



# Sızdırmazlık Elemanlarının Sürtünmesinin Ağır Hizmet Araçlarının Tahrik Akslarının Verimliliği Üzerindeki Etkisi

Hasan Kasım<sup>1\*</sup>, Barış Engin<sup>2</sup>, İsmail Saraç<sup>3</sup>,

<sup>1\*</sup> Emsa Nano Teknoloji Enerji San. Ve Tic. A.Ş., Bursa, Turkey, (ORCID: 0000-0002-3024-5207), [hasankasim@emsaglobal.com](mailto:hasankasim@emsaglobal.com)

<sup>2</sup> SKT Yedek Parça Makina San. Ve Tic. A.Ş, R&D Center, Bursa, Turkey, (ORCID: xxx-xxxx-xxxx-xxxx), [barisengin@skt.com.tr](mailto:barisengin@skt.com.tr)

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

(İlk Geliş Tarihi 18 Kasım 2021 ve Kabul Tarihi 16 Aralık 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.1025469)

**ATIF/REFERENCE:** Kasım, H., Engin, B., Saraç, İ. (2021). Sızdırmazlık Elemanlarının Sürtünmesinin Ağır Hizmet Araçlarının Tahrik Akslarının Verimliliği Üzerindeki Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 655-660.

## Öz

Bu araştırmanın temel amacı şantiye kamyonlarında kullanılan tahrik akslarının enerji verimliliğini arttırmaktır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan pinyon dişlisinin dönme sırasındaki tork değerlerine ait veriler özel olarak geliştirilen tork ölçüm cihazıyla belirlenerek sıcaklık ve keçe hızının sürtünmeden kaynaklanan tork üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çeşitli kaplamalar deneyerek sürtünme kaynaklı tork azaltılmaya çalışılmıştır. Pinyon keçe üzerindeki tork değerleri teorik olarak hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sistemdeki tork kayıpları analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda 90°C'ye kadar devir sayının artmasıyla %25 civarında tork artışı olmuş, 90°C'den sonra malzemenin fiziksel özelliklerinde değişme meydana geldiği için tork değeri %30 civarında azalmış göstermiştir. Çalışmamız radyal kuvvet, sıcaklık, tork ve dönüş hızı arasında bir korelasyon kurulması yönünde devam edecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Kauçuk, Döner Mil Keçesi, Sürtünme, Tork Ölçümü, Sızdırmazlık Elemanı, Radyal Kuvvet.

## Effect of Seal Friction on The Efficiency of Drive Axles of Heavy Duty Vehicles

### Abstract

The main purpose of this research is to increase energy efficiency in drive axles used in construction site trucks. In this study, the data of the torque values of the pinion gear designed during rotation were collected with specially developed torque measurement equipment and the effect of temperature and speed drop on torque caused by friction was investigated. Various coatings have been tried to reduce friction-induced torque. Torque on pinion seal was calculated theoretically and compared with experimental data. As a result, torque losses in the system were evaluated. As a result of the evaluation, there was a 25% increase in torque with an increase in rotation speed up to 90 °C. After 90 °C, due to the change in the physical properties of the material, the torque value decreased by 30%. Our study will continue towards establishing a correlation between radial force, temperature, torque and rotational speed.

Keywords: Rubber, Rotary Shaft Seal, Friction, Torque Measurement, Sealing Element, Radial Force.

\* Corresponding Author: [hskasim@gmail.com](mailto:hskasim@gmail.com)

## 1. Giriş

1900 yıllardan beri elastomer dudaklı keçeler kamyon endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptir (Horve 1996). Bu sızdırmazlık elemanları motor, transmisyon, çeşitli makine, aks ve tekerlek sistemlerinde kullanılmakta olup yağlama tarafı ile hava tarafı arasında mikron mertebesinde bir yağ filmi ile set oluşturarak yağın dışarı sızması ya da iç kısma havadaki toz, kir, çamurun girmesini engellemektedirler (El Gadari ve ark., 2015). Bu sebepten dolayı keçe firmaları elastomer dudaklı keçeleri geliştirmeye yoğun bir mesai harcamaktadırlar. Keçe üreticileri keçe malzemesi, keçe geometrisi, keçeden kaynaklı sürtünme kaybı, mil yüzey pürüzlülüğü ve çalışma koşulları üzerine odaklanmaktadır. Bu Ar-Ge çalışmaları sayesinde keçe dudağında oluşan akış mekanizması açıklanmaya çalışılmaktadır.

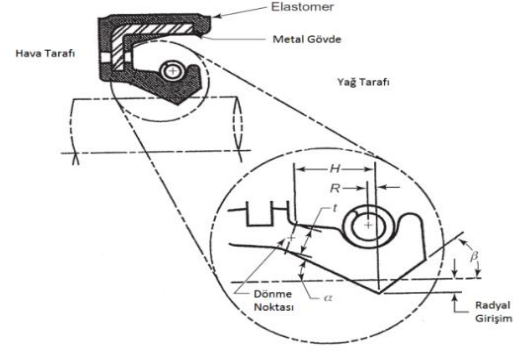
Normal koşullar altında döner mil keçeleri sınır yağlama şartlarında çalışmaktadır. İlk çalışma esnasında keçe dudağı ve mil yüzeyi arasında kuru yağlama oluşur. Keçe dudağı, mil ve yağlayıcı rejime girdiği durumda sistem sınır yağlama halindedir. Sınır yağlama halinde dudağın altında yağ filmi oluşmaktadır. Sınır yağlama durumunda olan sistem yük taşıma mekanizmasını destekler ve sızdırmazlık mekanizmasını sağlar (Shen ve ark., 2007; Salant 1992).

Geçmiş yüzyıllarda keçe sürtünme kaybı ve düşük sürtünme katsayılı keçeler üzerine çalışılmış olmasına rağmen kayda değer yeni bir bilgiye rastlanılmamıştır. Döner dudaklı keçenin sürtünmesini etkileyen parametreler arasında hız ve sıcaklığa ek olarak, keçe malzemesi, dudak tasarımı, mil çapı, yağ ve mil yüzey yapısının etkileri değerlendirilmiş, milin yüzey pürüzlülüğü, sızdırmazlık dudağının tasarımı ve kullanılan yağ tipinin etkisinin en büyük olduğu tespit edilmiştir (Johnston ve ark., 1995).

Döner dudaklı keçelerde oluşan sürtünme kaynaklı verim kaybının giderilmesi için keçe üreticileri ve araştırmacılar birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir (Frölich ve ark., 2014). Farklı özelliklerde yağların ve yağ katkı maddelerinin keçe sürtünme kaybına etkisi de incelemekte olup düşük viskoziteli motor yağlarının sızıntısız çalışması nedeniyle motor yağ keçesinin sürtünme kaybını azaltarak yakıt ekonomisini iyileştirmek amacıyla deneylerde kullanılmaktadır (Kim ve ark., 2008; Kanzaki ve ark., 1989). Aks sistemi üzerinde gerçekleştirilecek %0,5-3 arasında bir iyileştirme toplam araç üzerindeki iyileştirmeler açısından önemli bir paya sahip olacaktır.

Toplam enerji kayıpları dört ana başlık altında toplanabilir. Bunlar yağ çalkalaması, dişli sınır yağlaması, rulmanlar ve keçelerdir. Ağır tonajlı araçların akslarında sürtünmeden dolayı %5-15 arasında enerji kaybı meydana gelmektedir. Yüksek sürtünme aynı zamanda yüksek ısı oluşturmakta ve keçe ömrünü kısaltmaktadır. Yapılan çalışmalar aşınmanın keçe ve mil arasındaki açık bir ilişkiye bağlı olduğunu göstermiştir. Meydana gelen shaft aşınmasından elde edilen bulgular ile yağlayıcı-elastomer etkileşiminin karmaşık kombinasyonununun ait etkileri inceleyen hipotezler geliştirilmiştir (Burkhart ve ark., 2020).

Döner mil keçelerinin en önemli fonksiyonu yağın dışarı çıkmasını engellemek olmakla birlikte keçe ömrü ve sürtünme diğer ana performans parametreleri olarak gelmektedir. Şekil 1 de standart bir döner mil keçesi görülmektedir.



Şekil 1. Döner mil keçesi kesit görüntüsü

Döner mil keçelerinin sağladığı önemli uygulama avantajlarının başında düşük maliyet, kolay montaj, küçük montaj boşluğu ve efektif sızdırmazlık gelmektedir. Döner mil keçelerinin ömür dayanımı ise kaçak ve yağlama gerekliliğine bağlıdır. Bununla birlikte, mil ve keçe dudağı arasındaki bağlı hareketin hidrodinamik kaldırma yükü ve sızdırmazlık performansları üzerinde önemli etkileri vardır. Sürtünme torkunu azaltmak ve ters pompalamayı iyileştirmek için yeni nesil dokulu miller ortaya çıkmıştır. Şaftın dudak yüzeyinden daha yüksek bir hızda hareket ettirilmesinin, shaft hızının daha zayıf olduğu durumlara kıyasla önemli bir ters pompalama üretebileceği ve sürtünme torkunu önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir (Lahjouji ve ark., 2019; Guo ve ark., 2014).

Bununla birlikte artan hız, önemli sürtünme kayıplarına neden olmakta ve sistemin verimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Elastomer kayma yüzeyinin mikro yapısının geliştirilmesi ve yüzey işlemine dayanan radyal shaft keçelerinin sürtünme kayıplarını azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir (Keller ve ark., 2020; Balyakin ve ark., 2020). Yapılan araştırma çalışmalarında sistemde kullanılan çalışma yağı içerisindeki katkı maddeleri ve mil üzerindeki kaplamanın, sürtünme kayıplarının önemli ölçüde azaltılabildiğini ve sürtünme çiftinin aşınma direncini artırabildiğini göstermektedir (Votter ve ark., 1999).

Diğer tribolojik sistemler gibi döner mil keçesi ve mil sistemi fiyatının ucuz olmasına rağmen kısmen kompleks bir sistemdir. Sızdırmazlık olarak adlandırılan döner mil keçesi performansı keçe tasarımı, keçe malzemesi, mil malzemesi ve çalışma koşulları gibi parametrelere bağlıdır. Standart bir keçe tribolojik sisteminde üç ana bileşen vardır; keçe, mil ve yağ. Keçe sistemlerinde optimum tasarımı sağlamak oldukça zordur. Ancak üç ana etkenin iş birliği içinde çalışması durumunda optimum tasarım sağlanır (Flitney 2014).

Bu çalışmanın amaçları arasında keçe sürtünme torklarının ölçülmesi, tekerlek ve pinyon dişlilerinin sürtünme datalarının toplanması bulunmakta olup çalışmada aşağıdaki gibi spesifik konuların açıklığa kavuşturulması amaçlanmıştır:

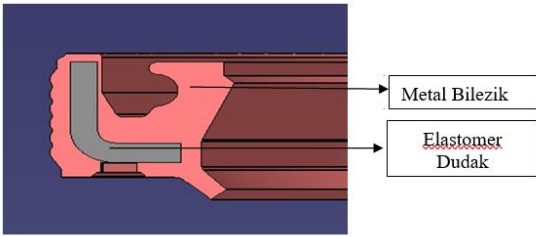
1. Keçe Sürtünme Torku Test Cihazı Geliştirilmesi,
2. Pinyon keçesi ve tekerlek keçesi sürtünme datalarının toplanması,
3. Kaplamanın keçe sürtünmesi üzerindeki etkisi,
4. Pinyon keçesinin sürtünme torkunun teorik olarak hesaplanması ve test datasıyla karşılaştırılması,
5. Keçe sürtünme torkunun tüm sistemle ilişkisinin incelenmesi,

6. Döner mil keçelerinin çalışma koşulları göz önüne alınarak tork, devir sayısı (Rpm) ve sıcaklık değerlerinin birbiriyle ilişkilerinin incelenmesi.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Döner Mil Keçesi

Pinyon keçesi çalışma şartları göz önüne alınarak mil çapı 40 mm, keçe yuvası çapı 70 mm ve yuva derinliği 8 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Tekerlek keçesi olarak kullanılacak keçenin ölçüsü mil çapı 105 mm, keçe yuvası çapı 125 mm ve yuva derinliği 15 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Her iki keçede toza ve çamura maruz kalacağı için toz dudaklı şekilde tasarlanmıştır. Toz dudak sıklıkları 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 2 de pinyon keçeğe ait kesit görüntüsü görülmektedir.



Şekil 2. Pinyon keçenin kesit görüntüsü

### 2.2. Keçe Sürtünme Tork Test Sistemi

Şekil 3 de gösterilen döner mil keçesi tork test cihazı tasarlanıp üretilmiştir. Döner mil keçesi test sistemleri keçe kaçaklarını görmek ve keçe ömrünü test etmek için tasarlanmıştır. Keçe test cihazı hız, sıcaklık ve tork kontrol kabiliyetine sahiptir. Hız, 10 Rpm den 10000 Rpm e kadar ulaşmaktadır. Sıcaklık, ortam sıcaklığından +200 °C e kadar ulaşmaktadır. Maksimum tork ölçme kabiliyeti 20Nm dir. Test esnasında kullanılacak mil aralığı 16mm den 250 mm'ye kadardır. Ayrıca test sistemi dinamik salgı, eksantrik bağlama gibi koşullara da uygundur.



Şekil 3. Döner mil keçesi tork ölçüm test cihazları

### 2.3. Pinyon Keçe Sürtünme Tork Test Prosedürü

Keçe sürtünme testlerinde şantiye kamyonlarında kullanılan SAE 75W-90 sentetik yağ kullanılmıştır. Test esnasında mil seviyesinin ortasına gelecek şekilde yağ kullanılmıştır. Keçe sürtünme tork değerleri 2000 Rpm, 80°C sıcaklık ve 24 saatlik ön çalışmadan sonra alınmıştır. Ön çalışma sonrası 1000 Rpm, 1500 Rpm, 2000 Rpm ve 2500 Rpm devirlerinde dört farklı

sıcaklıkta (70° C, 80° C, 90° C ve 100° C) keçe sürtünme torkları ölçülmüştür. Örnek bir test aşaması aşağıdaki gibidir;

1. Adım 80°C'de 2000 Rpm 24 saatlik ön çalışma
2. Adım 70°C'de 1000 Rpm'den 2500 Rpm'e kadar sürtünme torku ölçümü
3. Adım 80°C de 1000 Rpm'den 2500 Rpm'e kadar sürtünme torku ölçümü
4. Adım 90°C de 1000 Rpm'den 2500 Rpm'e kadar sürtünme torku ölçümü
5. Adım 100°C de 1000 Rpm'den 2500 Rpm'e kadar sürtünme torku ölçümü

Her devir değişiminde stabil olması için 10 dakika beklenmiştir. Her sıcaklık değişiminde stabil olunması için 2 saat beklenmiştir.

## 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

### 3.1. Pinyon Keçe Sürtünme Test Verileri

Pinyon Keçe Sürtünme Test Verilerinin elde edilmesinde Türkiye'nin öncü keçe firması SKT tarafından tasarlanan pinyon keçesi kullanılmıştır. Pinyon keçe çapı 76.2 mm'dir. Mil yüzey pürüzlülüğü Ra=0.37 µm, Rq=0.46 µm ve Rz=3.93 µm olarak Surfcom Flex Cihazında ölçülmüştür. Bu çalışmadaki pürüzlülük ortalaması Ra, pürüzlülük profili koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Ortalama karekök (RMS) pürüzlülüğü Rq, pürüzlülük profili yüksekliklerin karelerinin toplamının karekök ortalamasıdır. Rz ise örnekleme uzunluğundaki beş en yüksek tepe ile beş en derin çukur arasındaki mesafelerin ortalamasıdır.

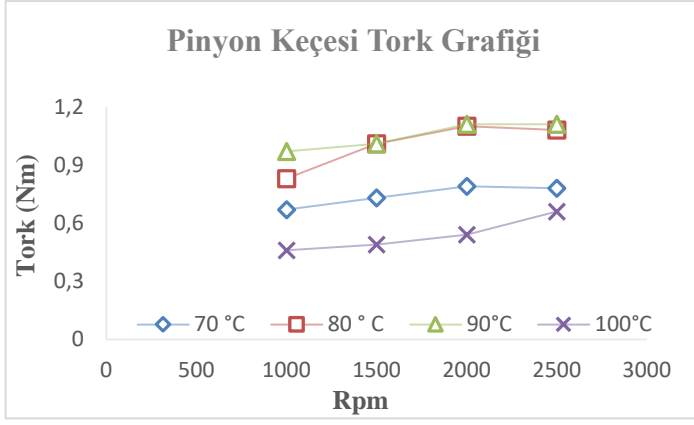
Döner mil keçelerinin çalışma millerinin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin DIN 3761-2 standardında Ra=0,2-0,8µm ve Rz =1-4µm olması gerekmektedir.

Pinyon keçe sürtünme tork test verileri Tablo 1 de verilmiştir. Tablo 1'den anlaşıldığı üzere 70°C'den 90 °C'ye artırılmasıyla tork değerlerinin de arttığı görülmektedir. Fakat 100°C'de pinyon keçenin tork değeri en düşüktür. Bu durum 100°C'deki test yağının viskozite değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca dönüş hızı arttıkça keçe sürtünme tork değeri artmaktadır. Fakat 2000 Rpm ve 100°C'de keçe sürtünme tork değeri stabil hale gelmektedir.

Tablo 1. Pinyon keçe sürtünme tork verileri

Devir Sayısı (rpm)	Sıcaklığa Bağlı Tork Değişimi (Nm)			
	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
1000	0,67	0,83	0,97	0,46
1500	0,73	1,01	1,01	0,49
2000	0,79	1,10	1,11	0,54
2500	0,78	1,08	1,11	0,66

Şekil 4'de devir sayısı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak pinyon keçesi sürtünme torku verileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



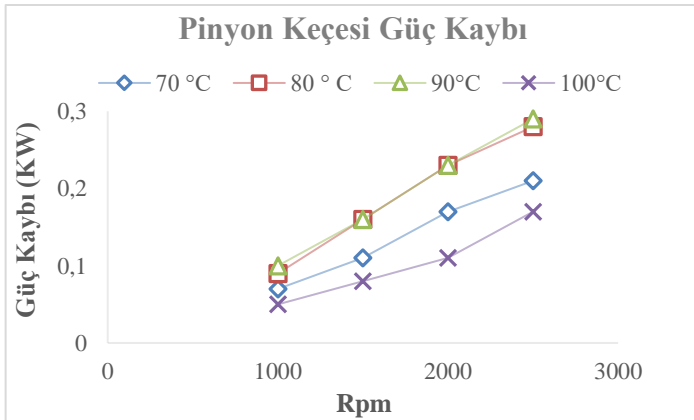
Şekil 4. Devir sayısı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak pinyon keçesi sürtünme torku verileri

Tablo 2’de test hızı ve sıcaklığının bir fonksiyonu olarak sürtünmeden kaynaklanan pinyon keçesi güç kaybına ait değerler verilmiştir.

Tablo 2. Pinyon keçe güç kaybı verileri

Devir Sayısı (rpm)	Sıcaklığa Bağlı Güç Kaybı (KW)			
	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
1000	0,07	0,09	0,10	0,05
1500	0,11	0,16	0,16	0,08
2000	0,17	0,23	0,23	0,11
2500	0,21	0,28	0,29	0,17

Keçe sürtünme torku dataları ölçülmüş, güç kaybı verileri, sürtünme torku ve dönme hızına bağlı olarak hesaplanmıştır. Pinyon keçe güç kaybı hız arttıkça artmaktadır. 100°C’de keçe güç kaybı minimum seviyededir. 80°C’de ve 90°C’de pinyon keçe güç kaybı maksimum noktada seyretmektedir. Şekil 5’de pinyon keçesi güç kaybı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5. Devir sayısı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak pinyon keçesi güç kaybı verileri

### 3.2. Radyal Kuvvet-Pinyon Keçe Sürtünme Tork İlişkisi

Döner mil keçelerinin sızdırmazlık görevini yerine getirmede en önemli parametrelerden biri radyal kuvvettir. Keçe radyal kuvveti ve keçe sürtünme tork ölçümleri arasındaki ilişkiyi görebilmek için çalışmamızda 5 farklı pinyon keçe kullanılmıştır. Pinyon keçe radyal kuvvetleri SKT firmasının kendi ürettiği cihazdan şekil 6’da görüldüğü gibi ölçülmüştür. Radyal yük ölçüm cihazı üst taşıyıcı ve destek tablasından oluşmaktadır. Tablanın bir bölgesine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Pinyon keçe üst taşıyıcı yer alan bölgeye yerleştirildiği zaman alt tabladaki kuvvet sensörü etkilenir ve radyal kuvvet ekrandan okunur.



Şekil 6. Pinyon keçesi radyal kuvvet ölçüm cihazı

Keçe sürtünme torku 2000 Rpm ve 80°C’de 24 saatlik ön çalışmadan sonra 2000 Rpm’de 100°C’de ölçülmüştür. Pinyon keçe radyal yük-tork ilişkisi Tablo 3’te özetlenmiştir. Tablo 3’te görüldüğü üzere pinyon keçe radyal yük sapması ve tork sapması oldukça düşüktür.

Tablo 3. Pinyon keçe radyal yük ve sürtünme torku.

Keçe No	Yük (N)	Tork (Nm)
1	31,70	0,55
2	36,10	0,53
3	33,00	0,63
4	31,20	0,47
5	29,60	0,49
Ortalama	32,30	0,53
Standart Sapma	2,40	0,06

### 3.3. Kaplamaların Pinyon Keçe Sürtünme Tork Değerine Etkisi

Pinyon keçe sürtünmesini azaltmak için birkaç farklı çeşit polimer kaplaması uygulanarak keçeler test edilmiştir. XYLAN kaplaması milin üzerine uygulanırken diğer kaplamalar keçe dudağına uygulanmıştır. Sürtünme tork ölçümleri ön alıştırma test periyodu tamamlandıktan sonra yapılmıştır. Test dataları



Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'ten anlaşılacağı üzere sadece kaplama, 2 nolu keçenin sürtünme tork değerlerini düşürmüştür. Diğer kaplamalar keçe sürtünme tork değerini düşürecek bir etki oluşturmamıştır.

Tablo 4. Kaplama uygulanan pinyon keçe sürtünme torku test verileri

Keçe No	Tork (Nm)	Yüzde Değişim
Kaplamasız Keçe	0,53	-
Xylan Kaplamalı Mil	0,84	+ 58%
Dudak Kaplaması -1-	0,66	+ 25%
Dudak Kaplaması -2-	0,43	-19 %
Dudak Kaplaması -3-	0,56	Aynı
Dudak Kaplaması -4-	0,51	Aynı

Bu kaplama denemelerinden beklenen düzeyde efektif bir sonuç alınamamıştır. Bu sebeple diğer teknolojilerin araştırılmasına devam edilecektir. Keçe üreticileri keçe tasarımı, keçe malzemeleri ve keçe dudak desenleri üzerine uzun yıllardan beri çalışmaktadır.

### 3.4. Aks Keçesi Sürtünme Tork Değerleri

Aks keçesi sürtünme tork testleri 500 Rpm, 80°C'de SAE 75W-90 yağ kullanılarak yapılmıştır. Ön alıştırma testi 80°C'de 500 Rpm devir altında 24 saat olarak yapılmıştır. Aks keçesinin çalıştığı mil çapı 127 mm dir. Testler 6 tekrar olarak yapılmıştır. Aks keçesi sürtünme torku ve güç kaybı Tablo 5'te gösterilmiştir. Keçe sürtünme tork datası ölçüldükten sonra güç kaybı hesabı, sürtünme torkuna ve dönme hızına bağlı olarak hesaplanmıştır. Tablo 5'ten anlaşıldığı üzere aks keçesinin sürtünme tork değeri pinyon keçeye göre daha yüksektir. Aks keçesinin güç kaybı ise pinyon keçeye göre daha az olmaktadır. Bunun sebebi de aks keçesinin dönüş hızının pinyon keçeye göre daha düşük olmasıdır.

Tablo 5. Aks keçesi sürtünme torku ve güç kaybı test verileri

Test No	Tork(Nm)	Güç Kaybı (KW)
1	1,61	0,080
2	1,71	0,085
3	2,32	0,115
4	2,39	0,119
5	2,00	0,100
6	1,40	0,070
Ortalama	1,91	0,090
Standart Sapma	0,4	0,020

### 3.5. Pinyon Keçesi Sürtünme Tork Değeri Hesaplamaları ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Bu bölümde pinyon keçe sürtünme tork değeri hesaplanmış ve 2000 Rpm ve 100°C'de yapılmış test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Keçe sürtünme torku (T) aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır:

$$T = \mu Rk r + 2 \pi \left(\frac{w}{h}\right) \eta u r^2 \quad (1)$$

Burada;

T : Keçe Sürtünme Torku (Nm)

$\mu$  : Sürtünme Katsayısı

Rk: Radyal Yük (N)

r : Mil yarıçapı (m)

w : Yağlanmış Kontak Yüzeyi (m)

h : Ortalama film kalınlığı (m)

$\eta$  : Mutlak viskozite (Ns/m<sup>2</sup>)

u : Mil Hızı (m/s)

İlk terim katı katıya kontak durumundan oluşan sürtünme tork değeri olup ikinci terim ise Newton Yağ viskoz sürtünme terimidir. Keçe sürtünme tork değerinin yukarıdaki denklemden 2000 Rpm ve 100°C'de hesaplanması durumunda test sonuçlarına göre sürtünme torku 0,53 Nm'dir.

$r = 0,0381$  m,  $Rk = 32$  N,  $W = 0,1$  mm,  $h = 1$   $\mu$ m,  $u = 8$  m/s ve 100°C'de yoğunluk 0,878 gr/cm<sup>3</sup>'tür.

$$\eta = 0.0013 \text{ N S/m}^2$$

Verilerin yerine koyulması sonucunda Newton Viskoz Torku 0,0095 Nm ve Sürtünme katsayısının 0,37 civarında olduğu tahmin edilmektedir. Veriler eşliğinde yapılan hesaplamalar sonucunda sürtünme torku 0,46 Nm olarak belirlenirken test datalarında bu değer 0,53 Nm olduğu görülmüştür. Standart sapması ise 0.07 Nm'dir.

Tablo 6'da teorik hesaplamalar sonucu ve deneylerden elde edilmiş tork değerleri kıyaslanmıştır.

Tablo 6. Tork Değerleri

Teorik Tork (Nm)	Deneysel Tork (Nm)	Standart Sapma
0,46	0,53	0,07
0,43	0,47	0,04
0,49	0,56	0,07
0,45	0,51	0,06
0,44	0,51	0,07

Yapılan beş deney sonucunda maksimum standart sapma 0,07 Nm olarak bulunmuştur.

## 4. Sonuç

1. Ağır şartlarda çalışan kamyonların 2000 Rpm ve 100°C'de pinyon keçe sürtünmeleri 0,53 Nm ve standart sapması 0,06 Nm olarak bulunmuştur.
2. Aks keçesinin sürtünme torku ise 500 Rpm ve 80°C'de 1,91 Nm ve standart sapması 0.4 Nm'dir.
3. Hem dönüş hızı hem de sıcaklık keçe sürtünme torklarını etkilemektedir.
4. Polimer kaplamaları keçe sürtünme torklarını azaltacak yönde etki göstermemiştir.
5. Johnston ve Vogt tarafından geliştirilen metotla hesaplanan keçe sürtünme tork değerleri, test sonuçlarıyla uyum göstermiştir.

## 5. Teşekkür

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

## Kaynakça

- Horve, L. (1996). Shaft Seals for Dynamic Applications (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367803100>
- El Gadari, M., Fatu, A., & Hajjam, M. (2015). Shaft roughness effect on elasto-hydrodynamic lubrication of rotary lip seals: Experimentation and numerical simulation. *Tribology International*, 88, 218–227.
- Shen, D., & Salant, R. F. (2007). An unsteady mixed soft EHL model, with application to a rotary lip seal. *Tribology International*, 40(4), 646–651.
- Salant R.F. (1992) On The Sealing Mechanism Of Lip Seals Containing Microundulations. In: Nau B.S. (eds) Fluid Sealing. Fluid Mechanics and its Applications, vol 8. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2412-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2412-6_4)
- Johnston, D.E., & Vogt, R. (1995). Rotary shaft seal friction, the influence of design, material, oil and shaft surface. In SAE Technical Papers. SAE International.
- Frölich, D., Magyar, B., & Sauer, B. (2014). A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals. *Wear*, 311(1–2), 71–80.
- Kim, H.G., Jeon, S. I. (2008). Effect on friction of engine oil seal with engine oil viscosity. *International Journal of Automotive Technology*, 9(5), 601–606.
- Kanzaki, Y., Kanno, T., & Kawahara, Y. (1989). A study of blistering phenomenon on rubber seals.
- Burkhart, C., Emrich, S., Kopnarski, M., Sauer, B. (2020). Excessive shaft wear due to radial shaft seals in lubricated environment. Part I: Analysis and mechanisms. *Wear*, 460–461.
- Lahjouji, I., El Gadari, M., & Radouani, M. (2019). Numerical investigation of grooved shaft effects on the rotary lip seal performance with relative lip motion. *Lubricants*, 7(2).
- Guo, F., Jia, X., Gao, Z., Wang, Y. (2014). The effect of texture on the shaft surface on the sealing performance of radial lip seals. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 57(7), 1343–1351.
- Keller, D., Jacobs, G., Neumann, S. (2020). Development of a low-friction radial shaft seal: Using cfd simulations to optimise the microstructured sealing lip. *Lubricants*, 8(4).

- Balyakin, V. B., Falaleev, S. V. (2020). Methods and Means of Reducing Friction Torque in Face Seals. *Journal of Friction and Wear*, 41(5), 447–452.
- Votter, M., Wollesen, V. (1999). New tribotechnical materials for the friction pair radial lip seal/shaft. *Industrial Lubrication and Tribology*, 51(5), 233–238.
- Flitney, R. (2014). *Seals and Sealing Handbook: Sixth Edition*. Seals and Sealing Handbook: Sixth Edition (pp. 1–633). Elsevier Inc.