



Enerji Tasarruflu Döner Mil Keçelerinin Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi

Hasan Kasım^{1*}, Barış Engin², İsmail Saraç³, Murat Yazıcı⁴

^{1*} Emsa Nano Teknoloji Enerji San. Ve Tic. A.Ş., Bursa, Turkey, (ORCID: 0000-0002-3024-5207), hasankasim@emsaglobal.com

² SKT Yedek Parça Makina San. Ve Tic. A.Ş, R&D Center, Bursa, Turkey, (ORCID: 0000-0002-3445-9843), barisengin@skt.com.tr

³ SKT Yedek Parça Makina San. Ve Tic. A.Ş, R&D Center, Bursa, Turkey, (ORCID: 0000-0002-8382-3461), ismailsarac@skt.com.tr

⁴ Bursa Uludag University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, Bursa, Turkey, (ORCID: 0000-0002-8720-7594), myazici@uludag.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 1 Temmuz 2021 ve Kabul Tarihi 9 Eylül 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.960207)

ATIF/REFERENCE: Kasım, H., Engin, B., Saraç, İ. & Yazıcı, M. (2021). Enerji Tasarruflu Döner Mil Keçelerinin Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 325-333.

Öz

Bu çalışmada yüksek devir ve sıcaklıklarda çalışabilen yeni nesil elektrikli araçların güç aktarma organlarında kullanılmak üzere prototipi üretilen, kauçuk malzeme esaslı Enerji Tasarruflu Döner Mil Keçelerinin(ERS) statik yükleme durumundaki radyal kuvvet, temas eden tırtıl sayısı ve temas yüzeylerinin durumu deneysel ve Sonlu Elemanlar Analiziyle (FEA) incelenmiştir. ERS'lerin dayanım ömrünü etkileyen radyal kuvvet için yapılan deneysel ölçümler ile FEA sonuçları arasında %9'a kadar bir fark görülmüştür. Kauçuk malzeme testlerinden elde edilen veriler, Abaqus sistemi ile eşleştirilerek Mooney-Rivlin malzeme katsayı değerleri hesaplanmıştır. Hazırlanan FEA prosedürü sayesinde de sızdırmazlık elemanının montajı sırasındaki hareketi, reaksiyon kuvveti, dudakta meydana gelen diğer değişimler rahatlıkla gözlenmiştir. Temas eden tırtıl sayıları her iki çalışma içinde aynı olup, temas yüzeyleri arasında %2'lik bir sapma değeri elde edilmiştir. Bu şekilde, sızdırmazlık elemanlarının tasarlanması doğru malzeme tanımlamasına bağlı, prototip ihtiyacı duyulmadan sonlu elemanlar analizi ile zaman kazandıran alternatif bir yöntem geliştirilerek kullanılabilirliği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Döner Mil Keçeleri, Sonlu Elemanlar Analizi, Hiperelastik Malzeme Modelleri, Kauçuk, Enerji Tasarruflu Keçe

Investigation of Energy Saving Rotary Shaft Seals by Finite Element Analysis

Abstract

In this study, radial force, number of contacting caterpillars, and contact surfaces of rubber material-based Energy-Saving Rotary Shaft Seals (ERS), which are prototyped to be used in powertrains of new generation electric vehicles that can operate at high speeds and temperatures, were analyzed by experimental and Finite Element Analysis (FEA) was studied. A 9% difference was found between the experimental test results for the radial force, which affects the endurance life of ERSs, and the FEA results. The data obtained from the rubber material tests were matched with the Abaqus system, and the Mooney-Rivlin material coefficient values were calculated. Thanks to the prepared FEA procedure, the movement of the sealing element during the assembly, reaction force, and other changes in the lip were easily observed. The number of lips in contact was the same in both studies, and a deviation of 2% was obtained between the contact surfaces. In this way, it has been seen that the design of sealing elements can be used by developing an alternative method that saves time with finite element analysis without the need for a prototype, depending on the correct material definition.

Keywords: Rotary Shaft Seals, Finite Element Analysis, Hyperelastic Material Models, Rubber, Energy Saving Seal

* Sorumlu Yazar: hasankasim@emsaglobal.com

1. Giriş

Sabit haldeki bir yuva ile dönen bir mil arasında sızdırmazlık sağlamak için kullanılan makine elemanları genel tabirle döner mil keçesi olarak bilinirler (Rotary Shaft Seal). İsimlendirilmeleri ise kullandıkları yere göre yapılır (tekerlek keçesi, şanzıman keçesi, krank keçesi gibi). Döner mil keçeleri en kritik makine elemanlarından biridir. Her türlü otomotiv ve enerji santrali makineleri, endüstriyel pompalar, uçak gazı türbinleri, güç üretim türbinleri ve büyük endüstriyel ve boru hattı kompresörleri dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalara sahiptirler (Johnston ve ark., 1984). Döner mil keçesinin temel işlevi hareketli bir milin makinenin bir bölümünden diğerine geçtiği veya bir makine muhafazasından geçtiği basınçlı sıvıları ayırmaktır. Ayrıca, bir çalışma bölgesine yabancı parçacıkların girişini veya yağ kaybını önlemek için de şanzımanlarda ve rulmanlarda kullanılırlar.

Döner mil keçesi ve mil yüzeyi arasındaki tam temas mükemmel sızdırmazlık sağlasa da yüksek sürtünme ve yüksek aşınma oranı nedeniyle kabul edilemez. İyi tasarlanmış döner mil keçeleri, hareketli yüzeyde ince akışkan bir film oluşturarak düşük sürtünme ve düşük aşınma oranı ile kabul edilebilir derecede düşük bir sızıntı seviyesi temin ederler.

Standart döner mil keçesi metal bir destek ve elastomer bir dudağa sahiptir. Döner mil keçelerinin dudakları yaysız veya yay yüklü olabilir. Döner mil keçesi ile mil arasında ön yüklemeye yapmak için kullanılan yay, *Garter Yay* olarak isimlendirilir.

Bugün dünyada yaygın kullanım alanı bulan dudaklı döner mil keçeleri 4 ana grupta incelenebilir:

1. *Elastomerik Dudaklı Keçe*: Döner millerde akışkanların içeriye veya dışarıya çıkışını önlemek amacıyla kullanılır.
2. *PTFE / Plastik Keçe*: Elastomer keçelere alternatif olarak özellikle yağlamanın mevcut olmadığı kuru sürtünmeli uygulamalarda ve ısı direnç ile kimyasal dayanım gereken yerlerde kullanılır.
3. *Düşük Sürtünmeli Keçeler*: Elastomerik veya PTFE keçelerin daha ileri ve özel uygulamalarında kullanılırlar.
4. *Yatak/Rulman Keçeleri*: Dudaklı keçelerden türetilmekle birlikte genellikle düşük yükler fakat aşırı kirli ortamlarda kullanılırlar.

Günümüzde keçelerle ilgili yapılan çalışmalar okadar ileri seviyelere gelmiştir ki artık bu keçelerin özellikleri ve davranışları matematiksel olarak hesaplanabilir ve öngörülebilir hale gelmiştir. Elastomer malzemelerin matematiksel hesaplamalarında kullanılması için hiperelastik malzeme modelleri geliştirilmiştir. En yaygın olarak kullanılanlar polinom formları (veya Rivlin serisi), Ogden ve Neo-Hookean modelleridir. Her iki form için de malzeme modelinin kararlılığı sorusu dikkate alınmalıdır. Elastomer bileşenlerin FEA hesaplamalarında, hiperelastik malzemenin doğrusal olmayan malzeme davranışı, sonuçları önemli ölçüde etkiler (Bien-aimé ve ark., 2020), (Kim ve ark., 2012). Bu nedenle, simülasyonlardan arıza ve ömür tahminleri açısından güvenilir sonuçlar elde etme yeteneği, genel üç boyutlu gerilme ve deformasyon durumları için malzemenin davranışının kesin modellenmesine dayanmaktadır (Bhandari ve ark., 2007). Yapılan malzeme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplama modellerinden en uygunu seçilmelidir (Li ve ark., 2002). Metaller ve plastikler için tipik malzeme özelliklerini tanımlamaya kıyasla, elastomerlerin davranışını modellemek çok daha karmaşık bir iştir. Aşağıdaki

fiziksel ve kimyasal olaylar, Şekil 1'de gösterildiği gibi simülasyon içinde dikkate alınmalıdır.



Şekil 1. Elastomer malzeme davranış modelleri

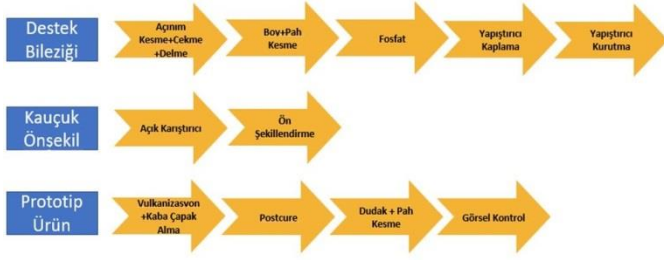
Araştırmacılar, çok karmaşık çalışma fenomeni ve kritik makine elemanı olması nedeniyle döner mil keçelerini Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile incelemiştirler (Zhang ve ark., 2019), (Starostin ve ark., 2020). Sızdırmazlık ve yük taşıma performansı açısından C tipi bir sızdırmazlık elemanı Abaqus isimli FEA yazılımı ile incelenerek sızdırmazlık performansını etkileyen temel parametreler ve tolerans aralıkları tespit edilmiştir (Zhou ve ark., 2015). Yuan ve arkadaşları çözüm süresinde kazanç sağlamak adına iki boyutlu aksel simetrik model kullanarak sonlu elemanlar modelini kurmuşlardır. Bu modellerinde döner mil keçelerinde kullanılan kauçuk esaslı malzemeleri tanımlamak için Mooney-Rivlin malzeme modelinden yararlanmışlardır. Keçelerin sızdırmazlık yüzeylerinin zorlanma durumundaki aksel hareketten kaynaklanan tepki kuvveti ve sürtünme durumunu tespit etmek için explicit FEA yöntemi ile non-linear malzeme modeli kullanılmıştır (Calonius ve ark., 2005).

Bu çalışmada enerji tasarruflu döner mil keçesinin (ERS) statik yüklemeye durumundaki radyal kuvvet, temas eden tırtıl sayısı ve temas yüzeyi hem deneysel hem de FEA modelleri ile incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme

Esnek ve dayanıklı yapısıyla öne çıkan kauçuk doğal bir madde olup endüstriyel uygulamalarda ve günlük hayatımızda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Kauçuklar ısıtıldıkça yumuşar, süreye bağlı olarak vulkanize olarak ifade edilen çapraz bağlanma işlemi ile sertleşir. Düşük elektrik iletkenliğine sahip olduğu için yalıtım-izolasyon malzemesi olarak da kullanılır (Azura ve ark., 2019). Kauçuk çeşitleri şu şekildedir: Tabii kauçuk (NR), Stiren Bütadien Kauçuk (SBR), Kloropren Kauçuk (CR, Neopren), Nitril Kauçuk (NBR), EPDM Kauçuk (EPDM), Hypalon Kauçuk (CSM), Silikon Kauçuk (VMQ), Viton Kauçuk (FKM), ECO Kauçuk (CO/ECO) (Li ve ark., 2016). Prototip keçe üretiminin iş akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Keçe üretimi iş akış şeması

Bu çalışma kapsamında hazırlanan kauçuk formülasyonu Tablo 1’de gösterilmiştir. Kauçuk karışımındaki maddelerin oranını ifade etmek için yüz birim kauçuğa denk gelecek şekilde ‘phr’ olarak ifade edilen oranlama metodu kullanılmıştır. Hazırlanan karışım içerisinde iki farklı polimer tipi bulunmakta olup SKT A.Ş, Türkiye’den temin edilmiştir. Karışımda kullanılan dolgu maddeleri (ortalama parçacık boyutu 25-35 nm, harici yüzey alanı 80 m²/g), Macrochem SA, Polonya’dan satın alınmıştır. Aktivatörler, pişiriciler ve diğer tüm bileşenler piyasadan temin edilebilen ticari ürünlerdir. Kauçuk karışımları SKT A.Ş’nin üretim hattındaki kapalı ve açık karıştırıcılar yardımıyla hazırlanmıştır.

Tablo 1. Hazırlanan kauçuk karışımına ait formülasyon

Parametre	Miktar (phr)
Polimer 1	70
Polimer 2	30
Dolgu	50
Aktivatör	4
Yağ	10
Pişirici 1	1
Pişirici 2	2

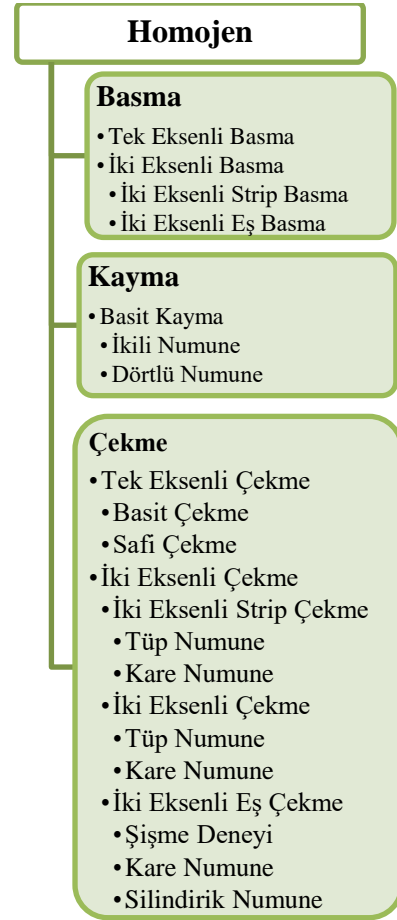
Karışımlara ait vulkanizasyon eğrileri, 6 dakika boyunca 170 °C’de Alpha Technologies MDR 23000 marka bir reometre test cihazı vasıtasıyla tespit edilmiştir. Mekanik testlerde kullanılacak test numuneleri elektrik ile ısıtılan 40 tonluk hidrolik bir laboratuvar presinde, 165 °C’de 10 dk. süreyle vulkanize edilerek hazırlanmıştır. Vulkanize edilen test plakaları, 23±2 °C sıcaklığında, %50±%5 bağıl nemde (ASTM D412), 18 saat süre boyunca iklimik ortamda bekletilmiştir. Prototip keçe numunesi için metal destek bileziği, ön şekillendirilmiş kauçuk malzemeler kalıpta vulkanize edilerek hazırlanmıştır. Şekil 3’te mamul ve yarı mamul ürünlere ait fotoğraflar gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Destek bileziği, (b) Ön şekillendirilmiş Kauçuk, (c) Prototip keçe

2.2. Malzeme Testleri

Bir cisme bir dış kuvvet uygulanması sırasında üzerindeki noktalar yer değiştirmesine deformasyon adı verilmektedir. Cisim deformasyona uğrarken asal ekseninde bir bozulma olmuyorsa bu duruma Dönmesiz (Safi) Deformasyon denir. Kauçuk malzemelerle yapılan testlerde, numunenin dönmesiz homojen deformasyona maruz kalması sağlanır. Bu sayede ölçümler daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir (Vahapoğlu, 2013). Şekil 4’te kauçuk mekaniğinde yapılan testler gösterilmiştir. Elastomerik malzemeler modellenirken genellikle davranış elastik, malzeme izotropik ve katı elastomerler için malzeme yaklaşık olarak sıkıştırılmaz üzere çeşitli varsayımlar yapılır (Keerthiwansa ve ark., 2018). Kauçuklar üzerinde sıklıkla basma ve çekme şeklinde iki tipte test gerçekleştirilir. Basma durumu her zaman tek eksenli iken, gerilim tek eksenli, düzlemsel veya eş eksenli bir şekilde uygulanabilir (Dalrymple ve ark., 2007).



Şekil 4. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler (Vahapoğlu, 2013)

2.3. Çekme Testleri

Çekme testleri basit ve kolay uygulanabilir olmaları sebebiyle kauçuk malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede en yaygın kullanılan testlerdir. Numuneye uygulanan kuvvete göre tek eksenli ve iki eksenli olmak üzere iki çeşidi vardır. Kauçuk malzemeler çekme ve basma durumlarında farklı mekanik davranışlara sahiptirler. Bu sebeple yalnızca çekme deneyi yapmak mekanik özellikler konusunda yeterli bilgiyi vermemektedir (Abdullah, 2020). Yapılan çalışmada tek eksenli, çift eksenli, kare formundaki numunenin çift eksenli çekme deneyi, tek eksenli basma deneyi ve kayma deneylerinden

elde edilen MS Excel dataları FEA yazılımında veri girişinde kullanılmıştır.

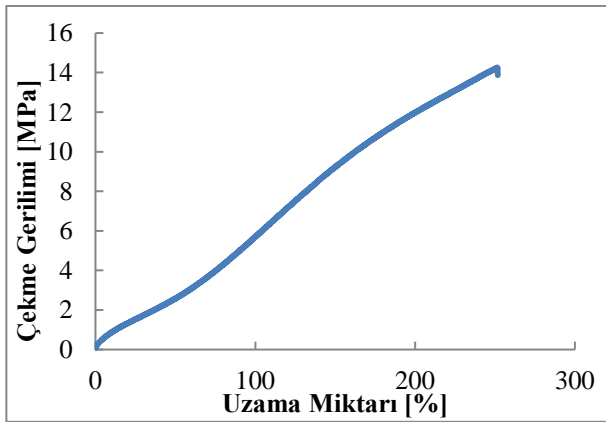
2.3.1 Tek Eksenli Çekme Testleri

Tek eksenli çekme deneyleri metal malzemelerin özelliklerini belirlemek için yeterli olup kullanımı çok yaygın olmakla birlikte kauçuk malzemelerin çekme ve basma durumlarında farklı mekanik davranışlara sahip olmalarından kauçuk malzemeler için yeterli değildir (Sasso ve ark., 2008). İki uçtan sıkılan mengenerlerin arasındaki mesafe, numunenin çekme boyu olarak kabul edilir. Mengenerlerde sıkılan kısımlar dikkate alınmaz. İlk çevrimlerde numunenin özelliklerinde ciddi değişimler gözlenir. Buna "Mullin etkisi" denir (Freitas, 2009). Malzemenin özelliklerinin stabilleşme 3-20 arasında bir çevrim sayısında elde edilir (Erkek ve ark., 2015). Çalışma kapsamında Şekil 5'de gösterilen deney düzeneğinde tek eksenli çekme testleri yapılmıştır.



Şekil 5. Tek eksenli deney düzeneği

Çalışma kapsamında 6 adet numune üzerinden tek eksenli çekme deneyi yapılmıştır. Yapılan altı ölçümden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve sonuçların stabil olduğu görülmüştür. Elde edilen test sonuçları Şekil 6'da verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 6. Tek eksenli çekme testi sonuç grafiği

2.3.2 Çift Eksenli Çekme Testleri

Tek eksenli çekme deneylerinde I_1 ve I_2 'nin incelenmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple kauçuk malzemelere çift eksenli çekme deneyi yapılması gerekmektedir. Çift eksenli

çekme deneyleri kare formunda numune ve ince cidarlı tüp numune olmak üzere iki farklı numune çeşidiyle yapılmaktadır. (Fujikawa ve ark., 2014). Çalışma kapsamında kare formunda kenarı 4 birim olan numuneye 1 ve 2 doğrultularında F_1 ve F_2 kuvvetleri uygulanır. Bu kuvvetlerin etkisinde numune λ_1 ve λ_2 son boya ulaşmaktadır.

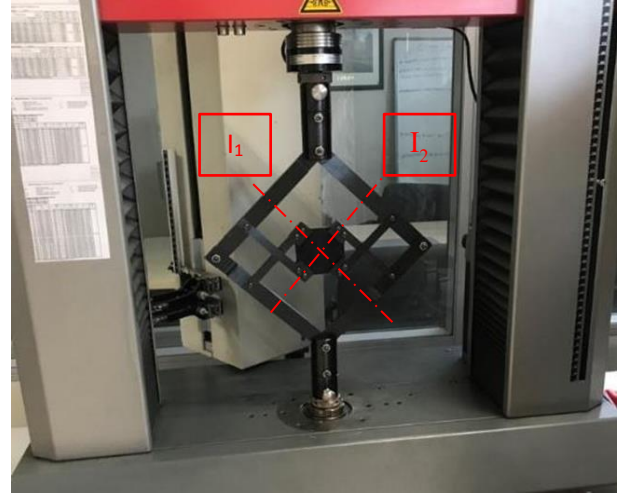
$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad \lambda_1 = \lambda_1 \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_0} \quad \lambda_2 = \lambda_2 \quad (2)$$

A_0 , kuvvetin uygulandığı ilk kesit alanıdır. Sıkıştırılmazlık kanununa göre numunenin kalınlığının değişimi denklem 3'de gösterildiği şekilde bulunur.

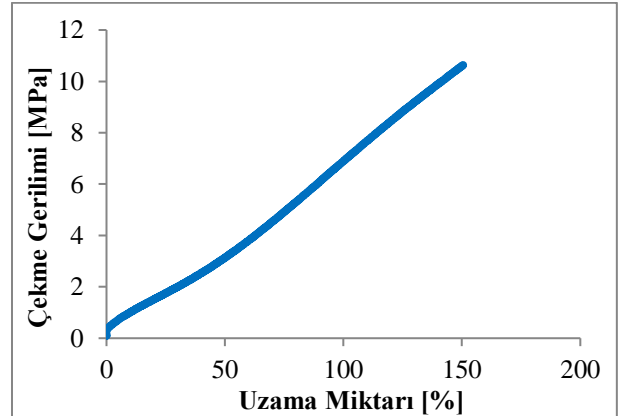
$$\sigma_3 = 0 \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (3)$$

Kuvvetler $\lambda_1 = \lambda_2$ veya $\lambda_1 = \lambda$ ve $\lambda_2 = 1$ şeklinde uygulanır. Çift eksenli çekme deney düzeneği Şekil 7'de gösterilmiş olup, deneyler 6 adet numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Kare formundaki numuneye ait çift eksenli deney düzeneği

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Şekil 8'de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 8. Çift eksenli çekme testinin sonuç grafiği

2.4. Basma Testleri

Numuneye uygulanan kuvvete göre tek eksenli basma ve iki eksenli basma olarak ikiye ayrılmaktadır. Temelde çekme testine çok benzemekte olup gerilmelerin hesaplanmasında çekme testindeki formüller kullanılır. Son uzunluk ilk uzunluktan kısa

olacağından birim şekil değiştirme negatif çıkar. Fakat bu negatiflik sadece yön belirtir (Kanzenbach ve ark., 2019).

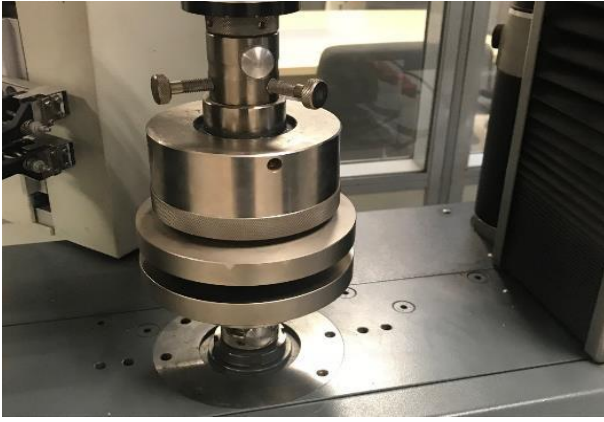
2.4.1 Tek Eksenli Basma Deneyleri

Kauçuk malzemelerinin doğrusal olmayan davranışları sebebiyle mekanik özelliklerinin hem çekme hem de basma için belirlenmesi gerekmektedir. Tek eksenli basma testi olarak sadece basit basma deneyi vardır. Basit basma deneyleri kolay uygulanabilir bir deneydir. Silindirik numune metal plakalar arasında yerleştirilir. Metal plakalara, tek eksenli çekme makinesiyle aksel kuvvet uygulanarak numune deformasyona uğrattılır (Huri ve ark., 2018).

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (4)$$

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

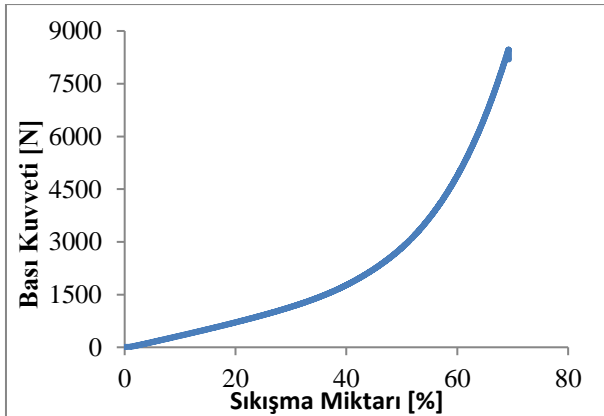
Tek eksenli basma deneyine ait deney düzeneği Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Tek eksenli basma test düzeneği

Bu testte metal plakalar ile kauçuk numune arasında ihmal edilemeyecek seviyede sürtünme oluşur. Bu sebeple kauçuk malzemelerde basma testi yerine iki eksenli eş çekme deneyleri tercih edilmektedir. Sürtünme katsayısı 0.1 dahi olsa kayma şekil değişimi olmaktadır. Bu durum ise ölçüm sonuçlarında hatalara sebebiyet vermektedir. Sürtünmenin olumsuz etkisi yağlama yapılarak azaltılabilmektedir. (Xu ve ark., 2018).

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Şekil 10'da verilen grafikte gösterilmiştir. Tek eksenli basma deneyi için 6 adet numune kullanılmıştır. Sonuçların kendi arasında değişkenliğine göre nominal değerlerde olan veriler sonlu elemanlar programına girilmiştir.



Şekil 10. Basma testi sonuç grafiği

2.4.2 Kayma Deneyi

Literatürde kayma testi olarak basit kayma deneyi yapılmaktadır. Diğer deneylerden farklı şekilde sadece homojen bir deformasyon çeşididir. Uygulanan kuvvetin yönü, test sırasında asal eksenin sabit kalmamasına sebep olmaktadır. Bu durum, basit kaymada safi deformasyonun görülebilmesine neden olur. Kauçuk malzemelerde kayma testi, numune metal plakalar arasında yapıştırılmış halde yapılır. Bu metal plakalardan biri sabit tutulurken diğerine bulunduğu düzlemde kuvvet etki eder (Ismail ve ark., 2018), (Soltani ve ark., 2019).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6)$$

τ kayma gerilmesi, F uygulanan kuvvet, A ise kuvvetin uygulandığı alandır. Kayma şekil değiştirmesi ise d kayma şekil değiştirmesi, t ise numune kalınlığı olmak üzere;

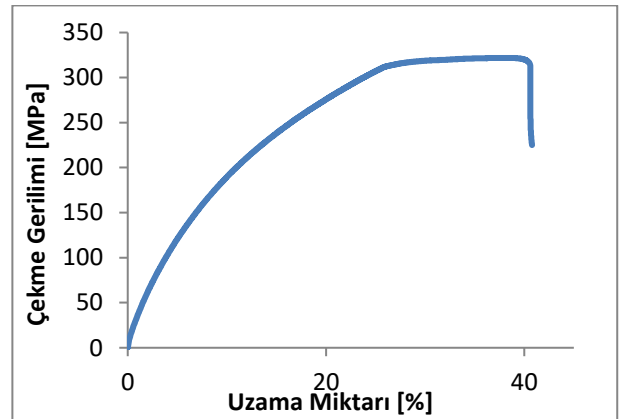
$$\gamma = \frac{d}{t} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır. Basit kayma deneyine ait deney düzeneği Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Kayma testi düzeneği

FEA yazılımına veri oluşturulması adına 6 adet basit kayma testi yapılmıştır. Nominal olarak değerlendirilen test sonuçları sonlu elemanlar yazılım programına girilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Şekil 12'de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 12. Basit kayma testi sonuç grafiği

2.5. Prototip Numune Testi

Prototip ürün ve sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için iki adet test yapılması kararlaştırılmıştır. Bu testlerde keçe radyal kuvveti ve araldit dökümüyle oluşacak montaj görüntüsü seçilmiştir (Yang ve ark., 2020), (Yakovlev, 2019). Keçelerde oluşabilecek sürtünme kuvvetinin tespit edilebilmesi için radyal kuvvetin tespit edilmesi gerekmektedir. Firma bünyesinde radyal yük ölçüm test cihazı üretilmiş olup testler fiziksel olarak yapılmıştır.

İkinci bir doğrulama metodu olarak araldit dökümüyle oluşan montaj görüntüsü kontrol edilmiştir. Bu kontrolün amacı kaç tırtılın temas ettiği bilgisinin elde edilemesidir. Numune keçeler özel bir yuvada Ø40 ölçüsündeki mil ile pozisyon kontrolü yapılarak montaj edilmiş ve özel bir yapıştırıcı kullanılarak 24 saat bekletilmiştir. Montaj hızı maksimum 1mm/saniye olacak şekilde belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra parça ortadan ikiye bölünerek dudak yapısı kontrol edilmiştir.

2.6. Keçe FEA Malzeme Modelinin Oluşturulması

Düşük elastikiyet modülü ve yüksek hacim modülü ile karakterize edilen kauçuk malzeme, çok çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle büyük elastik birim şekil değiştirme ve küçük hacim değişikliği gösterir (neredeyse sıkıştırılabilir malzeme) ve "Hiperelastik malzeme" olarak adlandırılır. Birim şekil değiştirme bileşenlerine çekme gerilim deformasyonunun skaler bir fonksiyonu olan elastik birim şekil değiştirme yoğunluk fonksiyonu (W) varsa, bir malzemenin hiperelastik olduğu söylenir. Bu sebeple hiperelastik yapısal model hem doğrusal olmayan malzemeye hem de büyük deformasyona sahiptir. Model seçimi, malzemenin uygulamalarına, ilgili değişkenlere ve mevcut verilere göre belirlenir. Kullanılan hiperelastik modellerden bazıları ve çalışma birim şekil değiştirme aralıkları şöyledir (Kumar ve ark., 2016), (Kim ve ark., 2012):

- Mooney-Rivlin (Sıkıştırmada %30, gerilmeye %200)
- Ogden (%700)
- Neo-Hookean (%30)

2.6.1 Mooney-Rivlin Modeli

Bu modelde belirli miktarda birim şekil değiştirme için gerilme durumu, birim şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunun türevleri olarak belirlenir. Birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu fonksiyonu şu şekilde:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{ij=0}^{n \rightarrow \infty} (C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j) \quad (8)$$

$$W = C_1 (\bar{I}_1 - 3) + C_2 (\bar{I}_2 - 3) \quad (9)$$

$$W = W(\bar{I}_1, I_2, J) = W(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + U(J) \quad (10)$$

karşılık gelen İkinci Piola Kirchhoff gerilimi ise şu şekilde verilir:

$$\bar{S} = \frac{\partial W(\bar{I}_1, \bar{I}_2)}{\partial E} \quad (11)$$

Mooney-Rivlin modelinin malzeme sabitlerinin doğrusal elastik kayma modülü G ile ilişkili olduğu doğrulanmıştır ve G aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$G = 2(C_1 + C_2) \quad (12)$$

2.6.2 Ogden Modeli

Bir Ogden modeli, kauçuk veya polimer gibi malzemelerin doğrusal olmayan gerilme-birim şekil değiştirme davranışını tahmin etmek için kullanılabilen hiperelastik bir malzeme modelidir. Ogden modeli için birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu fonksiyonu şu şekildedir:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=0}^{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\mu_r}{\alpha_r} \right) (\lambda_1^{\alpha_r} + \lambda_2^{\alpha_r} + \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (13)$$

λ_j , $j=(1,2,3)$ ana gerilme oranıdır. μ_i ve α_i ise deneysel olarak belirlenen malzeme sabitleridir.

Ogden modeli en yaygın kullanılan modeldir. O-ring ve conta gibi kauçuk malzemelerin analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ogden modeli, diğer analiz modellerinden farklıdır. Test verilerinin doğrudan kullanılabilmesi avantajlarına sahiptir ve çekme testi sonuçlarının % 700'üne kadar test verileri ile iyi bir uyumluluk gösterir. Bir kauçuk malzemenin davranışının analizinde Ogden modeli, test verilerini daha önce bahsedilen Mooney-Rivlin modelinden daha iyi açıklamaktadır çünkü eğriyi tanımlamada daha fazla esnekliğe sahiptir.

2.6.3 Neo-Hookean Modeli

Neo-Hookean modeli, malzemelerin gerilim-şekil değiştirme davranışını tahmin etmek için kullanılabilen hiperelastik bir malzeme modelidir. Hooke yasasına benzer şekilde uygulanan gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki ilişki başlangıçta doğrusaldır, ancak belirli bir noktada gerilim- birim şekil değiştirme eğrisi doğrusal olmayana dönüşür. Sıkıştırılmaz bir malzeme için Neo-Hookean birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu denklemi aşağıdaki gibidir:

$$W(I_1) = C_1 (I_1 - 3) \quad (14)$$

Neo-Hookean modeli, çapraz bağlı polimer zincirlerinin istatistiksel termodinamiğine dayanmaktadır. Kauçuk benzeri malzemeler için ilk doğrusal bölgenin kullanılması mümkündür. Çünkü çapraz bağlı polimerler, doğrusal durumlarda Neo-Hookean tarzında hareket ederler. Fakat belirli bir noktada polimer zincirleri kovalent çapraz bağların izin vereceği maksimum noktaya kadar gerilecektir. Bu durum, malzemenin elastiklik modülünde büyük bir artışa neden olacaktır. Neo-Hookean modelinin büyük gerilmelerde doğru bir tahmin verememe sebebi budur.

Malzeme testlerinin deneysel verileri Abaqus programına Şekil 13'de gösterilen şekilde yüklenmiştir.

	Nominal Stress	Nominal Strain
1	0	0.089050557
2	0.012018383	0.089703863
3	-5.54328E-06	0.088903975
4	-5.54328E-06	0.088977091
5	-5.54328E-06	0.088176275
6	-5.54328E-06	0.089049118
7	-5.54328E-06	0.086794831
8	-5.54328E-06	0.087230877
9	-5.54328E-06	0.089994811
10	0.047912598	0.13231257
11	0.132141113	0.15510649
12	0.180236816	0.167117657
13	0.264221191	0.178855843
14	0.360412598	0.191412962
15	0.468811035	0.20369711
16	0.577209473	0.215981259
17	0.721740723	0.227992426
18	0.877990723	0.240458562

Şekil 13. Test verilerinin Abaqus programına girilmesi

Hiperelastik davranış sergileyen malzeme tipi izotropik olarak seçilerek girişler yapılmıştır. Elde edilen tüm MS Excel verileri programa girildikten sonra Şekil 14'te gösterildiği şekilde malzeme değerlendirmeleri yapılarak stabilizasyon sağlanmıştır.

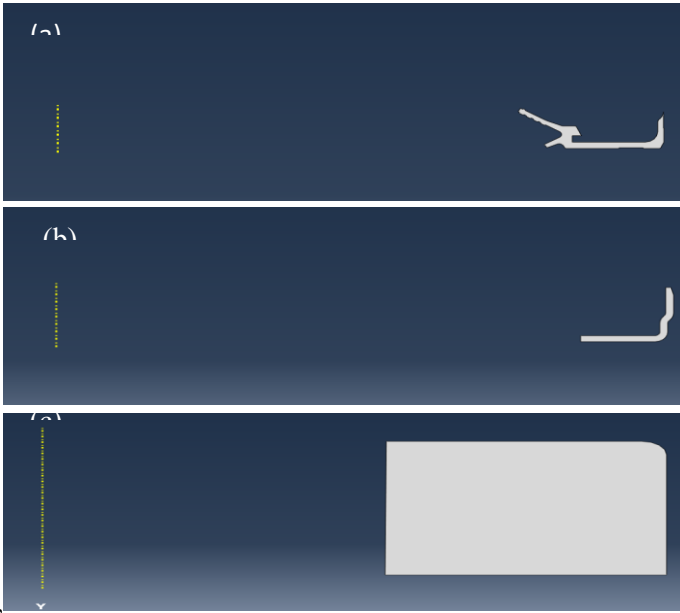
Yapılan deneyler üzerinden alınan veriler Abaqus sisteminde eşleştirilerek Mooney-Rivlin malzeme katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen katsayılar aşağıdaki Şekil 14'te verilmiştir. Mooney-Rivlin malzeme modeli kullanılmasının sebebi döner mil keçelerinin maksimum %5 deformasyon altında çalışmasıdır.

Data			
	C10	C01	D1
1	0.47	2.15	0

Şekil 14. Mooney-Rivlin malzeme katsayıları

2.7. Keçe'nin FEA Modelinin Oluşturulması

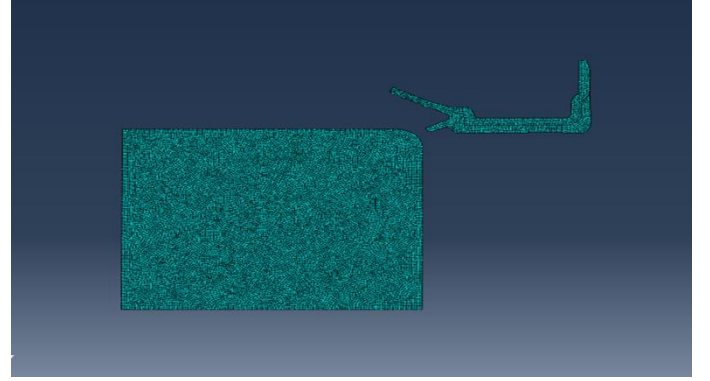
Çözüm süresinin kısa olması amacıyla aksel simetrik model ile çözüm oluşturulmuştur. Düşük sürtünme kuvvetinin sağlanması amaçlandığı için elastomer dudak yapımız da garter yayı kullanılmamıştır. Şekil 15'te dudak, metal bilezik ve mile ait aksel simetrik model keçe datası verilmiştir.



Şekil 15. Aksel simetrik keçe modeli; (a) Dudak, (b) Metal bilezik, (c) Mil

Metal bilezik elastomer malzeme yapısının rijit kalması için kullanılmaktadır. Montaj yapısının hazırlanması için ise mil modeli oluşturulmuştur. Analizi yapılacak ana modele ait alt

komponentler montaj kuralları çerçevesinde birleştirilerek montaj edilmiştir. Döner mil ve keçe dudağı arasında yüzey-yüzeve kontak ilişkisi etkileşimi kullanılmıştır. Keçe modelinin ağ yapısı oluşturulurken toplamda 14.795 adet mesh elemanı kullanılmıştır. Mesh elemanlarından 14.357 adeti CAX4H ve 438 adetide CAX3H elaman tipinden oluşmaktadır. Şekil 16'da analiz yapılacak malzeme modeline ait görüntü verilmiştir (Engin ve ark., 2019).



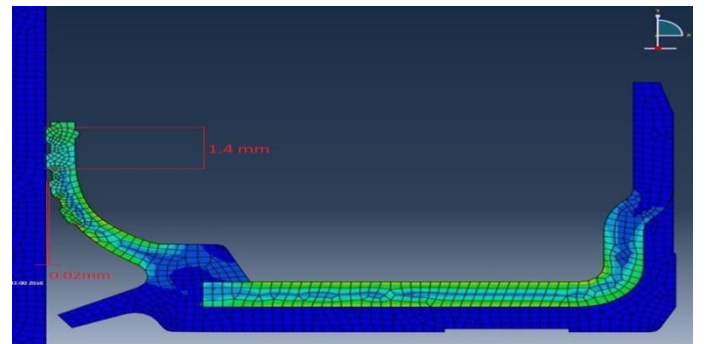
Şekil 16. Analiz öncesi malzeme modeli görüntüsü

Sızdırmazlık elemanları hiperelastik malzemeden imal edilen parçalar oldukları için gerilme-birim şekil değiştirme (strees-strain) değerlerini analitik olarak belirlenmesi oldukça zor olan parçalar olmasına rağmen iki boyutlu bir aksel simetrik sonlu elemanlar analiz (FEA) sayısal modeli, Mooney-Rivlin kauçuk malzemenin modeline ve arıza fonksiyonu temas algoritmasına dayalı olarak geliştirilmiş, gerilme, birim şekil değiştirme ve temas basıncının dağılımları analiz edilerek, gerçek bir arıza durumu ile karşılaştırılmıştır (Zhou ve ark., 2014).

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. FEA Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 17'de Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ait elde edilen çıktı gösterilmiştir.



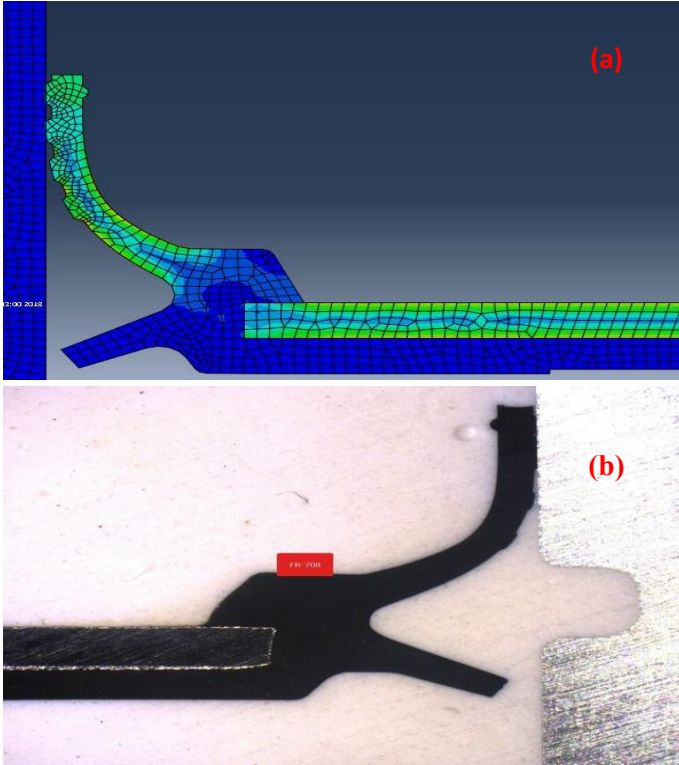
Şekil 17. FEA sonuçları

Şekil 17'de Von Misses gerilme teorisine göre sonuçlar görülmektedir. Analiz esnasında milin rijit eleman olarak tanımlanması sebebiyle herhangi bir gerilme değeri elde edilmemiş ve mavi renk olarak görülmüştür. Mile montaj olmuş koyu yeşil renkle gösterilmektedir. Metal destek bileziği üzerinde (a) bölgesi 2.2 MPa olarak maksimum gerilmeye maruz kalmaktadır. Keçe tasarım aşamasında iki tırtılın teması öngörülmüş olup yapılan analiz çalışması sonucunda da istenilen dudak teması sağlanmıştır.

Sonlu Eleman Analizleri fiziksel doğrulama yapılmadığı sürece bir anlam ifade etmemektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen montaj analizinin doğruluğunu kontrol etmek için keçe üreticilerinin kullandığı özel bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulamada keçe yuva sıklığında bir alüminyum parçaya montaj edilir. Bu durumda oluşan ikili sisteme gerçek mil boyutlarında yapılan alüminyum bir mil montaj edilir. Oluşan üçlü sisteme özel bir yapıştırıcı uygulaması yapılarak bir gün dondurulur. Dondurulmuş halde olan sistem tam ortadan kesilerek profil görüntüsü alınır. Şekil 18’de görüldüğü üzere Sonlu Eleman Analizi ve dondurulmuş kesit büyük bir uyum sağlamaktadır. Her iki durumda da iki tırtıl tam temas halinde ve üçüncü tırtıl temas etmek üzeredir.

3.2. FEA Sonuçları ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Araldıt dökülen numuneler ZEISS Smartzoom 5 markalı otomatik dijital mikroskop ile kontrol edilmiş ve gerekli ölçümler alınmıştır. Tablo 2’de karşılaştırma verileri görülmektedir.



Şekil 18. Sonlu elemanlar modeli ile deney sonuçlarının karşılaştırılması; (a) FEA modeli, (b) Prototip

Tablo 2. Hazırlanan kauçuk karışımına ait formülasyon

	Temas Eden Tırtıl Sayısı (adet)	Temas Genişliği (mm)	Son Tırtılın Temas Etmesi İçin Gerekli Mesafe (mm)
Prototip	2	1.43	0.04
FEA	2	1.4	0.02

3.3. Radyal Yük karşılaştırması: FEA-Deneysel

Prototip olarak üretilen keçelerin DIN 3761-9 standartına göre radyal yük ölçümleri yapılmıştır. Ardışık 6 numunenin ölçülen radyal kuvvet değerlerinin ortalaması alınmıştır. Deneysel olarak yapılan ölçümlerde radyal kuvvet değeri ortalama 6,3 N,

FEA sonucunda ise 7 N bulunmuştur. Sonuçlar arasındaki %9 fark oluşmuştur. Elastomer malzeme yapısından dolayı radyal kuvvet testlerinde ölçülen değerlerin kendi arasında $\pm\%20$ tolerans bulunmasından dolayı analitik ve deneysel olarak elde edilen sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

5. Sonuç

Bu çalışmada hem deneysel hem de sonlu eleman analiz modelleri sayesinde kauçuk yapıdan oluşan ERS’nin statik yükleme durumundaki radyal kuvvet, temas eden tırtıl sayısı ve temas yüzeyi incelenmiştir.

1. Deneysel olarak Ø40 mil ile yapılan montaj sonrası kontrollerde keçe dudağında iki adet tırtılın temas ettiği görülmüştür. Aynı şekilde FEA sonuçları da değerlendirildiğinde iki adet tırtılın temas ettiği tespit edilmiştir. Temas yüzeyleri incelendiğinde, FEA ile deneysel sonuçlar arasında %2 civarında bir sapma görülmüştür.
2. Sızdırmazlık elemanlarının ömrü için radyal kuvvet önemli parametrelerden biridir. Bu kapsamda deneysel ve FEA sonuçları arasında %9 oranında bir fark görülmüştür. Sızdırmazlık elemanlarında kullanılan elastomerlerin üretim dönem değişikliklerinden dolayı $\pm\%20$ ye kadar sapmaya izin verildiği bilinmekte olup bu sapma miktarı kabul edilebilir seviyededir.
3. Abaqus programında Sonlu Elemanlar Analizinin (FEA) yardımı ile modellenmiş olan sızdırmazlık elemanının montajı sırasındaki hareketi, reaksiyon kuvveti, dudakta meydana gelen diğer değişimler rahatlıkla gözlenmiştir.
4. Sızdırmazlık elemanının oluşturan yapıya ait malzeme özelliklerinin doğru yapılmış deneylerden elde edilmiş olması sapma miktarını azaltmıştır.
5. Deneysel ve FEA çalışmalarında oluşan sapmaların prototip üretim sürecinde oluşabilecek hatalardan kaynaklanabilmektedir.
6. Elde edilen veriler doğrultusunda gelecekte yapılması planan çalışmalarda, sızdırmazlık elemanlarının modellenmesi, FEA ile daha hızlı bir şekilde elde edebilir ve model üzerinde meydana gelen sorunları prototip ihtiyacı duymadan tasarım aşamasında çözüleceği görülmüştür.

5. Teşekkür

Bu çalışma için gerekli olan kompozit numunelerin ve test ekipmanının kullanımını sağlayan SKT Yedek Parça ve Makine San. ve Tic. A.Ş Arge Merkezi çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Johnston, D.E., Bond, R. (1984). A new concept in rotary shaft seal design suitable for truck and bus hub seal applications. SAE Technical Papers, 93(May), 1081–1091.
- Bien-aimé, L. K. M., Blaise, B. B., Beda, T. (2020). Characterization of hyperelastic deformation behavior of rubber-like materials. SN Applied Sciences, 2(4).

- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., Park, S. H. (2012). *A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(5), 759–764.
- Bhandari, A., Erdman, D., Bhatia, A., Strang, W. (2007). *Finite Element Analysis and Material Modeling of Elastomeric Components and Assemblies: Some Practical Considerations*. In SAE Technical Papers (Vol. 2007-January). SAE International.
- Li, W., Mays, S., Lam, D. (2002). *Material and finite element analysis of poly(tetrafluoroethylene) rotary seals*. Plastics, Rubber and Composites, 31(8), 359–363.
- Zhang, F. Y., Chen, J. L., Li, T. T., Zhang, Y. F. (2019). *Study and Optimization of Structural Parameters of Oil Seal by Response Surface Method*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 20(2), 255–265.
- Starostin, N.P., Vasileva, M.A. (2020). *Determination of Load-Speed Modes for Fluoroplastic Seals of Rotary Shaft by Temperature Limitation*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 459(6).
- Zhou, S. M., Chen, P., Shi, Y. (2015). *Analysis on Sealing Performance for a New Type of Rubber Saddle-shaped Sealing Ring Based on AQAQUS*. In Procedia Engineering (Vol. 130, pp. 1000–1009). Elsevier Ltd.
- Calonius, O., Pietola, M. (2005). *Explicit Finite Element Analysis of Tracking Capability of Rotary Face Seal for Industrial Fluid Power Applications*. Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, 2005(6), 328–333.
- Azura, A.R., Leow, S.L. (2019). *Effect of carbon black loading on mechanical, conductivity and ageing properties of Natural Rubber composites*. In Materials Today: Proceedings (Vol. 17, pp. 1056–1063). Elsevier Ltd.
- Li, H., Zhao, T., Chen, M. (2016). *Green tire and new type rubber materials*. Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin, 61(31), 3297–3303.
- Vahapoğlu, V. (2013). *Kauçuk Mekaniğinde Yapılan Deneyler*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (1), 33-60.
- Keerthiwansa, R., Javorik, J., Kledrowetz, J., Nekoksa, P. (2018). *Elastomer testing: The risk of using only uniaxial data for fitting the Mooney-Rivlin hyperelastic-material model*. Materiali in Tehnologije, 52(1), 3–8.
- Dalrymple, T., Choi, J., Miller, K. (2007). *Elastomer rate-dependence: a testing and material modelling methodology*. Meeting of the Rubber Division of, (October 2007). Retrieved from
- Abdullah, M.A. (2020). *Fundamental Considerations for Finite Element Modelling of Rubber Material Tensile Test*. International Journal of Engineering and Management Sciences, 5(2), 7–13.
- Sasso, M., Palmieri, G., Chiappini, G., Amodio, D. (2008). *Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods*. Polymer Testing, 27(8), 995–1004.
- Freitas, T.R. (2009). *Rubber sealing study applied to ball bearing components using finite element method*. In SAE Technical Papers. SAE International.
- Erkek, M., Kaya, N., Güven, C. (2015). *Kauçuk Burçların Hiperelastik Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi*. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 20 (1), 65-74. Retrieved from
- Fujikawa, M., Maeda, N., Yamabe, J., Kodama, Y., Koishi, M. (2014). *Determining Stress–Strain in Rubber with In-Plane Biaxial Tensile Tester*. Experimental Mechanics, 54(9), 1639–1649.
- Kanzenbach, L., Schlomka, C., Gelke, S., & Ihlemann, J. (2019). *Specimen design for extreme uniaxial tension-compression tests of rubber materials*. PAMM, 19(1).
- Huri, D., Mankovits, T. (2018). *Comparison of the material models in rubber finite element analysis*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 393). Institute of Physics Publishing.
- Xu, D., Han, B. H., He, W. H., Cheng, Z. G. (2018). *Research on compressive mechanical properties of metal rubber and its constitutive relation model*. Journal of Vibroengineering, 20(1), 332–344.
- Ismail, R., Ibrahim, A., Rusop, M., Adnan, A. (2018). *Determination of mechanical properties natural rubber compounds using double shear test pieces*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 9(8), 37–43.
- Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., Mirzababaei, M., Nikraz, H. (2019). *Interfacial shear strength of rubber-reinforced clays: A dimensional analysis perspective*. Geosynthetics International, 26(2), 164–183.
- Yang, Y., Ren, Z. Y., Bai, H., Shen, D., Zhang, B. (2020). *Study on the Mechanical Properties of Metal Rubber Inner Core of O-Type Seal with Large Ring-to-Diameter Ratio*. Advances in Materials Science and Engineering, 2020.
- Yakovlev, S.N. (2019). *An Experimental Study of the Wear of the Radial Shaft Seals of Rotary Shafts*. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 48(2), 179–183.
- Kumar, N., Rao, V. V. (2016). *Hyperelastic Mooney-Rivlin Model: Determination and Physical Interpretation of Material Constants*. MIT International Journal of Mechanical Engineering, 6(1), 43–46.
- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., Park, S. H. (2012). *A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(5), 759–764.
- Engin, B., Saraç, Yazıcı, M. (2019). *Finite element simulation of rotary shaft lip seals*. Acta Physica Polonica A, 135(5), 1072–1074.
- Zhou, Y., Huang, Z., Tan, L., Ma, Y., Qiu, C., Zhang, F., Yuan, Y., Sun, C., Guo, L. (2014). *Cone bit bearing seal failure analysis based on the finite element analysis*. Engineering Failure Analysis, 45, 292–299.