğal kauçuk polimer zincirleri uzun, birbirine dolanmış ve oda sıcaklığında kıvrılmış durumdadır ve sürekli bir hareket içindedir.

1.4.2 Doğal kauçuğun vulkanizasyonu

Tabii kauçuk ile diğer elastomerlerin birbirlerine çapraz bağlanması sürecine vulkanizasyon denmektedir. Vulkanizasyon öncesi yüksek plastik özellikler sergileyen kauçuk, vulkanizasyon sonrası yerini geri dönüşümsüz olarak, yüksek elastik özelliklere bırakır. Şekil 1.1'de çapraz bağlanma reaksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Polimerde meydana gelen çapraz bağlanma (Coşkun, 2004).

Doğal kauçuğun çekme dayanımı, bu işlemle artırılır. Bu kimyasal fenomen sonucunda polimer molekülleri, moleküler hareketi sınırlamak için çapraz bağlarla bir araya getirilmiş olur. 1839'da Charles Goodyear kükürtleşme sürecini kauçuk için sülfür ve bazik kurşun karbonat kullanarak keşfetti. "Vulcan" kelimesi ateşin Roma tanrısını ifade eder. Goodyear, doğal kauçuk, sülfür ve kurşun karbonat karışımının ısıtıldığında, kauçuk termoplastik bir halinden elastomerik bir malzemeye dönüştüğünü keşfetti. Bugün bile, kauçukla sülfürün reaksiyonu karmaşıktır ve tam olarak anlaşılmamıştır. Kauçuk ve sülfür, yüksek sıcaklıklarda bile çok yavaş bir şekilde tepkimeye girer. Yüksek sıcaklıklarda kürlenme süresini kısaltmak için, kauçukla birlikte akseleratör kimyasallar genellikle dolgu maddeleri, plastikleştiriciler ve antioksidanlar gibi diğer katkı maddeleri ile birleştirilir. Genellikle, vulkanize yumuşak kauçuklar yaklaşık %3 kükürt içerir ve vulkanizasyon veya kürlenme için 100 ila 200 °C aralığında ısıtılır. Kükürt içeriği arttıkça, oluşan çapraz bağlar da artar, daha sert ve daha az esnek bir malzeme meydana getirir. Yaklaşık %45 sülfürle tamamen sert bir kauçuk yapısı üretilebilir. Dolgu maddeleri kullanmak kauçuk ürünlerinin maliyetini düşürebilir ve malzemenin dayanıklılığını artırabilir. Karbon siyahı, kauçuk için bir dolgu maddesi olarak yaygın olarak kullanılır, karbon siyahının partikül boyutu ne kadar ince olursa, çekme dayanımı o kadar yüksek olur. Ayrıca, kauçuğun yırtılma

ve aşınma direncini artırır. Kalsiyum silikat ve kimyasal olarak değiştirilmiş kil gibi silika, kauçuğu takviye etmek için dolgu maddeleri olarak kullanılır.

1.4.3 Doğal kauçuğun özellikleri

Doğal kauçuk yüksek dayanıklılığı, yorulma direnci ile birleştirir. Mükemmel yeşil dayanıklılığı ve yapışma özelliğine sahiptir, bu da kendine ve diğer malzemelere yapışma yeteneğine sahiptir ve bu da işlenmeyi kolaylaştırır. Sıcaklık, ışık ve ozon tarafından çevresel hasara karşı orta direnç gösterir, bu da dezavantajlarından biridir. Doğal kauçuğun pirinç kaplamalı çelik tel ile mükemmel yapışma özelliği vardır, bu da lastiklerde idealdir. Düşük histerezis nedeniyle düşük ısı üretimi, lastiğin bütünlüğünün korunmasına katkı sağlar ve servis ömrünü uzatır. Doğal kauçuk, düşük yuvarlanma direncine sahiptir ve yakıt ekonomisini artırır. Kesme, çatlama ve yırtılma direnci yüksektir.

1.4.4 Doğal kauçuğun avantajları

Doğal kauçuk suya mükemmel bir bariyer oluşturur. Bu muhtemelen patojenlere karşı en iyi engeldir, bu nedenle lateks cerrahide cerrahi eldiven olarak kullanılır. Mükemmel bir yay malzemesidir. Doğal kauçuk lateksi ayrıca kateterler, balonlar, medikal tüpler, elastik ipliklerde ve bazı yapıştırıcılarda kullanılır. Otomotiv endüstrisi tarafından kullanılan rayon harici tek ham maddedir. Kauçuk lateks eldesinde herhangi bir sebeple faydalanılmayan ağaçlar kesilerek ahşap eldesinde ya da yakacak olarak değerlendirilirler.

1.5 Kauçuk Parça İmalatında Kullanılan Prosesler

Lateks konsantresinden ve kuru kauçuktan kauçuk ürünlerinin imalatı tamamen farklıdır, her ikisi de şekillendirme, vulkanizasyon ve bazı şekillendirme işlemleri her iki malzeme için ortaktır. Genel olarak, lateks ve kuru kauçuk endüstrileri tamamen farklıdır. Bu bölüm tamamen kuru kauçuk işlemine atıfta bulunur. Kauçuk ürünlerinin imalatı üç ana süreç gerektirir:

- Karıştırma
- Şekillendirme
- Vulkanizasyon

1.5.1 Kauçuk hammaddenin karıştırılması

Karıştırma işlemi genellikle dakikada 100 kg harmanı işleyebilen ağır iç karıştırıcılarda gerçekleştirilir. Bu sürecin iki işlevi vardır: ilk olarak, kauçuğu yumuşatmak, genellikle mastikasyon (çiğneme) olarak bilinir ve ikincisi, kauçuk ile dolgu maddeleri, vulkanizasyon ajanları, koruyucu ajanlar ve diğer sentetik kauçuklarla karıştırma aşamasıdır. Bu teknik karıştırmadır. Karıştırmadan sonra, karıştırılmış kauçuk plastik hale gelir ve şimdi şekillendirilmeye hazırdır. Bu çeşitli yollarla yapılır ve genellikle yüksek sıcaklıkta kimyasal bir tepkimeye giren ve plastik halinden güçlü, yüksek elastik bir malzemeye dönüşen vulkanizasyon ile birleştirilir.

1.5.2 Kauçuğun şekillendirilmesi

En yaygın işlem, vulkanizasyonun gerçekleştiği ısıtılmış bir kalıpta basınç altında kalıplama işlemidir. Sürecin üç önemli varyantı vardır: sıkıştırma, transfer ve enjeksiyon kalıplama. Diğer önemli şekillendirme teknikleri arasında ekstrüzyon ve kalenderleme bulunur. Kauçuğun metal veya termoplastik veya cam kumaşa bağlanması genellikle kalıplama sürecinin bir parçası olarak gerçekleşir. Metal bileşeni temizlemek ve bağlayıcı bir madde uygulamak için ön işleme gerekecektir.

1.5.2.1 Kompresyon kalıplama

Uygun ağırlıkta bir kalıpta ısılı pres içinde bir kauçuk parçası şekillendirilir. Kauçuktan yapılan çoğu ürün bu süreçle yapılır. Avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ucuz
- Hızlı
- Uzun veya kısa işletmelere uygun
- Diğer yöntemler kadar olmasa da nispeten hassas üretime uygundur.

Yüksek üretim hızları, iki ayrı kalıp setini sırayla kullanarak minimum süre zarfında işlem sağlayan preslerde mümkündür. Kalıba girecek kauçuk miktarının tam olarak tespit edilmesi gerekliliği ve buna bağlı devreye alma süreçlerinin uzun olması dezavantajıdır.

1.5.2.2 Transfer kalıplama

Bir kauçuk bileşiği yassı kalıba yerleştirilir. Pres içine yerleştirildiğinde, kauçuk ikinci kalıp içine doldurulmak üzere küçük bir açıklıktan sıkıştırılır, burada kauçuk vulkanize olur. Bu yöntem, maliyetli kalıp maliyetini ve nispeten yavaş üretimi haklı çıkaran hassas çalışmalar için kullanılır. Kısa işletmeler mümkündür ve bu yöntem, mühendislik bileşenleri gibi metal takviyeli parçalar için özellikle kullanışlıdır.

1.5.2.3 Enjeksiyon kalıplama

Kauçuğun ısıtılarak kovan-vida mekanizmasında hem ısı hem mekanik etkilerle eriyik hale getirilerek pistonla bağlı meme aracılığıyla dışarı çıkarıldığı yarı sürekli bir süreçtir. Pistonun kalıp içine ekstrüzyon için yaptığı basınç, kauçuğun vulkanizasyonunun gerçekleştiği ısıtılmış bir kalıba zorlanmadan önce daha fazla sıcaklık artışı sağlar. Kauçuk yüksek sıcaklıkta kalıba ulaştığı için, vulkanizasyon süreleri kısadır ve kalın parçalar homojen olarak vulkanize edilir. Yüksek sermaye maliyeti, kaliteli ürün hedefleyen işletmeler için makinanın kullanımını anlamlı kılar, özellikle sıkıştırma kalıplama ile şekillendirilmesi zor olan ürünler için tercih edilir.

1.5.2.4 Ekstrüzyon

Ekstrüzyon sırasında hazırlanmış kauçuk, uygun şekilde şekillendirilmiş bir kalıptan kısa bir vida ekstruderinden geçirilir. Vulkanizasyon ayrı bir süreçtir ve çeşitli yollarla gerçekleştirilebilir:

- buharlı veya hava otoklavında parti olarak sürekli olarak buhar
- sıcak hava içinde
- eritik metal tuzlarının bir karışımını içeren bir banyoda veya bir sıvı yatağında.

Basit veya karmaşık kesitler, sert ya da süneklüğünden bağımsız olarak, ekstrüde edilebilir. Ekstrüzyon genel olarak hortum, otomobiller için hava contaları ve kabloların imalatında kullanılır.

1.5.2.5 Kalenderleme

Belirli kalınlıkta kauçuk levha üretmek için veya kauçuğu tekstil, metal tel gibi başka malzemelerle birleştirerek kompozit yapılar üretmek için kullanılır. Kalenderleme işlemi sırasında kauçuk, üç veya dört rulo kalenderden geçirilerek istenen kalınlığa gelir ve varsa diğer malzemelerle bir araya getirmek adına sıkıştırılır. Kauçuğun bir nevi haddelenmesidir. Kalenderleme sonrasında sıklıkla vulkanizasyon işlemi ısıtılmış preslerde veya otoklavda gerçekleştirilir.

1.6 Şaft Askı Lastiği

Kardan mili, torqu şanzıman dişli kutusundan aks diferansiyel dişli kutusuna iletmek için kullanılan dönen bir montajdır. Kardan mili, şanzıman ile aks arasındaki sürekli değişen açıları geçiş yaparak çalışmalıdır. Ayrıca, tork iletimi yaparken uzunluğunu değiştirebilme kapasitesine sahip olmalıdır. Bunun sağlanması, kardan milinin farklı açılarda çalışmasına izin veren kardan mafsalları ve aksın büzülmesine ve genişlemesine izin veren kaymalı mafsallar aracılığıyla gerçekleştirilir. Merkezi veya taşıyıcı rulmanlar, uzun kardan millerini desteklemek ve gücün aksa düzgün bir şekilde iletilmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Araçlarda kullanılan askı lastikleri, rulman yuvasının kauçukla kaplı olduğu bir yapıda küresel rulmanlar kullanır; ayrıca dıştaki braket, askı lastiğini şasiye civata ve somun montajıyla sabitler. Şekil 1.2’de, uçlarında iki kardan mafsallı bulunan bir kardan milini ve ortada iki kardan milini birleştiren bir askı lastiği montajı gösterilmektedir.

Şaft askı lastiği, kardan milinin bilye rulmanını desteklemek için şasiye sabitlenir. Kötü çalışma koşullarının neden olduğu şok yüklerini merkezi brakete azaltmak için, bilye rulmanı ile merkezi braket arasına kauçuk yatak yerleştirilir. Kauçuk yatağın doğası gereği son derece elastik olması nedeniyle, brakete gelen zorlayıcı yükler braketi esnettikten sonra braket ve kauçuk orijinal haline gelir, böylece lastik yatak, bilye rulmanı ve braket üzerindeki yükü en aza indirir.



Şekil 1.2: Kardan miline bağlı şaft askı lastiği.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Kauçuk malzemeler, özellikle tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan çeşitli mühendislik uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır. Kauçuğun yorulma özelliklerini anlamak, ürün performansını ve dayanıklılığını öngörmek, kaliteyi ve emniyeti garanti etmek için hayati önem taşır.

Kauçuk yorulma testi cihazları, kauçuğun tekrarlayan stresle başa çıkma şeklini test etmek için kullanılan makinelerdir. Kauçuğu sabitlemek için sağlam bir çerçeveye, gerilmeyi uygulamak için aktüatörlere ve bunu ölçmek için sensörlere sahiptirler. Kontrol sistemi, gerilme seviyelerini ayarlar, verileri kaydeder. Bazı cihazlar farklı ortamları (sıcaklık, frekans, ...) taklit edebilir. Bu cihazlar, kauçuk ürünlerin kalite standartlarını karşıladığından ve parçalar gerçek koşullarda kullanıldığında istenen ömür dayanımına sahip olmasını sağlar. Kauçuk ömrü; malzeme özellikleri, çevresel faktörler, yükleme koşulları, yükleme geçmişi, parça geometrisi, imalat süreçleri, işletme koşulları ve yaşlanma etkileri gibi birçok faktörün kombinasyonuna bağlıdır. Tüm bu faktörlerin takip edilerek kauçuk yorulma davranışının incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle test cihazları belli başlı karakteristiklere, birbirine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu senaryolara sahiptir. Bu farklılıklara; test edilebilen sıcaklık aralığı, frekans aralığı, yükleme tipleri, ölçüm hassasiyetleri, parça boyutları vb. birçok etken örnek verilebilir.

Yorulma testi genellikle kauçuk test örneklerini tekrarlanan gerilme deformasyonlarına maruz bırakarak hasar görene kadar geçen ömrü belirlemeyi içerir. Gerilme oranı (R), her yüklemeli tekrar sırasında minimum gerilme ile maksimum gerilme arasındaki oranı temsil eden kritik bir parametredir. Yükleme koşulunu belirten R değeri, $R = 0$ (0 ile F kuvveti çevrimi) ve $R = -1$ (-F ile F kuvveti çevrimi) gibi, yorulma testinde önemli rol oynar.

R = 0 yükleme tipi, malzemenin sadece salt basma ya da çekmeye maruz kaldığını belirtir. ISO 6943:2017 ve ASTM D4482 standartları R = 0 koşullarına odaklanarak ömür performansını tayin eder.

R = -1 yükleme tipi, malzemenin gerilme ve sıkışma miktarının eşit olduğu anlamına gelir ve bu da ortalama gerilmenin sıfır olduğu anlamına gelir. Yani parçanın, simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kaldığı durumları belirtir. Bu çalışmada da ömrü boyunca bası-çekme gerilme çevrimlerine maruz kalan parçaların ömür performansları; bu çevrimleri simüle edebilen test cihazıyla tahmin edilmeye ve doğrulanmaya çalışılmıştır.

2.2 Bulgular

Yorulma testi, kauçuk malzemenin performansı hakkında değerli bilgiler sağlasa da standart test sonuçlarını gerçek hizmet koşullarıyla ilişkilendirmede zorluklar bulunmaktadır. Farklı vulkanizatların karşılaştırmalı yorulma direnci, test koşullarındaki varyasyonlar ve sonuç karşılaştırmalarının temeli gibi faktörler dikkatlice ele alınmalıdır. Svensson'un çalışması, uygun test koşullarını seçme ve sonuçları dikkatlice yorumlama önemini vurgular. Bunun yanında gerilme oranı, test koşullarındaki değişkenlikler, kauçuk hammaddedeki üretimden kaynaklı ve hammaddenin proses parametrelerindeki sapmalar, R = 0 ve R = -1 gibi farklı yükleme koşulları, yorulma özelliklerini tespit ederken belirsizliklere etki eden unsurlardan sadece birkaçıdır. Çalışma, farklı kütleme sistemlerine sahip dört farklı doğal kauçuk vulkanizatı içermekte ve bunların tekrarlı yük altındaki yorulma ömürlerini hem gerilme hem de kayma durumlarında karşılaştırmaktadır. Svensson'ın bulguları, hizmet ömrünü ön görmekte gerilme testlerinin önemini vurgular ve gevşeme testlerinin gevşemeyen testlere göre daha etkili olduğunu ortaya koyar.

Hulme ve Cooper, çalışmalarında polimerlerin petrol ve gaz uygulamalarında yorulma verilerinin oluşturulmasına odaklanmaktadır. Çalışma, yorulma ömrünü öngörmek için çeşitli modelleri, çatlak oluşumu ve çatlak büyüme yaklaşımlarını içermektedir. Makale, standart test yöntemlerinin sınırlarını ele alırken, özel iş ihtiyaçlarına uygun özel testlere olan ihtiyacı vurgular. Sabit yük veya deplasman koşulları altında yorulma

testi metodolojileri anlatılmış, testlerin malzemenin işletme ortamında yapılmasının önemi vurgulanmıştır.

Ek olarak, C.S. Woo ve W.D. Kim'in çalışması, vulkanize doğal kauçuğun yorulma ömrünü tahmin etmek için bir metodoloji sunmaktadır. Araştırma, yorulma testlerinden elde edilen bir yorulma hasar parametresi ve sonlu eleman analizi içermekte olup, kauçuk motor takozlarının yorulma ömrünü başarıyla tahmin etmektedir. Bu metodoloji, kauçuk bileşenlerin erken tasarım aşamalarında yorulma ömrünü tahmin etmede etkili olup, otomotiv uygulamalarındaki kauçuk malzemelerin dayanıklılığına dair değerli bilgiler sunmaktadır.

Gehrmann ve arkadaşları çalışmalarında, sürekli uçtan uca deplasman tekrarlarına maruz kalan dolgulu kauçuk test parçalarının tekrarlı deformasyon davranışını araştırmaktadır. Çalışma, yerel gerilmelerin malzeme özellikleri, deplasman genlikleri ve geometrik faktörlere bağlı olarak değiştiğini vurgular. Araştırma, mühendislik bileşenlerindeki gerilme evrimini doğru bir şekilde tahmin etmek için gelişmiş malzeme modelleri ve Sonlu Eleman Analizi'nin (FEA) gerekliliğini vurgular. Literatür taraması, araştırmayı kauçuktaki yorulma analizinin tarihçesi, malzeme modelleme yaklaşımları ve örnek geometrisinin gerilme dağılımına etkisi bağlamında konumlandırır. Genel olarak, çalışma, dolgulu kauçuk malzemelerde lokal gerilmeler ile tekrarlı yüklenme arasındaki nüanslı ilişkiye dair değerli bilgiler sunmaktadır.

Xingwen Qiu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kauçuk malzemelerin ömür dayanımında rol oynayan mikro düzeydeki mekanik ve ısıl etkiler incelenmiştir. Parça içerisindeki kusurlar sebebiyle stres konsantrasyonu oluşur ve bu moleküler zincirlerin kırılmasıyla yorulma hasarı için ilk çentik oluşur. Vulkanizasyon sırasında oluşan üç boyutlu çapraz bağlı ağ malzemenin hasara rağmen yük taşıma yeteneğine katkı sağlar. Sıcaklık, kimyasal reaksiyonlar ve dolgu maddelerinin kauçuk matristeki dağılımı, ömür dayanımı açısından kritik rol oynar. Çalışma, Mullins etkisi (malzemenin maruz kaldığı maks gerinim geçmişi), uzama hızı ve gerilme oranı ve sıcaklık gibi faktörleri içeren bir yorulma tahmin modeli oluşturarak; parçaların ömür dayanımını gerçeğe en yakın tahmin etmeye çalışmıştır.

Qian Li ve arkadaşlarının çalışmasında, titreşim izolasyonu için araçlarda önemli bir bileşen olan kauçuk bağlantının ömür dayanımı incelenmiştir. Araştırmacılar, sonlu eleman analizlerini (SEA) malzeme özellik testleri ile doğrularak farklı yükler

altındaki yorgun ömürleri tahmin etmek için güvenilir bir yöntem geliştirmeyi amaçlamaktadır. Doğal kauçuğun hiperelastik modeli ve yorulma özellikleri ele alınmıştır. Makalede SEA ile çatlaklara eğilimli kritik alanlar belirlenmiştir ve maksimum toplam ana gerilmeler ömür dayanım parametresi olarak maksimum asal gerilme değerinden formülize edilmeye çalışılmıştır. Malzeme testlerinden elde edilen ömür dayanımı denklemi, SEA sonuçlarıyla numune malzeme testlerine entegre edilerek ömür dayanımı tespit etme çalışması gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda asal gerilmelerin ömür dayanımı hesaplamalarında uygun bir girdi olabileceği sonucuna varılmıştır. Sadece ham malzeme test sonuçlarından faydalanarak kauçuk parçaların mühendislik ve tasarım çalışmalarında maliyet ve zamandan tasarruf sağlanır.

Wen-Bin Shangguan ve arkadaşlarının makalesinde, tek eksenli gerilme altındaki kauçuk malzemelerin ömür dayanımı modellemesinde Green–Lagrange gerilmesi de dahil olmak üzere çeşitli gerilme tabanlı hasar parametrelerini inceleyerek bu parametrelerin gerilme enerjisi yoğunluğunun ömür tahmininde kullanılarak oluşturulan modellerin etkinliğini incelemiştir. Çalışma, farklı gerilme ve enerji parametrelerinden isabetli hasar modelleri oluşturulabileceğini gösterirken farklı numune geometrileri üzerinde testler yapılarak bu modellerin universal olarak kullanılabilir olması için de doğrulama yapılmıştır. Standart dambıl numune (STS) geliştirilen yorulma ömrü modelleri, dambıl silindirik (DCS) ve boş silindirik (HCS) şeklinde farklı geometrilere sahip numunelerde de başarılı olduğu ve genel geçer formül olduğu doğrulanmıştır.

R.K. Luo ve W.X. Wu çalışmasında titreşimi önlemek için kullanılan kauçuk takozların yorulma analizi üzerine bir makaleyi tartışmakta, çalışmanın ana amacı kauçuk takozlarını sonlu eleman analizi aracılığıyla optimize ederek ömür dayanımını artırmaktır. Çalışma özelinde kullanılan takoz, metacone tipi denen iki metal plaka arasında ek ara plaka da içeren; bu 3 plakaya bağlı vulkanize kauçuk bulunan takoz tipidir. Kauçuk yayın ve arayüzünün ayrıntılı sonlu eleman modelini sunar, gerçek dünya koşullarını simüle etmek için aksiyal dinamik yükler uygular. Simülasyonlar yarı-statik gerçekleştirilmiştir. Ömür dayanımı analizlerinin sonuçları optimize edilmemiş tasarım için görüldükten sonra sistemde başka parametreler göz önüne alınmadan sadece ömür arttırımı sağlamak için basit 2 değişiklik yapılarak ömür dayanımının arttırıldığı görülmüştür. Bu değişiklikler; ara metalin kaldırılması ve

kauçuğun sertliğinin artırılmasıdır. Çalışma sonucunda, yarı-statik simülasyonların tasarım ve test için etkili olduğunu ve ömür dayanım profillerini görselleştirmenin potansiyel optimizasyonlar için kullanılmasını önermektedir.

M.S.A. Samad ve arkadaşları otomotiv taşıtlarında titreşimleri sönümleyen kauçuk parçalardan otomobil jant tamponlarının dayanıklılığını incelemiştir. Bu bileşenlerin uzun süreli kullanıma karşı nasıl dayandığını anlamak için sonlu eleman analizi (SEA) ve ömür dayanımı incelemesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, SEA'nin çatlakların nerede başlayabileceğini tahmin etmede etkili olduğunu ancak genel ömür dayanımını doğru bir şekilde tahmin etme konusunda zorluklarla karşılaşmıştır. Muhtemel sebep olarak çalışma için üretilen malzeme kompozisyonundaki kalsiyum karbonatın referans alınan makaledeki numuneden farklı olması gösterilmiştir. Makalede, ömür dayanımının nasıl etkilediğini daha iyi anlamak için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Xingwen Qiu ve arkadaşlarının literatür taraması ise, kauçuk malzemelerin ömür dayanımı davranışı ve bu bağlamda etkileyen kriterleri yani çatlak oluşumunu ve yayılmasını, mikro-seksiyon analizini kapsamaktadır. Ömür dayanım süresini tahmin etmek için kullanılan bir model olan “Miner” hasar kriteri tanıtılarak uygulanabilirliği tartışılmıştır. Ömür dayanımı çatlak ilerleme durumunun iki aşamada incelenebileceğini; bunların ilk olarak mikro düzeyde çatlaklar oluşumu olduğunu, ikinci olarak oluşan bu mikro çatlakların malzemedeki kusurlu ya da homojen olmayan kısımlarından faydalanarak ilerlemesi olarak ele alınabileceğini belirtmektedir ve bu alanda yapılan çalışmalara ait bilgi sunmaktadır. Mekanik koşullar, kauçuk bileşimi ve çevresel faktörler gibi kauçuk malzemelerin ömür dayanımını etkileyen faktörlere ve etkilerine değinilmiştir. Geliştirmeye ihtiyaç duyulan başlıca konular olarak yeni yaşlandırma modelleri, sıcaklığın etkisinin matematiksel modellere entegre edilebilmesi ve standartlaştırılmış testlere olan ihtiyaç gösterilmektedir. Çeşitli çalışmalardan elde edilen bulguları tek bir yerde özetleyen bu makale, kauçuk alanındaki ömür dayanımı araştırmaları için kapsamlı bir referanstır.

Otomotiv mühendisliği alanında, kauçuk bileşenli parçaların, özellikle motor takozları gibi sürüş kalitesi ve konforda önemli bir role sahip parçalarda, ömür dayanımını sağlamak kritiktir. Geleneksel olarak, bu bileşenlerin ömürlerini değerlendirmek zaman alıcı testleri içerdiği için daha etkili ve kısa süren yöntemlere doğru bir arayış vardır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, malzeme karakterizasyonu ve sonlu eleman

analizi gibi gelişmiş tekniklerin kullanılmasını içermektedir. Bu yaklaşım, fiziksel prototipler üretilmeden önce yorulma ömrünü tahmin etmeye yardımcı olur. W.D. Kim ve arkadaşları çalışmalarında deneyler ve simülasyonlardan elde edilen maksimum Green–Lagrange deformasyonu ve maksimum gerilme enerjisi yoğunluğu gibi parametreleri kullanılarak ömür tahmini yapmıştır. Malzemenin bu parametrelere göre ömrünü bir kere tespit ettikten sonra numuneleri geometri değiştiğinde tekrar etmeden ömür performansını hesaplamayı önermiştir. Çalışması sonucunda ömür dayanımı modellemelerinde Green-Lagrange geriniminin başarıyla kullanılabilir bir değişken olduğunu tespit etmiştir ancak üretim sırasında oluşan malzeme özelliklerindeki ve proseslerdeki sapmaları hesaba katmanın zorlukları devam etmektedir.

Abdullah Mohammed ve arkadaşları kauçuk malzemenin tekrarlayan gerilmeye tepkisini anlamının önemine ve mühendislik uygulamalarındaki yaygın kullanımına dikkat çekmiş, mevcut test cihazlarının karmaşıklıklarını vurgulayarak daha basit bir tasarımın gerekliliğini öne sürmüştür. Yaptıkları literatür taramasına göre cihazlar ya çok kompleks sistemler içerdikleri için pahalı ve bakımı zorlu ya da belli test koşullarını gerçekleştirilememektedir. Kauçuk yorulma davranışını incelemek için tasarlanmış yeni ve verimli bir test cihazı önerilmektedir. Bu cihaz çok yönlü rig, çekme, basma ve çekme-basma gerilme koşulları altında yorulma testleri gerçekleştirilebilmektedir. Cihaz, mekanik yükleme, genlik ve frekans gibi yorulmayı etkileyen faktörleri incelemeye imkân tanır. Deneylerde belirli bir kauçuk türünden yapılmış makara şeklinde numune örnekleri, kopana kadar tekrarlı yüklemeye maruz bırakılır ve kopma için gerekli olan tekrar sayısı kaydedilir. Sonuçlar, gerilme ile tekrar sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren bir S-N eğrisini içerir ve frekansın yorulma davranışı üzerindeki etkisini gösterir. Test düzeneğinin tekrarlanabilirliği, farklı koşullar altında yapılan testlerle gösterilmiştir ve cihazın güvenilirliği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, tanıtılan test düzeneği, mevcut cihazlara kıyasla basitlik ve verimlilik sunarak kauçuk yorulma davranışının incelenmesi için değerli bir araç olarak kanıtlanmıştır. Ancak bu test cihazı, çalışmada kullanılanlara benzer basit yapıdaki numuneleri test edebilecek kapasiteye sahiptir. Örneğin; endüstride kullanılan herhangi bir otomotiv parçasını, rastgele yol verisi ile test edemeyecek düzeydedir.

Saddam K Al-Raheem ve arkadaşlarının "Design and Construction of Device for Rubber Material Fatigue Test" makalesi de "Design of Rubber Fatigue Behaviour Test Rig" çalışmasına benzer şekilde kauçuk malzemelerin yorulma testinin yeni

geliştirilmiş bir cihazla gerçekleştirilmesine odaklanmaktadır. Bu cihazın en belirgin özelliği; rulmanla yataklanmış, şafta iç içe geçmiş, eksantrikliğe sahip küçük ve büyük burçtan bir mekanizma yardımıyla yorulma yüklerinin sinüs dalgası profili şeklinde uygulanabilmesidir. Büyük burcun, küçük burç üstünde döndürülmesiyle eksantriklik değerine göre sistemin hareket miktarı ve maruz kalacağı yükler değiştirilebilmektedir. İmal edilen cihazda gerçekleştirilen ömür testleri sonucunda parçaların hep aynı hata modunu gösterdiği, cihazın tekrarlanabilirlik yönünden başarılı olduğu sonucuna varılırken, ölçülen zamana bağlı kuvvet değerinden istenen sinüs profili sağladığı doğrulanmıştır.

W.V. Mars ve A. Fatemi ise doldurulmuş doğal kauçuk malzemenin yorulma davranışına odaklanarak yorgunluğu etkileyen faktörleri, özellikle malzemenin bileşimi, yükleme geçmişi ve çevresel etkileri üzerinde durmuştur. Araştırma, gerçekçi koşulları simüle etmek amacıyla kauçuk numuneler üzerinde aksel ve burulma yüklemeleri ve bunların kombinasyonlarını içeren deneyleri de kapsamaktadır. Ana bulgular, dolgulu kauçuk karışımlarının yüke bağlı kalıcı yumuşama özelliği gösterdiği ve kauçuğun sürekli yüklendiği durumda yumuşamasının bir yüklü bir yüksüz olduğu duruma göre arttığıdır. Çalışma, çatlak oluşumu ve büyümesine odaklanarak, şekil değiştirme geçmişi ve Mullins etkisini ortaya koymaktadır. Maksimum asal gerilme ile çatlak büyüme hızları arasındaki ilişki incelenerek aralarında doğru orantılı ilişki bulunmuştur ve tüm farklı yükleme koşulları için nispeten iyi bir uyum gösterdiği belirtilmektedir. Bunun yanı sıra numunelerin ömrünün üçte birinde çevrim boyunca genellikle çatlak oluşumu gözlemlenmediği, geri kalan üçte ikisinde ise çatlak oluşumunun başladığı ve yayıldığı gözlemlenmiştir. Numunelerde maksimum yük kadar minimum yükün de kritik olduğu tespit edilmiştir. $R = 0$ (0 ile F kuvveti arasında çevrim yapan yükleme profili) yükleme tipinin numune ömrünü, $R = -1$ (-F ile F kuvveti arasında çevrim yapan yükleme profili) profiline nazaran kauçuğun ömrünü kısalttığı gözlemlenmiştir.



3. KAUÇUK MALZEME NUMUNE ÖMÜR TESTLERİ VE ANALİZİ

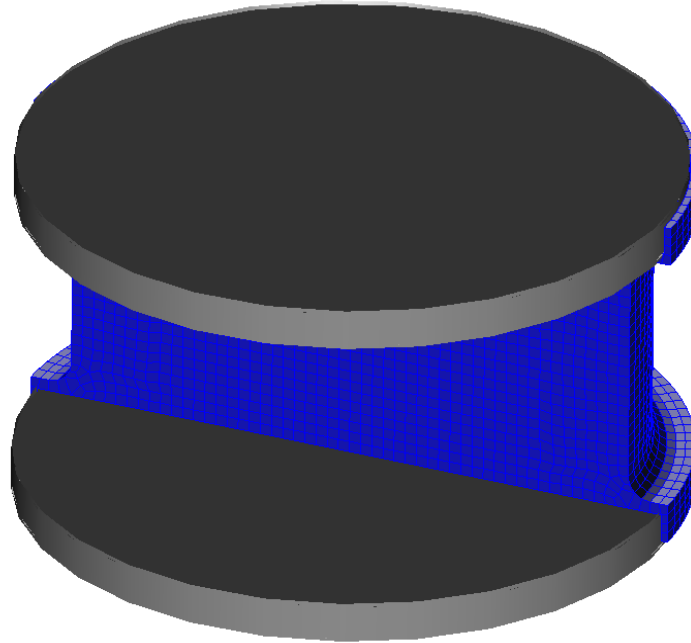
3.1 Numune Sonlu Elemanlar Analizi

Bu çalışmanın amacı çekme ve basma gerilmesi uygulayarak ömür testi yapan bir cihazda 10°, 20°, 30°, 45° açıyla bağlanan standart takozlarda farklı bağlantı açılarındaki numunelerin kauçuk malzemesinde oluşan gerinim değerlerini saptamaktır.

Şekil 3.1’de çalışmada referans alınacak NR kauçuğun ömür performansını tespit etmek amacıyla kullanılan takoz numunelerine ait katı model verilmiştir. Çizelge 3.1’de numune test takozları için oluşturulan analiz modeline ait ağ yapısı görülmektedir.

Çizelge 3.1: Ömür test takozu ağ yapısı modelleme parametreleri.

Parametre	Değer
Eleman tipi	Altıyüzlü 3D eleman
Eleman boyutu	Ort. 1 mm x 1 mm x 1mm
Eleman adedi	29056



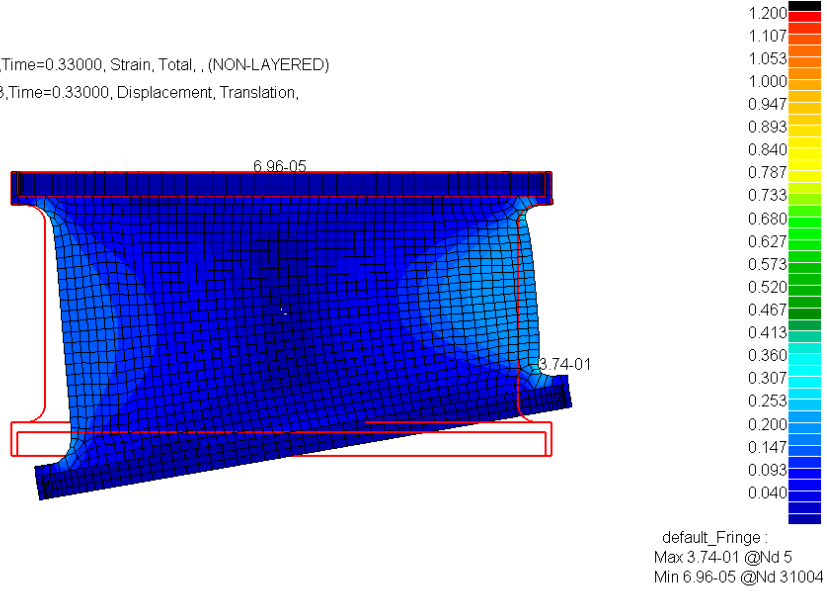
Şekil 3.1: Kauçuk ömür testi takozu numunesi geometrisi.

10°, 20°, 30° açılarla ağ yapısı oluşturularak modellenen test takozları sırasıyla Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

Patran 2019 21-Oct-19 16:16:18

Fringe: Default Static Step, A1:Incr=33,Time=0.33000, Strain, Total, ,(NON-LAYERED)

Deform: Default Static Step, A1:Incr=33,Time=0.33000, Displacement, Translation,

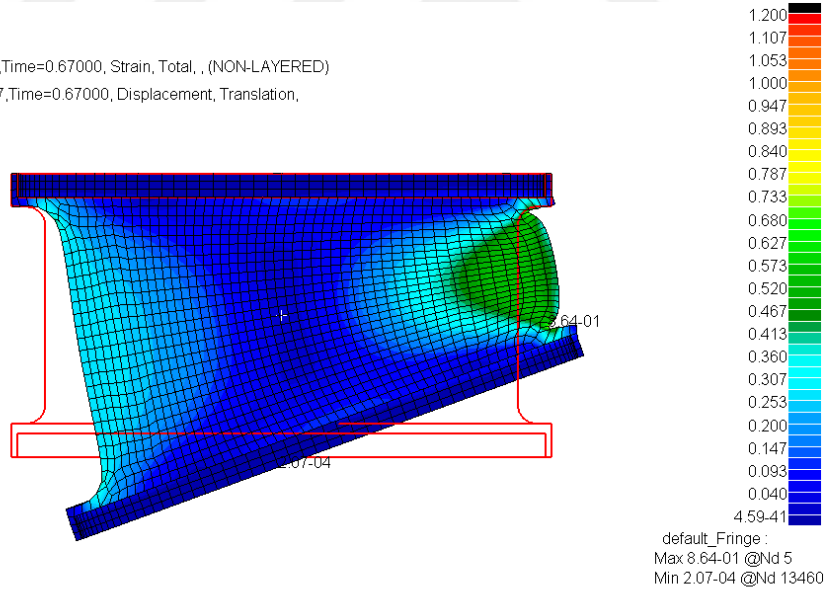


Şekil 3.2: 10° açılı konumlandırılmış kauçuk ömür testi takozu numunesi modeli.

Patran 2019 21-Oct-19 16:16:38

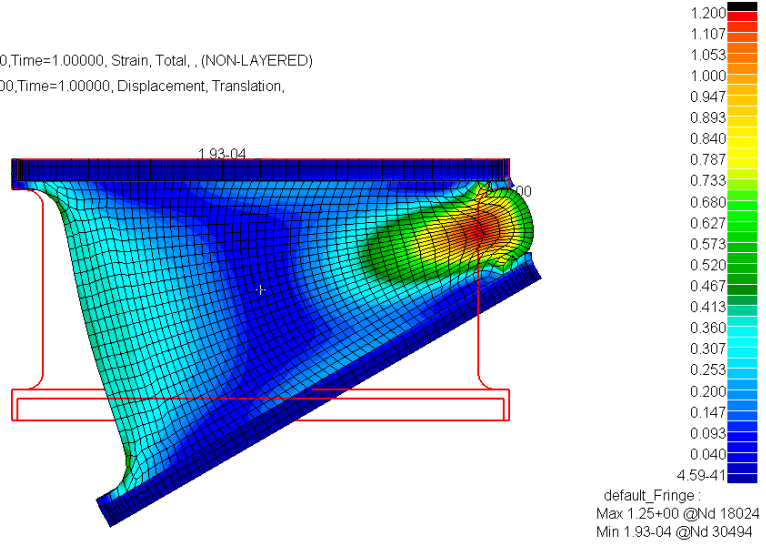
Fringe: Default Static Step, A1:Incr=67,Time=0.67000, Strain, Total, ,(NON-LAYERED)

Deform: Default Static Step, A1:Incr=67,Time=0.67000, Displacement, Translation,



Şekil 3.3: 20° açılı konumlandırılmış kauçuk ömür testi takozu numunesi modeli.

Patran 2019 21-Oct-19 16:17:38
 Fringe: Default Static Step, A1:Incr=100,Time=1.00000, Strain, Total, , (NON-LAYERED)
 Deform: Default Static Step, A1:Incr=100,Time=1.00000, Displacement, Translation,



Şekil 3.4: 30° açılı konumlandırılmış kauçuk ömür testi takozu numunesi modeli.

10°, 20°, 30°, 45° açılarla yerleştirilen takozların ekseninde dönerken maruz kaldığı basma ve çekme gerinimleri sonlu elemanlar analiziyle hesaplanmıştır. Analiz için 2 parametrelili Mooney-Rivlin modeli kullanılmıştır. 2 parametrelili Mooney-Rivlin denklem 3.1’de verilmiştir.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2 \quad (3.1)$$

Denklemden C_{10} katsayısı kauçuk doğrusal davranış karakteristiğini, C_{01} katsayısı parabolik davranış karakteristiğini tanımlayan katsayıdır. Kullanılan C_{01} katsayısı 0,16, C_{10} katsayısı ise 0,64’tür. Analizlerde sınır koşulu olarak takoz metallerinden biri sabit tutulurken, diğer metal ekseninde analizde incelenmek istenilen açı rotasyonu tanımlanmıştır. Test ve analiz parametrelerine dair karşılaştırmasına ek olarak analiz sınır koşulları Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2: Sonlu elemanlar analizi parametreleri ve testteki karşılıkları.

Parametre	Analiz Girdisi	Test Girdisi
Çelik Young modülü	210 GPa	-
Çelik yoğunluğu	7850 kg/m ³	-
Mooney-Rivlin C_{10} katsayısı	0,64	-
Mooney-Rivlin C_{01} katsayısı	0,16	-
Kauçuk-Çelik teması	Yapışık	Yapışık
1. plaka	Dönebilir	Dönebilir
2. plaka	Sabit	Sabit
Dönme açısı	10°, 20°, 30°, 45°	10°, 20°, 30°, 45°
Ortam sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
Frekans	Statik	10 Hz (600 rpm)

Analiz sonucunda elde edilen basma-çekme gerinimleri ve bu gerinimlerin toplamı sonucu ortaya çıkan mutlak gerinim değeri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3: Farklı açılarla yerleştirilen takozlarda okunan gerinim değerleri.

Karışım	Derece	Min. gerinim [%]	Maks. gerinim [%]	Mutlak gerinim [%]
NR	10°	-23	+17	40
NR	20°	-59	+30	89
NR	30°	-120	+41	161
NR	45°	-197	+62	259

Yukarıdaki tabloya dayanarak 10°, 20°, 30° ve 45° açılarla konumlandırılmış takozların sırasıyla yüzde 40, 89, 161 ve 259 asal gerinime maruz kalmasına denk olduğunu söyleyebiliriz. Bir sonraki aşamada bu gerinim değerlerinde numunelerin ömür performansı incelenecektir.

3.2 Test Takozlarının Ömür Testleri

10, 20, 30, 45 derece eğimli takozlarda oluşacak gerinim genlikleri tespit edilmiş idi. Bu eğimlerdeki test takozlarının ömür performansını ölçmek için test cihazında makara numuneler üzerinde ömür testi yapılmıştır. Şekil 3.5’te bu cihazda kullanılmak üzere üretilen takoz numunesi görülmektedir.



Şekil 3.5: Üretimden çıkan ömür testi test takozu.

Şekil 3.6’da testin gerçekleştirildiği basma-çekme gerilmesi ile ömür testi gerçekleştirebilen test cihazı, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de ise sırasıyla ömür testi gerçekleştirilmeye hazır açılı konumlandırılmış numune ve testten alınan ölçümlerin

incelenemediği kullanıcı arayüzü görülmektedir. Çizelge 3.4'te ömür takozu test cihazına ve testte kullanılan parametrelere ait bilgiler verilmiştir.



Şekil 3.6: Ömür testi test cihazı.

Çizelge 3.4: Ömür test takozu test cihazı özellikleri ve test parametreleri.

Özellik	Değer
Cihaz numune kapasitesi	6
Eş zamanlı test edilen numune sayısı	Her açı değeri için 6
Cihaz devir kapasitesi	1500 d/dk
Numune fikstürü açı değerleri	0, 10, 20, 30, 45°
Kullanılan açı değerleri	10, 20, 30, 45°
Dahili iklimlendirme kabini	Mevcut değil
Çevrim sayacı	Kuvvet kontrollü otomatik durma

Kauçuğun doğası ve işlenirken geçtiği proseslerdeki değişkenlikler nedeniyle, maliyetler de göz önünde bulundurularak, ömür testlerinde mümkün olduğunca fazla numune kullanılmalıdır. Ayrıca karışımın kullanılacağı sektöre göre; maruz kalacağı titreşim profili dikkate alınarak kauçuk parçaların test edilmesine mümkün olduğunca özen gösterilmelidir. Örneğin; yoldan gelen düşük frekansları sönmümesi beklenen bir elastomer parçanın yüksek devirlerde test edilmesi sonuçlardaki sapmayı arttıracaktır ancak milyonlarca çevrim gördüğü düşük gerinimler test maliyetleri ve süreleri açısından uygun değildir. Bu noktada optimum parametreler irdelenerek test frekanslarına karar verilmelidir.



Şekil 3.7: Ömür testi cihazı kullanıcı arayüzü.

Bu çalışmada her bir aç değeri için 6 farklı numune üzerinden ortalama alınmıştır. Ölçümler, belirsizliği yüzde 0,2'den daha düşük kuvvetölçerlerle gerçekleştirilmiştir. Kuvvetölçerin ölçüm belirsizliği raporu Çizelge 3.5'te, test sonuçları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.5: Ömür testi sisteminde kullanılan kuvvetölçerin ölçüm belirsizliği

Kuvvet Basam ağı [%]	Okunan Kuvvet [N]	Gerçek Kuvvet [N]	Doğruluk Sapması [%]	Tekrarla ma Sapması [%]	Sürünme Hatası [%]	Çözünür lük Hatası [%]	Ölçüm Belirsizli ği [%]
10	1500	1498,28	0,11	0,17			0,19
20	3000	2995,40	0,15	0,09			0,17
30	4500	4491,60	0,19	0,16			0,19
40	6000	5989,89	0,17	0,09			0,17
50	7500	7489,09	0,15	0,11			0,18
60	9000	8990,39	0,11	0,09	0,20	0,07	0,17
70	10500	10493,40	0,06	0,06			0,16
80	12000	11994,28	0,05	0,07			0,17
90	13500	13500,83	-0,01	0,01			0,16
100	15000	15014,33	-0,10	0,02			0,16

Çizelge 3.6: Farklı açılarda takozların, çevrim cinsinden, ömür performansı.

Karışım	Derece	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
NR	10°	6.169.724	6.213.740	3.582.097	3.258.083	6.138.006	6.186.850
NR	20°	1.563.840	1.887.840	1.008.203	720.229	572.400	1.663.200
NR	30°	2.339	13.594	14.565	22.231	9.641	23.111
NR	45°	541	1.940	1.595	1.834	1.524	4.680

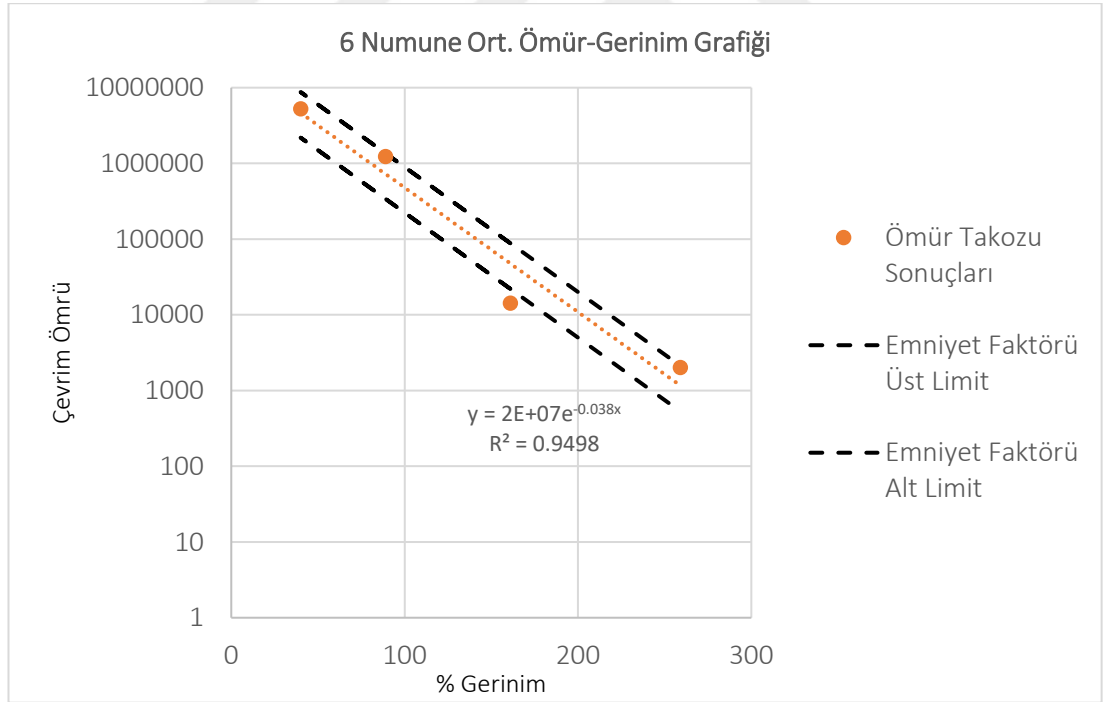
6 numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak incelenen kauçuk malzeme için bir karakteristik Wöhler eğrisi elde edilebilir. Sonuçların ortalaması alındığında karakteristik eğrimizi oluşturmada kullanılacak değerler Çizelge 3.7’de görülmektedir.

Çizelge 3.7: Farklı açılarla yerleştirilen takozların ortalama ömür değerleri.

Karışım	Derece	Mutlak gerinim [%]	Ömür Performansı
NR	10°	40	5.258.083
NR	20°	89	1.235.952
NR	30°	161	14.247
NR	45°	259	2.019

3.3 Test Cihazı Ömür Karakteristik Eğrisinin Eldesi ve Kabul Sınırlarının Belirlenmesi

3.1 başlıklı çalışmada elde edilen asal gerilme değerleri ile 3.2 başlıklı çalışmada elde edilen ömür dayanımı değerleri eşleştirilerek kauçuğa dair S-N ya da diğer adıyla Wöhler eğrisi oluşturulmuştur. Bu eğri turuncu kesikli çizgiyle temsil edilmiştir.



Şekil 3.8: Test takozu S-N eğrisi ve limit değerleri.

Ardından bu eğriyi tanımlayan logaritmik denklem elde edilmiştir. Elde edilen denklem, denklem 3.2’de verilmiştir.

$$N_f = 20.000.000 * e^{(-0,038\varepsilon)} \quad (3.2)$$

Yapılan literatür araştırmalarına göre ömür dayanımı tahmininde 2 oranı yani gerçek ömür dayanımı ile hesaplanan arasında 2 ile 1/2 oranları arasında kalması modelin başarılı olduğunu gösteren bir kıstastır. Bu sebeple denklem 3.2'deki ifadeyi 2'ye bölerek ve 2 ile çarparak kabul aralığını tanımlayan limit değerler tespit edilmiştir. Şekil 3.8'te görülen turuncu kesik çizgi analiz ve ömür testleri sonuçlarından yola çıkarak elde edilen Wöhler eğrisini gösterirken; paralel olarak altında ve üstünde yer alan siyah kesikli çizgiler 2 oranına tekabül eden alt ve üst kabul limitlerini temsil etmektedir. Ömür testi sonuçlarını bu aralıkta görmemiz dahilinde test yönteminin geçerliliğinden söz edilebilir.



4. ŞAFT ASKI LASTİĞİ ANALİZLERİ VE ÖMÜR TESTLERİ

4.1 Şaft Askı Lastiği Analizleri

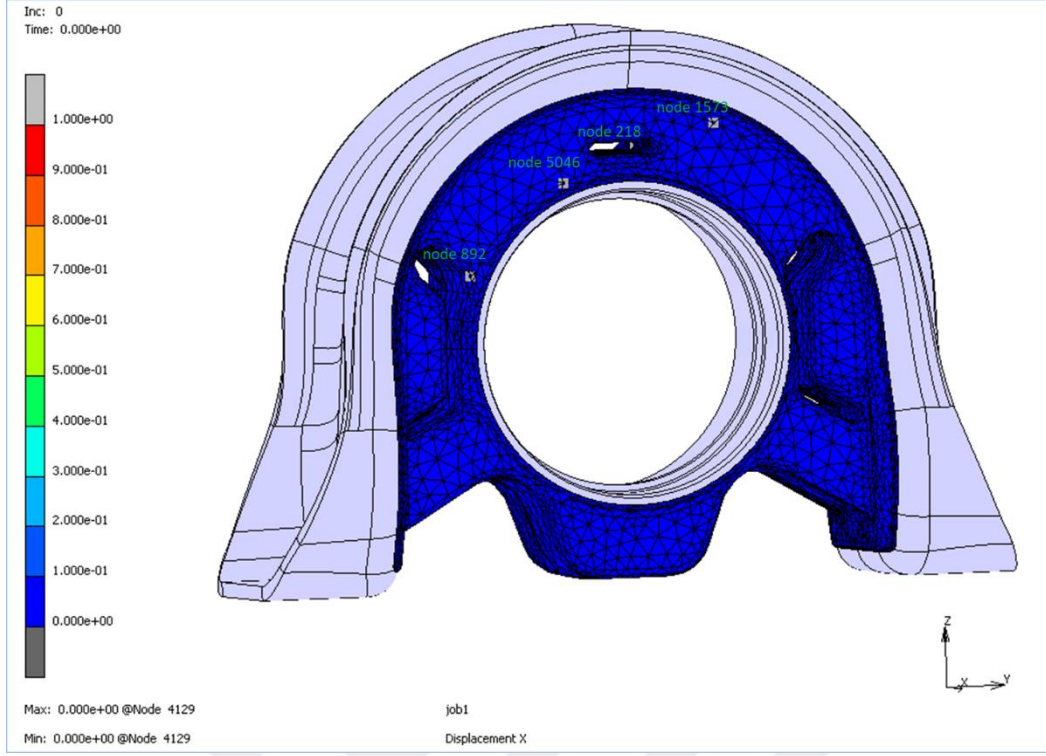
Şaft askı lastiği parçası için öncelikli olarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Test prosedürüne uygun koşullarda parçaya ± 4 mm deplasman X ve Z yönünde 0° faz açısıyla uygulanmıştır. Parçaya yapılan analizler statik ya da yarı-statik olduğundan dinamik etkenler simüle edilememektedir. Dolayısıyla test koşulu olan 2 Hz test frekansının dinamik etkisi ihmal edilmektedir

Analizlerde sonuçların toplanması için 6 adet kritik bölge seçilmiştir. Bu bölgelerden elde edilen kritik gerinim değerleri toplanarak ömür performansı açısından darboğaz yapan kesit belirlenecek ve ömür dayanım hesabı darboğaz yapan kesidin gerinim değeri üzerinden tahmin edilecektir. Analiz koşullarını, girdilerini ve fiziksel testte denk gelen parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Şekil 4.1’de parçanın ilk yüzünde kritik noktaların konumlarını göstermektedir. Bu bölgeler sırasıyla düğüm noktaları 218, 892, 1573 ve 5046’dır.

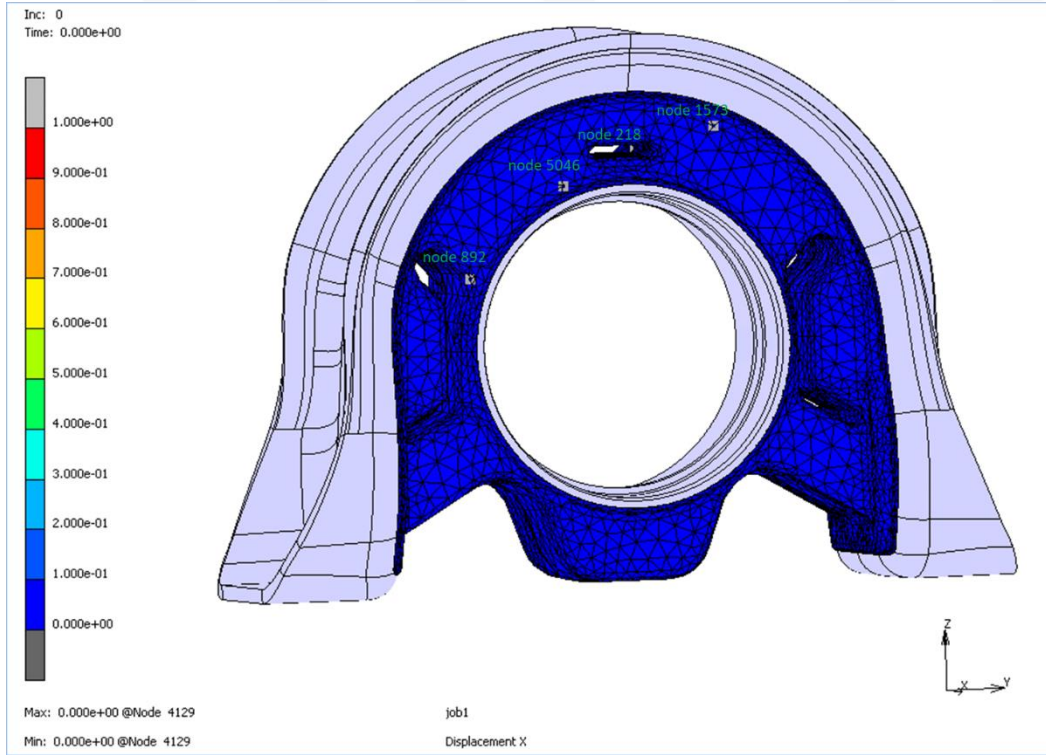
Çizelge 4.1: Sonlu elemanlar analizi parametreleri ve testteki karşılıkları.

Parametre	Analiz Girdisi	Test Girdisi
Çelik Young modülü	210 GPa	-
Çelik yoğunluğu	7850 kg/m ³	-
Mooney-Rivlin C ₁₀ katsayısı	0,64	-
Mooney-Rivlin C ₀₁ katsayısı	0,16	-
Eleman Tipi	Tetrahedral	-
Eleman Sayısı	34883	-
Kauçuk-Çelik teması	Yapışık	Yapışık
Rulman burcu	Hareketli	Hareketli
Dış braket	Sabit	Sabit
Askı lastiği hareket miktarı	X ve Z’de ± 4 mm	X ve Z’de ± 4 mm
Hareket faz açısı	0°	0°
Frekans	Statik	2 Hz
Ortam sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı



Şekil 4.1: Parça ön yüzündeki kritik düğüm noktaları.

Parçanın diğer yüzünden alınan kritik bölgeler ise Şekil 4.2’de belirtilmiştir. Bu yüzdeki kritik bölgelerin düğüm noktalarının kodu ise 1684 ve 6246’dır.



Şekil 4.2: Parça ön yüzündeki kritik düğüm noktaları.

Sonlu elemanlar modelinde kauçuk parça iç metal ve dış braketeye yapışık tanımlanmıştır. Metaller için yoğunluk 7.850 kg/m^3 , Young modülü 210 GPa kabul edilmiştir. Dış braket sabit tutularak iç metale X ve Z yönlerinde $\pm 4 \text{ mm}$ deplasman tanımlanarak düğüm noktalarına gelen kuvvetlerden kaynaklı gerinim değerleri incelenmiştir. Elde edilen gerinim sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

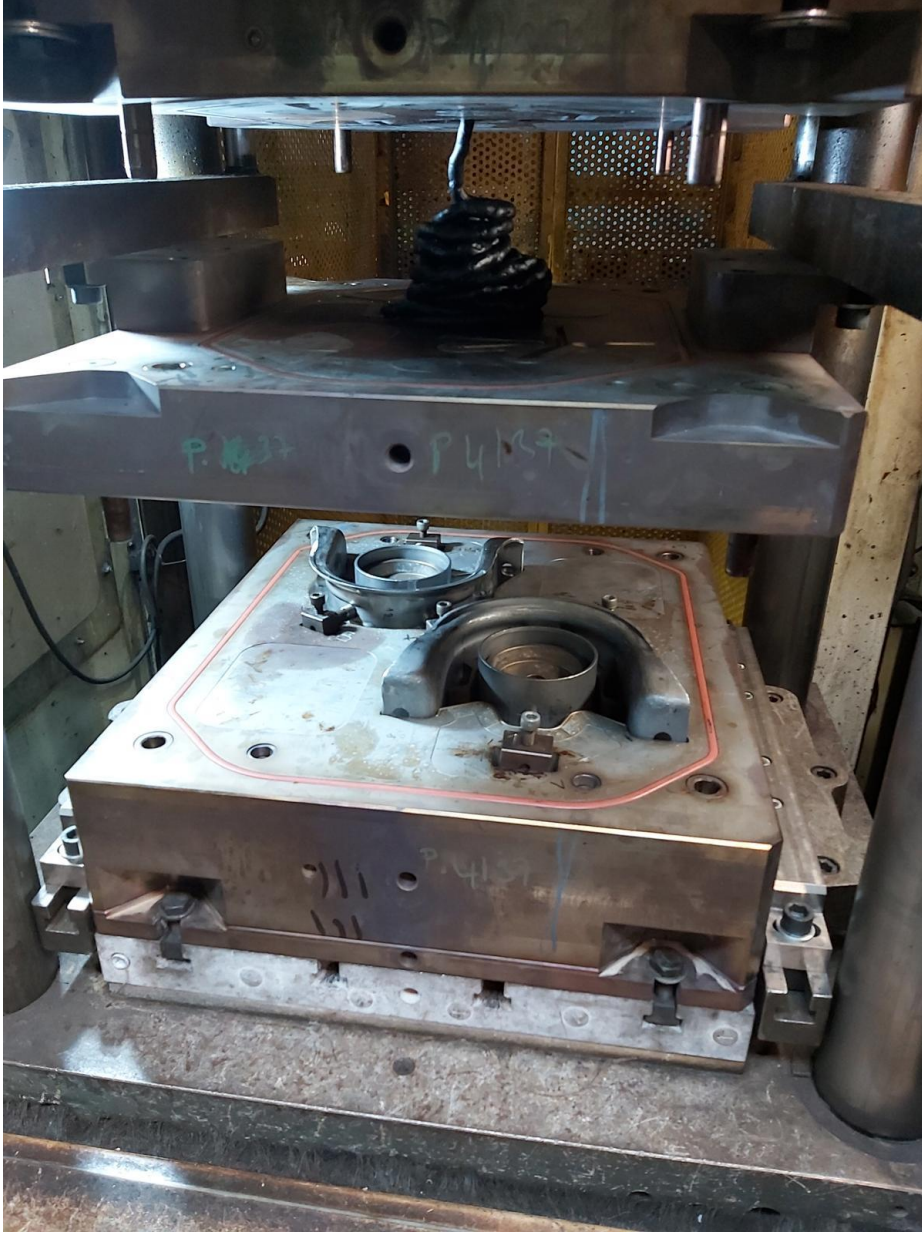
Çizelge 4.2: Sonlu elemanlar analizine ait düğümlerin gerinim genlikleri.

Düğüm noktası	Çekme gerinimi	Basma gerinimi	Genlik
218	0,34	0,25	0,6
892	0,26	0,17	0,43
1573	0,15	0,36	0,51
1684	0,05	0,44	0,49
5046	0,31	0,18	0,48
6246	0,12	0,11	0,23

Çizelge 4.2’den yola çıkarak ömür performansı açısından darboğaz yapacak bölgenin 218 nolu düğüm noktası olduğu görülmektedir. Denklem 3.2’de $0,6$ gerinim için hesaplama yapıp alt limiti bulmak için çıkan değeri ikiye böldüğümüzde ve üst limiti bulmak için denklem 3.2’den elde edilen değeri iki ile çarptığımızda ömür sonuçlarının $1.022.842$ ile $4.091.368$ çevrim arasında olması gerektiği tespit edilmiştir.

4.2 Şaft Askı Lastiği Ömür Testleri

Şekil 4.3’teki gibi enjeksiyon kalıplama yöntemiyle 600 s vulkanize edilerek imal edilen NR kauçuk bazlı şaft askı lastikleri vulkanizasyondan sonra denge haline ulaşması için minimum 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Yanıltıcı sonuçlar almamak için bu süreç içinde parça üzerinde işlem yapılmamalı ve test sonuçları alınmamalıdır.



Şekil 4.3: Enjeksiyonla üretim için kullanılan vulkanizasyon kalıbı.

Elde edilen mamuller çapakları temizlendikten sonra fonksiyonel ve ölçüsel uygunluğu kontrollerle doğrulanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Vulkanizasyondan yeni çıkmış askı lastikleri.

24 saat bekletilerek kontrol edilmiş parçaların kararlı hale tam dönmesi için tüm parçalar 2 gün daha oda sıcaklığında bekletilmiştir. Ardından parçalar ömür test düzeneğine monte edilmiştir. Şekil 4.5'te ömür test düzeneğine montajlı askı lastiği görülmektedir. Çizelge 4.3'te MTS hidrodinamik test sistemine ait özellikler verilmiştir.

Çizelge 4.3: Ömür test takozu test cihazı özellikleri ve test parametreleri.

Özellik	Değer
Kuvvet kapasitesi	± 50 kN
Çalışma frekans aralığı	0-100 Hz
Piston stroğu	± 60 mm
Test sıcaklık aralığı	0-130°C (şartlandırmalarla)
Dahili iklimlendirme kabini	Mevcut değil

MTS hidrodinamik test sisteminde 2 Hz frekansta Şekil 4.5'teki test düzeneği ile, kuvvetölçer yardımıyla test boyunca ölçüm alarak, parçada görülen kuvvet düşene kadar devam ettirilmiştir. Şekil 4.6'da ömür testini koparak tamamlayan şaft askı lastiği görülmektedir.



Şekil 4.5: Ömür testi için montajlanmış şaft askı lastiği.

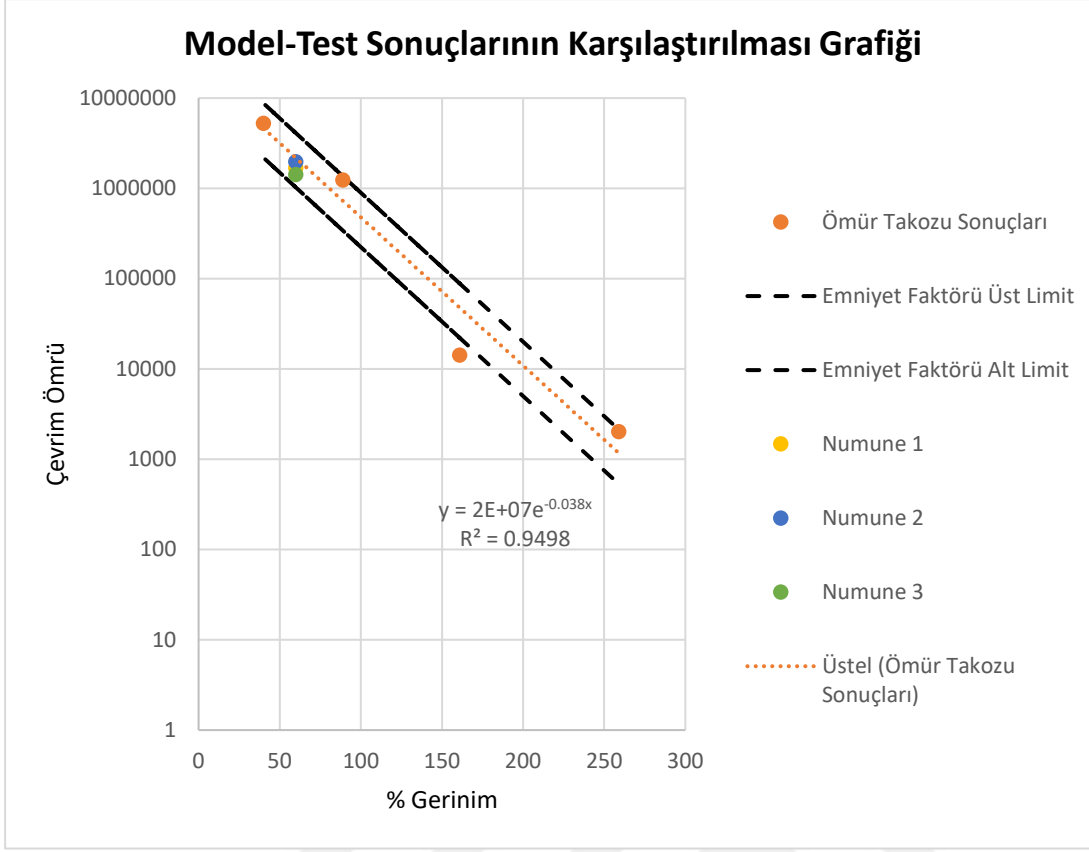
Testler, test prosedürü ve analizlerle uyumlu olacak şekilde ± 4 mm deplasman kontrolüyle oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test, 3 numune tamamlanana kadar tekrar edilmiştir. Ömür testi sonuçları Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.7'de yer almaktadır.



Şekil 4.6: Ömür testini kopma sonucu tamamlayan numune.

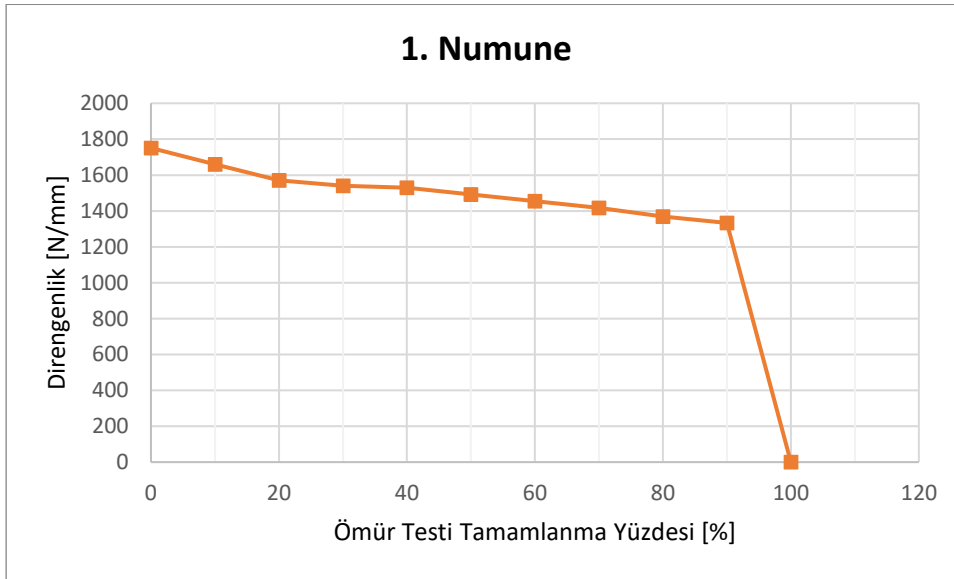
Çizelge 4.4: 3 shaft askı lastiğinin dirençlik ve ömür testi sonuçları

Numune No	Başlangıç Dirençlik Değeri	Ömür Performansı [Çevrim]
1	1751 N/mm	1.683.946
2	1623 N/mm	1.967.885
3	1896 N/mm	1.421.816

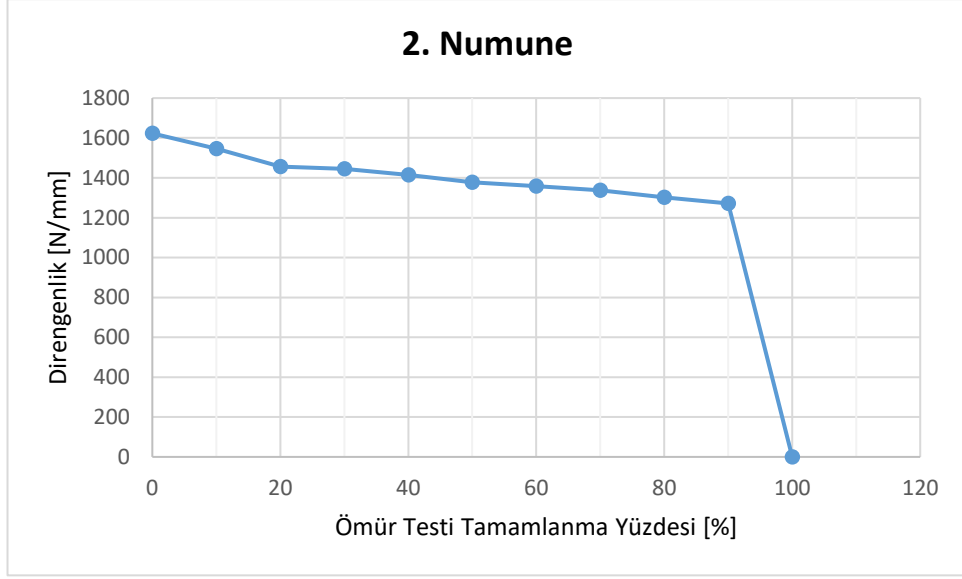


Şekil 4.7: Test sonuçlarının kabul limitlerine göre durumu.

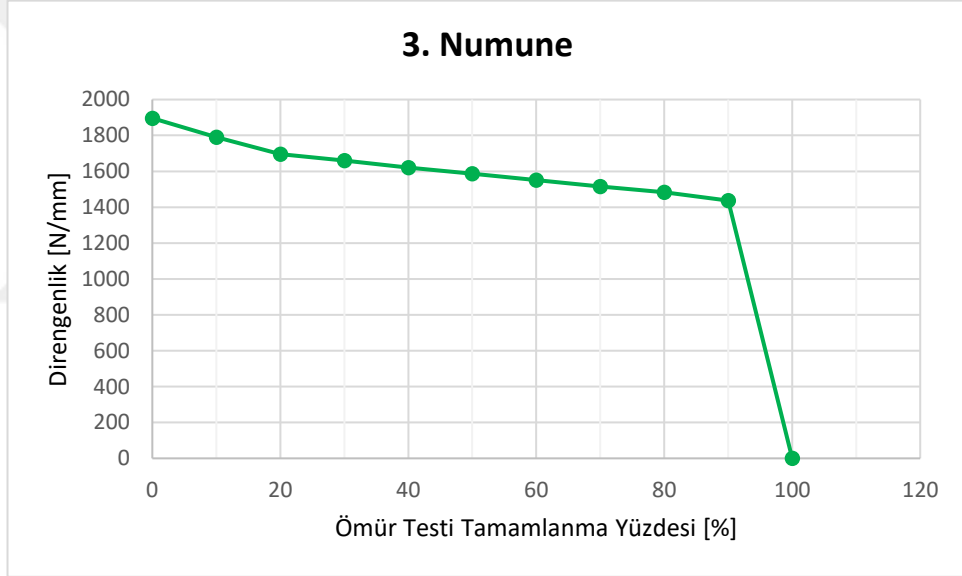
Numunelerin yırtılma anına kadar geçirdiği direngelik değeri değişimleri ise Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir. Kopmadan safhasından önce numunelerdeki rijitlik düşüşünün %30’un altında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8: 1. test numunesinin test boyunca direngelik ölçümü.



Şekil 4.9: 2. test numunesinin test boyunca direngelik ölçümü.



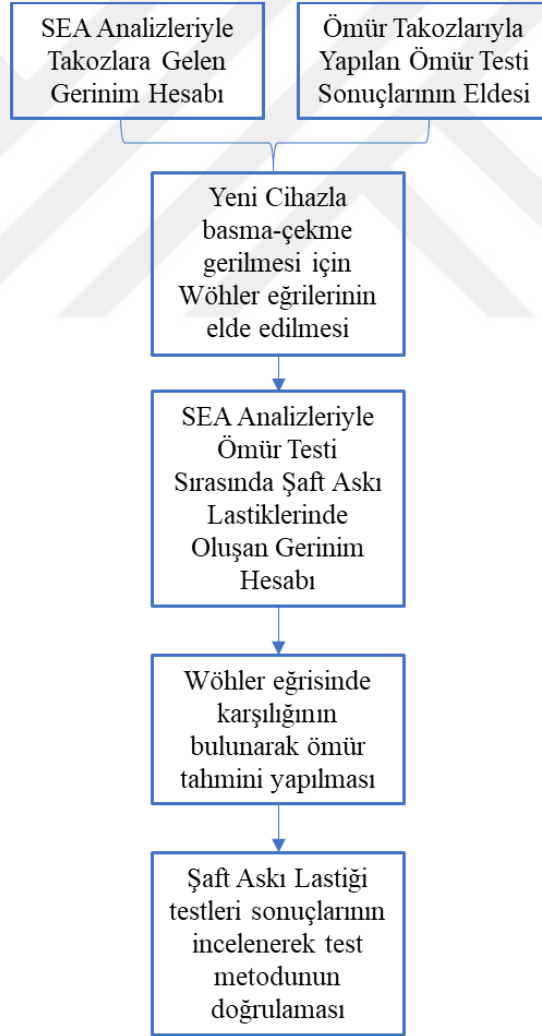
Şekil 4.10: 3. test numunesinin test boyunca direngelik ölçümü.



5. SONUÇ

Kauçuk malzemelerde ömür dayanımı incelenirken testlerin mümkün olduğunca kullanılacak uygulama koşullarına yakın olması, tutarlı veriler elde etmek için büyük önem arz etmektedir ve test koşulları bu doğrultuda belirlenerek maksimum doğruluk ve tutarlılık sağlanabilir.

Kauçuk malzemelerde gerilmenin tipi de önemli bir faktördür. Bu faktörü hesaba katmak için Şekil 5.1'deki prosedür izlenerek geleneksel çekme testi yerine bası-çekme gerilme ikililerinin etkilerini de hesaba katan ömür testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1: İzlenen yol haritası blok diyagramı.

Ömür testi takozlarıyla yapılan testler sonucunda kauçuğun ömür performansı için oluşturulan referans Wöhler eğrisine ait korelasyon katsayısı %99 çıkmıştır ve literatür araştırmasına göre başarılı kabul edilen %85 korelasyon katsayısının üzerindedir. Bu sonuçtan çıkardığımız referans eğrinin kauçuk ömür performansı ile örtüştüğü sonucuna varılmaktadır.

Fiziki parçalar üzerinde yapılan ömür testinde sonuçlar 3 fiziki parça için 1,4 milyon ile 2 milyon çevrim aralığındadır ve limit faktörü 2 ile belirlenen alt ve üst sınırların içinde kaldığı için uygundur. Bu sebeple ömür dayanımı tespitinde kullanılan cihazın, numunelerin ve izlenen prosedürün; bası-çeki gerilmesi senaryosunu ömür performansı açısından kabul edilebilir doğrulukta modelliği çıkarımı yapılabilir. Yapılan çalışma, aynı kauçuk reçetesiyle üretilecek malzemeler için analiz ortamında elde edilen çıktılardan yola çıkarak ömür performansına dair isabetli yorumlama yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

Aynı geometriye sahip olduğu kabul edildiğinde askı lastiklerinin rijitliğinin farklı olması numuneler arasında sertlik farkı olduğunu göstermektedir. Bu da direngenliği en yüksek numunenin en sert kauçuğa sahip olduğu anlamına gelmektedir. Kauçuklarda sertlik arttığında elastikiyetteki düşüşe bağlı olarak ömür dayanımı azaltılmaktadır. Çıkan ömür testleri bu bilgiyle uyumaktadır.

6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Fiziki parçalar üzerinde yapılan ömür testinde sonuçlar, 3 fiziki parça belirlenen alt ve üst sınırların içinde kalmaktadır. Bu sebeple ömür dayanımı tespitinde kullanılan cihazın, numunelerin ve izlenen prosedürün; bası-çeki gerilmesi senaryosunu ömür performansı açısından kabul edilebilir doğrulukta modelliği çıkarımı yapılabilir. Yapılan çalışma, aynı kauçuk reçetesiyle üretilecek malzemeler için analiz ortamında elde edilen çıktılardan yola çıkarak ömür performansına dair isabetli yorumlama yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

Elde edilen sonuçlar her ne kadar alt ve üst limitlere uygun çıkmış olsa da alt limite daha yakın olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında tahminlerin konservatif olmadığı söylenebilir.

Maliyetler nedeniyle numune sayısı sınırlı tutulan çalışma; birincil öncelikle şaft askı lastiği numunelerinde, ikincil olarak test takozu numunelerinde tekrar sayısı artırılarak tutarlılık daha detaylı incelenebilir.

Çalışma kapsamının genişletilmesi ve ilerletilmesi için takozların üstünden sıcaklık ölçümü yapılarak Arrhenius denkleminde faydalanılarak kauçuk sıcaklığının ömür performansına etkisi incelenebilir. Standart çekme gerilmesi testi ile bu cihazda farklı sıcaklıklar altında ömür testleri gerçekleştirilerek; yükleme tipinin kauçuk sıcaklığına etkisi incelenebilir.

Farklı sıcaklık profilinde referans eğrileri oluşturulan kauçuk takozlar; bir sıcaklık profiline bağlı olarak ömür testine maruz bırakılıp sıcaklık etmeninin ömür performansına etkisinin tespitinde Miner kuralının geçerliliği incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Al-Raheem, S. K., Jweeg, M. J., & Hassan, A. kareem.** (2021). Design and construction of device for Rubber Material Fatigue Test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1094(1), 012173.
- Benarey, H. A., Bhowmick, A. K., & Hall, M. M.** (1994). *Rubber Products Manufacturing Technology*. Marcel Dekker Inc.
- Bhowmick, A. K., & Stephens, H. L.** (2003). *Handbook of Elastomers*. Marcel Dekker Inc.
- Blow, C. M.** (1977). *Rubber Technology and Manufacture*. Published for the Plastics and Rubber Institute by Newnes-Butterworths.
- Bruce, R. G.** (2004). *Modern materials and manufacturing processes* (3rd ed.). Pearson/Prentice Hall.
- Chandra, R., & Mishra, S.** (2003). *Rubber and Plastic Technology*. CBS Publishers & Distributors.
- Choi, J.-Y., Park, D.-W., & Oh, T. S.** (2014). Variation of elastic stiffness of Polydimethylsiloxane (PDMS) stretchable substrates for wearable packaging applications. *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 21(4), 125–131.
- Ciesielski, A.** (2000). *An Introduction to Rubber Technology*. RAPRA Technology, 3-4.
- Gehrmann, O., Kröger, N. H., & Muhr, A.** (2021). Displacement-controlled fatigue testing of rubber is not strain-controlled. *International Journal of Fatigue*, 145, 106083.
- Gupta, S. D.** (2017). *Reverse engineering of rubber products: Concepts, tools, and Techniques*. CRC Press, Taylor et Francis Group, 1-48.
- Hofmann, W.** (1989). *Rubber Technology Handbook*. Harris Publisher.
- Hulme, Andrew, et al.** (2014). Fatigue of rubber and plastic materials. *Conference: High Performance Polymers for Oil and Gas*, pp.1-12.
- Hundiwale, D. G., Kapadi, U. R., Desai, M. C., & Bidkar, S. H.** (2002). Mechanical properties of natural rubber filled with flyash. *Journal of Applied Polymer Science*, 85(5), 995–1001.
- ISO** (2017). *Rubber, vulcanized — Determination of tension fatigue International Organization for Standardization (ISO-6943)*, no. 4, pp. 1-7
- Kamble, V. U., & Gulhane, U. D.** (2018). Failure analysis and design modification of bracket of center bearing of propeller shaft of St Bus – A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*.

- Kim, W.** (2004). Fatigue life estimation of an engine rubber mount. *International Journal of Fatigue*, 26(5), 553–560.
- Li, Q., Zhao, J., & Zhao, B.** (2009). Fatigue life prediction of a rubber mount based on test of material properties and finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, 16(7), 2304–2310.
- Luo, R. K., & Wu, W. X.** (2006). Fatigue failure analysis of anti-vibration Rubber Spring. *Engineering Failure Analysis*, 13(1), 110–116.
- Mars, W., Fatemi, A.** (2006). Multiaxial stress effects on fatigue behavior of filled natural rubber. *International Journal of Fatigue*, 28(5–6), 521–529.
- Mohammed, A., Emara, K. M., & Nemat-Alla, M. M.** (2013). Design of rubber fatigue behaviour test rig. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 41(2), 501–516.
- Nakajima, N.** (2000). *The science and practice of rubber mixing*. Rapra Technology Ltd.
- Neuhaus, C., Lion, A., Johlitz, M., Heuler, P., Barkhoff, M., & Duisen, F.** (2017). Fatigue behaviour of an elastomer under consideration of ageing effects. *International Journal of Fatigue*, 104, 72–80.
- Okeke, C. P., Thite, A. N., Durodola, J. F., & Greenrod, M. T.** (2017). Hyperelastic polymer material models for robust fatigue performance of automotive LED lamps. *Procedia Structural Integrity*, 5, 600–607.
- Qiu, X., Yin, H., & Xing, Q.** (2022). Research progress on fatigue life of rubber materials. *Polymers*, 14(21), 4592.
- Risitano, A., & Risitano, G.** (2013). Cumulative damage evaluation in multiple cycle fatigue tests taking into account energy parameters. *International Journal of Fatigue*, 48, 214–222.
- Samad, M. S. A., Ali, A., & Sidhu, R. S.** (2011). Durability of automotive jounce bumper. *Materials & Design*, 32(2), 1001–1005.
- Schrader, G. F.** (2004). *Manufacturing Processes & Materials* (4th ed.). Industrial Pr Inc.
- Simmonds, N. W.** (1992). Natural Rubber Biology. Cultivation, and Technology. *Experimental Agriculture*, 30(02), 265.
- Subramaniam, A.** (1987). Natural rubber. *Rubber Technology*, 3, 179.
- Svensson, S.** (1981). Testing methods for fatigue properties of rubber materials and vibration isolators. *Polymer Testing*, 2(3), 161–174.
- White, J. L.** (1995). *Rubber Processing Technology, materials and Principles*. Hanger Publishers.
- Woo, C. S., & Kim, W. D.** (2008). Fatigue lifetime prediction methodology of rubber components. *WIT Transactions on The Built Environment*.
- Yavuz Erkek, M.** (2018). *Kauçuk Ürünlerin Gerilme - Gevşeme Davranışının Modellemesi, Analizi ve Optimizasyonu* (Doctoral dissertation).

Zulkifli, N. A., Moon, G. D., Hyun, D. C., & Lee, S. (2023). Comprehensive constitutive modeling and analysis of multi-elastic polydimethylsiloxane (PDMS) for Wearable device simulations. *Scientific Reports*, 13(1).





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Baybora ÇORBACIOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2019, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-2023 yılları arasında Tekno Kauçuk Sanayii’de otomotiv Ar-Ge mühendisi olarak çalıştı.
- 2023 yılından beri halen BMC Power Motor ve Kontrol Teknolojileri A.Ş.’de bağlantı ve yataklama sistemleri mühendisi olarak çalışmaktadır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Çorbacioğlu, B.,** Çalık, A.T. 2024. Kauçuk Ömür Testi için Bir Test Düzeninin Validasyonu. *11. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, March 16-17, 2024 İstanbul, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Çorbacioğlu, B.,** Şimşek, O.O., Çakmak, C. 2021. Suv Araçlarda Şaft Kütle Sönümleyicinin Tasarım ve Optimizasyonu. *3rd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, December 15-17, 2021 Ankara, Turkey.
- **Çorbacioğlu, B.,** Çiftçi, C., Başaran, H., Şentürk K. 2022. Ağır Hizmet Ticari Araçların Şaft Askı Lastiğinin Analizi ve Optimizasyonu. *9. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, May 14-15-16, 2022 İstanbul, Turkey.