

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİÜRETANDAN YAPILMIŞ DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELAMANLARININ
SÜRTÜNME KARAKTERİSTİĞİNE RADYAL ÖN GERİLMENİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilek BULUT

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİÜRETANDAN YAPILMIŞ DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELAMANLARININ
SÜRTÜNME KARAKTERİSTİĞİNE RADYAL ÖN GERİLMENİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Dilek BULUT
(503121207)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Vedat TEMİZ

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121207 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Dilek BULUT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**POLİÜRETANDAN YAPILMIŞ DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELAMANLARININ SÜRTÜNME KARAKTERİSTİĞİNE RADYAL ÖN GERİLMENİN ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur

Tez Danışmanı : **Y. Doç. Dr. Vedat TEMİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Cemal BAYKARA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Cüneyt Fetvacı**
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Aralık 2014
Savunma Tarihi : 19 Ocak 2015

Aileme,

ÖNSÖZ

Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının sürtünme karakteristiklerine çapsal yükün etkisinin deneysel olarak belirlenmesi üzerine yapılan bu yüksek lisans çalışmasında bana yardımcı olan ve yol gösteren sayın hocam Y. Doç. Dr. Vedat TEMİZ'e teşekkürlerimi ve minnetimi sunarım. Çalışma süresince ilgisini ve değerli önerilerini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Y. Doç. Dr. Zeynep PARLAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Labaratuvar çalışmalarımın başından sonuna dek teknik desteğini esirgemeyen ve her daim ilgiyle yardımcı olan Orhan KAMBUROĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışma süresince karşılaştığım problemlere ilgiyle yaklaşan ve desteklerini sunan sayın hocalarım Öğr. Gör. Dr. S. Ergün BOZDAĞ ve Öğr. Gör. Dr. Emin SÜNBÜLOĞLU'na teşekkürü borç bilirim. Gerek tez boyunca gerekse yüksek lisans eğitimim süresince önerileri ve desteğiyle yanımda olan çalışma arkadaşım Ar. Gör. Ersin KAMBUROĞLU'na yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü desteğini hiçbir zaman esirgememiş olan Buğra B. ERKOL'a ve tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2015

Dilek Bulut
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür	2
2. SIZDIRMAZLIK KAVRAMI	5
2.1 Difüzyon.....	6
2.2 Konveksiyon.....	6
2.3 Basınç Farkından Dolayı Akış	6
2.4 Sızdırmazlık Elemanlarının Temel Yapısı	6
3. SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI.....	9
3.1 Dönel Dudaklı Sızdırmazlık Elemanları	13
3.2 Dönel Dudaklı Keçe Çeşitleri	14
3.2.1 Yaysız keçeler	14
3.2.2 Yaylı keçeler	15
3.3 Dönel Dudaklı Sızdırmazlık Elemanlarının Bölümleri	16
3.3.1 Metal bilezik	18
3.3.2 Garter yayı.....	19
3.3.3 Dönel dudaklı keçelerde elastomer kısım	20
3.3.4 Dönel dudaklı keçelerde kullanılan elastomer malzemeler	22
3.3.4.1 Nitril butadien kauçuk (NBR).....	22
3.3.4.2 Yüksek yoğunluklu nitril butadien kauçuk (HNBR)	22
3.3.4.3 Poliakrilik kauçuk (ACM).....	23
3.3.4.4 Etilen akrilik (AEM)	23
3.3.4.5 Silikon (VMQ)	23
3.3.4.6 Fluorosilikon (FVMQ).....	24
3.3.4.7 Floroelastomer (FKM)	24
3.3.4.8 Politetra fluoroetilen (PTFE).....	24
3.3.4.9 Termoplastik poliüretan (TPU)	25
3.3.4.10 Hidrolize karşı dayanıklı termoplastik poliüretan (H-TPU)	26
3.3.4.11 Kendinden yağlayıcı termoplastik poliüretan (S-TPU)	27
4. SIZDIRMAZLIK MEKANİZMASI	31
4.1 Dinamik Sızdırmazlık Mekanizması	31
4.1.1 Mikro sızdırmazlık mekanizması	31
4.1.1.1 Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanının yüzeyi.....	33
4.1.1.2 Mil yüzeyi	34
4.1.1.3 Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında dudak geometrisi	35

4.1.1.4 Çapsal yük	36
4.1.2 Makro sızdırmazlık mekanizması	40
4.2 Dönel Dudaklı Sızdırmazlık Elemanlarının Performansına Etkiyen Parametreler.....	41
4.2.1 Mil tasarımı	41
4.2.2 Keçe yuvası tasarımı	42
4.2.3 Yağ sıcaklığı.....	43
4.2.4 Mil yuva kaçıklığı	43
4.2.5 Dinamik kaçıklık	44
4.2.6 Açısal kaçıklık.....	45
4.2.7 Yağlayıcı	45
4.2.8 Yağ seviyesi	45
4.2.9 Basınç	45
4.2.10 Çevreden gelen kirletici maddeler ve toz dudağı	46
5. DENEY TESİSATI VE DENEYİN YAPILIŞI.....	47
5.1 Deney Tesisatı	47
5.2 Mil	49
5.3 Keçe Yuvası-Kapak.....	49
5.4 Deney Şartları ve Deney Numuneleri.....	50
5.5 Deneyin Yapılışı.....	51
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	53
KAYNAKLAR.....	57
EKLER.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	79

KISALTMALAR

ACM	: Poliakrilik Kauçuk
ACN	: Akronitril
AEM	: Etilen Akrilik Kauçuk
FVMQ	: Fluorosilikon Kauçuk
FKM	: Floroelastomer Kauçuk
HNBR	: Yüksek Yoğunluklu Nitril Butadien Kauçuk
H-TPU	: Hidrolize Karşı Dirençli Termoplastik Poliüretan
NBR	: Nitril Butadien Kauçuk
PTFE	: Politetra Fluoroetilen
Ra	: Mil Yüzey Pürüzlülüğü
TPU	: Termoplastik Poliüretan
S-TPU	: Kendinden Yağlamalı Termoplastik Poliüretan
VMQ	: Silikon

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : TPU'nun özellikleri.....	26
Çizelge 3.2 : TPU ve NBR'nin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	26
Çizelge 3.3 : H-TPU'nun özellikleri.....	27
Çizelge 3.4 : S-TPU'özellikleri.	28
Çizelge 4.1 : Keçe iç çapı toleransları (RMA-Kauçuk Üreticileri Birliği).	39
Çizelge 5.1 : Deneyde kullanılan yağın fiziksel özellikleri.....	48
Çizelge 5.2 : Deney matrisi.	50
Çizelge A.1 : 40, 39,80 ve 39,60 mm iç çaplarındaki TPU keçeler için 0,5 ve 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.	61
Çizelge A.2 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki H-TPU keçeler için 0,5 ve 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.	62
Çizelge A.3 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki S-TPU keçeler için 0,5 ve 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sızdırmazlık Kavramı.....	5
Şekil 2.2 : Sızdırmazlık sisteminin temel yapısı.....	7
Şekil 3.1: Sızdırmazlık Elemanlarının Sınıflandırılması.....	9
Şekil 3.2 : Statik uygulamalar için kullanılan sızdırmazlık elemanları.....	10
Şekil 3.3 : Lineer hareket yapan miller için kullanılan sızdırmazlık elemanları.....	10
Şekil 3.4 : Lineer hareket yapan miller için kullanılan temaslı sızdırmazlık elemanları.....	11
Şekil 3.5 : Temassız sızdırmazlık elemanları.....	12
Şekil 3.6 : Elastomer dönel sızdırmazlık elemanlarının gelişimi.....	13
Şekil 3.7 : Yaysız Keçeler.....	14
Şekil 3.8 : Yaylı Keçeler.....	15
Şekil 3.9 : Yaylı Keçeler.....	15
Şekil 3.10 : İki ortamı ayırmak için kullanılan yaylı keçeler.....	16
Şekil 3.11 : Keçe kesit görünüşü.....	16
Şekil 3.12 : Keçe kesit görünüşü.....	17
Şekil 3.13 : Keçe-yuva teması.....	18
Şekil 3.14 : Keçe dış çapı tasarımları.....	19
Şekil 3.15 : Garter yayı.....	20
Şekil 3.16 : Metallerin Hooke kanununa göre davranışı.....	21
Şekil 3.17 : Termoplastik poliüretan malzemesinden bir dudaklı keçe.....	26
Şekil 3.18 : H-Termoplastik poliüretan malzemesinden bir dudaklı keçe.....	27
Şekil 3.19 : Yağlanmış çelik üzerinde test edilen S-TPU ve H-TPU malzemelerinin sürtünme katsayıları.....	28
Şekil 3.20 : S-Termoplastik poliüretan ve değişik malzemelerin hıza göre sürtünme katsayıları.....	29
Şekil 3.21 : S-Termoplastik poliüretan ve değişik malzemelerin 14 saat 5 Mpa yüke maruz kaldıktan sonra sürtünme katsayıları.....	29
Şekil 3.22 : S-Termoplastik poliüretan malzemesinden bir dudaklı keçe.....	30
Şekil 4.1 : Dönel dudaklı keçede radyal temas basıncı ve teğetsel sürtünme profili.....	32
Şekil 4.2 : Keçe dudağında mikrodalgalanma ve mikropürüz.....	33
Şekil 4.3 : Mikropürüzlerin kayma gerilmesi altındaki görünüşleri.....	34
Şekil 4.4 : Dönel sızdırmazlık elemanının dudak yapısı.....	35
Şekil 4.5 : Dönel sızdırmazlık elemanının montajdan sonra sıkışmış dudak çapı.....	37
Şekil 4.6 : Dönel sızdırmazlık elemanında çapsal yükü oluşturan bileşenler.....	37
Şekil 4.7 : Dönel sızdırmazlık elemanlarında çapsal yükün mikropompalamaya etkisi.....	38
Şekil 4.8 : Dönel sızdırmazlık elemanlarında çapsal yükün sürtünme momentiyle ilişkisi.....	38
Şekil 4.9 : Dönel sızdırmazlık elemanlarında çapsal yükün temas bölgesindeki sıcaklığa etkisi.....	39
Şekil 4.10 : Makro sızdırmazlık mekanizması.....	40
Şekil 4.11 : Mil ucu pah ve yuvarlatma ölçüleri.....	42

Şekil 4.12 : Mil yuva kaçıklığı.....	44
Şekil 5.1 : Deney tesisatının şematik görünüşü	47
Şekil 5.2 : Deney tesisatının prensip şeması	47
Şekil 5.3 : Deney tesisatının genel görünüşü	48
Şekil 5.4 : Keçe yuvasının kesit görünüşü	49
Şekil 5.5 : Veri toplama	51
Şekil A.1 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki TPU keçeler için 0,5 bar altında sürtünme momenti değerleri.....	61
Şekil A.2 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki TPU keçeler için 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.....	62
Şekil A.3 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki H-TPU keçeler için 0,5 bar altında sürtünme momenti değerleri.....	63
Şekil A.4 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki H-TPU keçeler için 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.....	63
Şekil A.5 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki S-TPU keçeler için 0,5 bar altında sürtünme momenti değerleri.....	64
Şekil A.6 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki S-TPU keçeler için 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.....	65
Şekil A.7 : 0,5 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.....	65
Şekil A.8 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.....	66
Şekil A.9 : 0,5 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.....	66
Şekil A.10 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.....	67
Şekil A.11 : 0,5 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.....	67
Şekil A.12 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.....	68
Şekil A.13 : 0,3 bar altında TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	68
Şekil A.14 : 0,3 bar altında TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	69
Şekil A.15 : 0,3 bar altında TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	69
Şekil A.16 : 0,3 bar altında H-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	70
Şekil A.17 : 0,3 bar altında H-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	70
Şekil A.18 : 0,3 bar altında H-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	71
Şekil A.19 : 0,3 bar altında S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	71
Şekil A.20 : 0,3 bar altında S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	72
Şekil A.21 : 0,3 bar altında S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	72
Şekil A.22 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	73

Şekil A.23 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	73
Şekil A.24 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	74
Şekil A.25 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	74
Şekil A.26 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	75
Şekil A.27 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	75
Şekil A.28 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	76
Şekil A.29 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	76
Şekil A.30 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.....	77

POLİÜRETANDAN YAPILMIŞ DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELAMANLARININ SÜRTÜNME KARAKTERİSTİĞİNE RADYAL ÖN GERİLMENİN ETKİSİ

ÖZET

Sızdırmazlık elemanları mekanik sistemlerin düzgün çalışmasında önemli bir rol oynar. Makine teknolojisinin gelişmesiyle orantılı olarak sızdırmazlık elemanlarının da geliştirilmesi ve bu elemanların sızdırmazlık mekanizmalarının iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

Sızdırmazlık elemanlarının performansına etkiyen tasarımla ve uygulama şartlarıyla ilgili pek çok faktör vardır. Bu faktörlerin en önemlilerinden biri de radyal yüküdür. Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında radyal yük garter yayından ve mil ile keçe dudağı arasındaki sıkılıktan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada radyal yükü oluşturan faktörlerden biri olan sıkılığın dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının sürtünme karakteristiğine etkileri araştırılmıştır. Sızdırmazlık kavramı tanımlanmış ve sızdırmazlık elemanları tanıtılmıştır. Dönel sızdırmazlık elemanları detaylı olarak incelenmiş ve sızdırmazlık mekanizmasının çalışma prensibi hakkında bilgi verilmiştir. Keçe performansına etkiyen faktörlere değinilmiş ve radyal ön gerilmenin etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Tezde radyal ön gerilmenin dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının performansına etkisini araştırmak amacıyla bir silindir ve dört yük hücresinden oluşan bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Keçe dudağı ve mil arasındaki sıkılığın değiştirilmesi sonucu farklı radyal ön gerilmelere sahip olan keçelerin çalışması esnasında oluşan sürtünme momentlerini ölçmek amacıyla iki grup deney yapılmıştır. Test edilecek keçeler termoplastik poliüretan malzemeden imal edilmiş ve keçe iç çap olarak 40, 39,80 ve 39,60 mm değerleri seçilmiştir. Birinci grup deneylerde keçeler, 0,5 ve 0,3 bar basınç altında kısa bir süre için test edilerek sürtünme momenti değerleri elde edilmiştir. Testler üç farklı hızda (1, 3, 5 m/s) gerçekleştirilmiştir. İkinci grup deneylerde ise keçeler 10.000 m'ye kadar çalıştırılmış kaçak gözlemi ve sürtünme momenti ölçümü yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda öncelikle farklı ölçülerdeki keçe iç çapları için sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra üç farklı keçe malzemesinin aynı iç çap değerleri için sürütünme momentleri kıyaslanmıştır.

Deneyler boyunca elde edilen verilere göre sıkılığın artmasıyla beraber sürtünme momenti değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Düşük hızlar için sıkılığın önemli bir etkisi gözlemlenmemiştir. Testler süresince yağ kaçağı ise meydana gelmemiştir.

EFFECTS OF THE RADIAL FORCE ON FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF POLYURETHANE ROTARY SHAFT SEALS

SUMMARY

Sealing is the control of fluid interchange between two regions which share a common boundary. In order to control this fluid interchange, leakage components are used in mechanical engineering. Leakage components play a crucial role in the proper functioning of machines and tools. Although, the sealing mechanism of the leakage components is studied for many years, the subject is still an unsolved problem. However, with the improvement of machine technology, leakage components should also be improved. Thus, the sealing mechanism should be understood well.

In the applications, there are static and dynamic sealing situations. In dynamic sealing situations, there is relative sliding motion at the boundary. However, there is not that kind of motion in static sealing situations. Rotary mechanical seals, lip seals, labyrinth seals and piston rings are some examples which are used in dynamic sealing applications. Gaskets, metal o-rings and sealants are used in static sealing applications.

The rotary lip seals are machine elements, which are used to seal the rotating unions in mechanical engineering. Rotary lip seals are most used widely in the machine industry in order to prevent leakage and exclude contamination since they have many advantages. They have simple construction and less friction during operation. They have good sealing performance. In addition, they have lower cost than the other leakage components.

A typical radial lip seal has three main parts; steel frame, garter spring and elastomeric ring. The steel frame maintains the rigidity of the radial lip seal. Garter spring compensates the changes when the elastomer is exposed to lubricants at high temperatures. In addition, garter spring generates radial force. Elastomeric ring includes the primary sealing lip and maintains the sealing function.

In the sealing industry, different kinds of elastomers can be used as seal material. Nitrile butadiene rubber, fluoro elastomer and polyurethane are the examples of the most popular radial lip seal materials. In this thesis, thermoplastic polyurethane elastomer is selected as radial lip seal material. Thermoplastic polyurethane has many advantages compared to other materials. It has an unusually high abrasive resistance, low compression set, high physical properties and tear strength. In sealing technology, thermoplastic polyurethane is mostly used for U-cups, lip seals, wipers and packings. Products made from this material can be used in mineral oil, in water up to 40°C and in biodegradable hydraulic oils like vegetable oils and synthetic esters up to 60°C. Its properties can be improved with additives.

It is important to understand sealing mechanism in order to evaluate a successful radial lip seal. The sealing mechanism of rotary shaft seals can be explained with macro and micro models. Microscopic sealing mechanism considers effects of microasparties and cavitation on sealing mechanism of rotary lip seals. Due to the

researches, it is understood that microasparties on contact area of radial lip seal have vital role in sealing function. It is observed that fluid can not be pumped from oil side to the air side if the seal lip surface is too smooth. On the other hand, the macroscopic sealing mechanism is about “seal cocking” effect on rotary lip seal performance.

There are many critical factors which affects the sealing performance. Those factors can be operating conditions like temperature, pressure, external contaminants, excentricity and seal cocking or seal design parameters like garter spring, secondary lip, shaft and bore design and etc. The radial force is also a critical factor which affects the sealing performance and is related to the leakage and wear. It is therefore important to investigate the radial force effect on sealing performance in order to improve seal design.

The radial force has an important role in designing a successful radial lip seal. If it is too large, high friction and wear will occur. If the radial force is too large, seal can leak since the vibrations and eccentricity cannot be followed. The radial force should be large enough in order prevent leakage. The radial force is the integral of the radial linear contact pressure above the shaft circumference. The contact pressure distribution has a triangle-like profile. Maximum pressure increase occurs on the oil side and these results a pumping action from air side to oil side. It is known that, contact pressure has a critical value and excessive contact pressure can cause seal failure.

The radial force is generated by two different factors. Those factors are garter spring and elastomer component of the seal. The half of the total radial force is produced by garter spring and the other half is produced by elastomer deformation which occurs because of the interference between the elastomer ring and the shaft. Therefor, it is important to determine the suitable interference and garter spring force values in order to maintain enough radial force. Thus, the elastomer wear and aging can be controlled. Also, friction torque can be kept as low as possible. The radial force can be determined in static condition with a radial force measuring instrument.

In this thesis firstly, the sealing problem is defined. The basics of seal design are explained. Later on, leakage components are introduced and rotary lip seals are mentioned in details. Steel frame, garter spring and elastomeric component of radial lip seals are examined. Different rotary lip seal designs are introduced for different applications. In addition, the sealing mechanism of radial lip seals is explained. Micro and macro sealing mechanisms are examined. Especially, micropumping is explained in details. Moreover, the parameters which affect sealing performance of rotary lip seals, are referred. Beside of explaining the effect of radial force, interference effect is also explained in details. In the end, experimental set up which is developed in order to investigate interference effect is introduced. Test conditions are explained. Results are mentioned and analyzed.

The purpose of this study is to investigate the effect of radial force produced by interference on the static contact properties and frictional characteristics of a radial lip seal by experiments. For this reason a test system has been developed. In this test system a cylinder is placed on four load cells in order to monitor the moment generated between seal and counterface. During the experiments, frictional force values which are generated by radial lip seals, are measured and the results are transferred to the computer by a data acquisition system. Later on, frictional torques are calculated.

For the experiments, radial lip seals without secondary lips are manufactured by SKF. As mentioned before, Thermoplastic polyurethane and its two different versions; hydrolisis resistant thermoplastic polyurethane and self-lubricated thermoplastic polyurethane are selected as the elastomeric material. Instead of standard inner diameters, custom-made radial lip seal samples are ordered. Therefore three different inner diameters (40, 39,80, 39,60 mm) are selected for each elastomeric material. Two groups of experiments are made and 27 samples are tested under room temperature. The test conditions are determined for the first group of experiments as follows:

- The speeds are chosen as 1, 3 and 5 m/s.
- The seals are tested under 0,5 and 0,3 bar for a short period.

During the second group of experiments, the frictional torque is measured compared for different inner diameters. The effect of speed, pressure, material and interference are investigated.

For the second group of experiments, test conditions are determined as follows:

- The seals were tested for 10.000 meter rotating distance
- The system pressure is selected to be 0,3 bar during tests.

During the second group of experiments, oil leakage observation and torque measurement was made. The effect material and interference for long rotating distances are investigated.

As a result, it is observed that the moments increase as the inner diameters is increased. It is observed that, the effect of interference is low for low speeds. Because of the negative impacts of additives, the friction torque values of self-lubricated thermoplastic polyurethane radial lip seals seemed to be larger. Leakage was not occurred during experiments. Significant wear track could not be observed on the contact surface of radial lip seals.

1. GİRİŞ

Ortak sınır paylaşan iki ortam arasında boşluk olduğu sürece madde geçişi, moleköl boyutlarında dahi olsa meydana gelecektir. Sızdırmazlık elemanları ile bu madde geçişinin kontrol altına alınması amaçlanmaktadır.

Sızdırmazlık elemanları uygulamaya bağılı olarak çok çeşitli tasarımlarda olabilmektedir. Ucuz olmaları ve iyi bir performans göstermeleri nedeniyle dönel dudaklı sızdırmazlık elemanları oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Bu sızdırmazlık elemanları mil ya da yuvadan birinin hareketli olduğu uygulamalar için uygundur.

Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının performansına keçe tasarımı ve uygulama koşulları ile ilgili pek çok parametre etkimektedir. Bu parametrelerin en önemlilerinden biri de çapsal yüküdür. Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında çapsal yük, garter yayı ve dudak ile mil arasındaki sıkılıktan kaynaklanmaktadır. Dönel dudaklı keçelerde iç çapın mil dış çapından daha küçük olmasından dolayı oluşan sıkılık keçedeki çapsal yükün %50'sini oluşturur. Çapsal yükün diğer %50'si ise garter yayından kaynaklıdır. Çapsal yük aşınma ve kaçak oluşumu ile bağlantılı olduğu için keçe tasarımında önemli bir rol oynar. Çapsal yükün çok küçük olması durumunda milin hareketlerini karşılayamayan keçe kaçağına sebep olur. Çapsal yükün gerekenden fazla olması durumunda ise temas basıncı artar, sürtünme momenti yükselir ve dudak aşırı bir aşınmaya maruz kalır. Bu durumda keçe ömrü kısılır. Sıkılığın ya da garter yayından kaynaklı yükün arttırılmasıyla çapsal yükün değeri arttırılabilir. Dolayısıyla dönel dudaklı keçelerde sıkılık ve garter yayı keçe performansına doğrudan etkiyen önemli faktörlerdir.

Bu tez kapsamında Bölüm 1'de çapsal yükün keçe performansına etkisi ile ilgili yapılan çalışmalardan örnekler sunulmuştur. Bölüm 2'de sızdırmazlık kavramı incelenmiş ve kaçak çeşitlerine değinilmiştir. Ayrıca sızdırmazlık elemanlarının temel yapısı incelenmiştir. Bölüm 3'te ise sızdırmazlık elemanları sınıflandırılmış ve detaylı olarak incelenmiştir. Dönel dudaklı keçeler ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Farklı uygulamalarda kullanılabilecek çeşitli keçeler tanıtılmıştır. Bölüm 4'te sızdırmazlık mekanizmasına değinilmiştir. Makro ve mikro sızdırmazlık

mekanizmaları detaylı olarak açıklanmıştır. Daha sonra ise keçe performansına etkiyen parametreler incelenmiştir. Ayrıca keçe performansına etkiyen önemli bir faktör olan çapsal yük hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Bölüm 5'te keçe sıkılığının dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının sürtünme karakteristiğine etkisini incelemek amacıyla geliştirilen deney düzeneğinden bahsedilmiş ve test şartları anlatılmıştır. Bölüm 6'da ise deneylerden elde edilen veriler paylaşılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı çapsal yükü oluşturan etkenlerden biri olan keçe dudağı ve mil arasındaki sıkılığın keçe performansına etkisini araştırmak ve keçe tasarımlarının iyileştirilmesine katkıda bulunmaktır. Termoplastik malzemeden imal edilmiş olan keçelerle yapılan deneylerde sürtünme momenti ölçülmüş ve kaçak kontrolü yapılmıştır. Ayrıca 10.000 metreye kadar test edilen dudaklı keçelerin temas yüzeyleri incelenmiş ve makro boyutta belirgin bir aşınma olup olmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler kıyaslanmış ve keçe tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür

XiaoHong Jia, Fei Guo ve Le Huang 2013 yılında yaptıkları çalışmada [1] radyal ön gerilmenin bir dönel dudaklı keçenin sızdırmazlık performansına ve keçe temas bölgesi özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Dönel dudaklı keçelerde radyal ön gerilme garter yayı ve keçe sıkılığı tarafından sağlanmaktadır. Çalışmada ön gerilmeyi oluşturan iki faktörde nümerik ve deneysel olarak ayrı ayrı incelenmiştir ve çapsal yük, dudak temas bandı genişliği, dudak sıcaklığı, tersine pompalama oranı ve sürtünme momenti ölçülmüştür. Dönme hızının artışıyla sürtünme momentinde belli bir devire kadar artış gözlenmiş daha sonra ise hızla beraber viskozitenin düşmesi sonucunda moment değerindeki artış azalmış ve belli bir değerde sabitlenmiştir. Sıkılığın arttırılmasıyla ile sürtünme momentinin lineer olarak arttığı gözlenmiştir. Aynı sonuç garter yayından kaynaklı çapsal yükün arttırılmasında da gözlenmiştir. Garter yayından ya da sıkılıktan kaynaklı olması fark etmeksizin aynı çapsal yük değerlerinde aynı sürtünme momenti değerlerine ulaşıldığı anlaşılmıştır. Sıkılığın artmasıyla tersine pompalama oranının lineer olarak arttığı ancak belli bir değerden sonra sabit kaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak uygun keçe tasarımı için kritik bir

sıkılık değeri olduğu gözlenmiştir. Keçenin pompalama kabiliyetiyle sürtünme momenti arasında bir denge kurulabilmesi için kritik sıkılık değerinin aşılması gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca keçe performansının garter yayı aracılığıyla kontrol edilebileceği gözlemlenmiştir.

Simon Plath, Stefan Meyer ve Martin Wollesen çalışmalarında [2] dönel dudaklı keçelerin sürtünme momentlerini deneysel ve nümerik olarak analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmada sıcaklık, hız ve ön gerilme parametrelerinde değişiklik yapılarak sürtünme momentlerindeki değişimler incelenmiş ve yapılan sonlu elemanlar analizleriyle de karşılaştırılmıştır.

Hanna Keitzel, Stefan Meyer ve Volkert Wollesen 2005 yılında yaptıkları çalışmalarında [3] dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında radyal ön gerilmenin sızdırmazlık performansına etkilerini incelemişler ve bir radyal ön gerilme ölçüm düzeneğinin geliştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Test düzeneği sıcaklığın ve yağlayıcının radyal ön gerilme üzerindeki etkileri dikkate alınarak geliştirilmiştir.

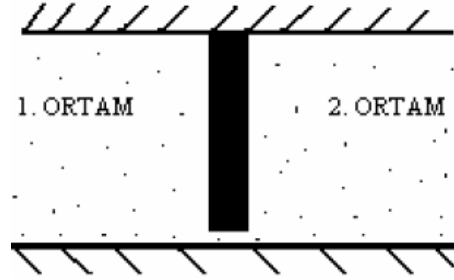
Antonio Gabelli, Gerhard Poll ve F. Ponson tarafından yapılan çalışmada [4] radyal yük tayini ve keçe dudağının mil ile temas ettiği bölgede gerilme dağılımını araştırmışlardır. Çalışmada beş farklı sıkılık için temas bölgesindeki gerilme dağılımları nümerik ve deneysel olarak incelenip sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Fanghui Shi ve Richard F. Salant, dudaklı keçenin sızdırmazlık bölgesinde rastgele seçilen bir yüzey üzerinde nümerik çalışma yapmışlardır [5]. Mil ile keçenin temas bölgesindeki yüzey pürüzlülüklerinin deformasyonu, sürtünme katsayısı, tersine pompalanma oranı, film kalınlığı, temas bölgesindeki basınç dağılımı incelenip, hıza bağlı değişimleri grafikler halinde ortaya konmuştur. Tasarım ve uygulama şartlarının da keçe performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Keçe dudağı ve mil arasındaki sıkılık 0,914 mm'den 0,686 mm'ye düşürülerek bunun tersine pompalama oranı, film kalınlığı ve sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Sunulan bu çalışmada çapsal yükü oluşturan faktörlerden biri olan keçe ve mil arasındaki sıkılığın dudaklı keçelerin performansına etkisi araştırılmıştır. Değişik sıkılıklardaki keçeler 0,3 ve 0,5 bar basınç altında 1, 3 ve 5 m/s hızlarda test edilmiştir. Elde edilen sürtünme momenti değerleri incelenerek sıkılığın keçe performansını nasıl etkilediği gözlenmiştir.

2. SIZDIRMAZLIK KAVRAMI

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere sızdırmazlık, ortak bir sınırı olan iki ortam arasındaki akışkan geçişinin kontrolüdür. İki ortam arasındaki sızdırmazlık yüzde yüz sağlanamaz molekül boyutlarında dahi olsa bile bir akışkan geçişi söz konusu olur. Bundan dolayı sızdırmazlıkta önemli olan akışkan geçişinin istenmeyen seviyelerde olmamasıdır. Sızdırmazlık uygulamaları dinamik ya da statik olmak üzere ikiye ayrılır. Dinamik uygulamalarda ortak sınırdaki izafi bir hareket söz konusu iken statik uygulamalarda iki ortamı ayıran sınır hareketsizdir.



Şekil 2.1 : Sızdırmazlık Kavramı.

Tasarım ve tolerans hususları göz önüne alındığında statik yüzeylerle hareketli yüzeyler arasında görece büyük boşluklara ihtiyaç duyulur. Ancak sızdırmalığın sağlanması amacıyla yüzeyler arasındaki bu boşlukların boyutlarının küçültülmesi gerekir. Bu hassas toleranslarda bir işleme gerektirir ve oldukça maliyetlidir. Bu yüzden yüzeyler arasındaki boşluklar sızdırmazlık elemanları ile azaltılır.

Yüzeyler arasındaki boşluk ne kadar küçük olursa olsun akışkan molekülleri bu boşluktan geçer. Sızdırma ya da kaçak, sızdırmazlık elemanından geçerek sistem dışına akan akışkan miktarıdır. Bazı durumlarda ise sistem dışındaki bir akışkan makina içine doğru akarak da kaçağa sebebiyet verebilir. Tolere edilebilecek kaçak miktarları uygulamadan uygulamaya değişiklik gösterir. Çevreyi olumsuz etkileyebilecek maddelerin sızıntısının en az seviyelerde olması istenirken, makinaya ya da çevreye önemli ölçüde zararı olmayan maddelerin sızıntılarında ise daha büyük miktarlar kabul edilebilir. Çalışmanın bu kısımda kaçak türleri hakkında bilgiler verilmiştir [11, 14].

2.1 Difüzyon

Bir gaz ya da buhar molekülü boyutsal olarak nanometreden küçüktür ve sistemde bulunan küçük boşluklardan, sızdırmazlık elemanındaki gözeneklerden difüzyon yolu ile geçebilir. Bu durumda kaçağın kontrol altında tutulabilmesi için oldukça maliyetli sızdırmazlık sistemleri gerekmektedir.

2.2 Konveksiyon

Sızdırmazlık elemanının hareketinden dolayı meydana gelen akışkan transferi sonucu ortaya çıkar. Geometrisinden dolayı sızdırmazlık elemanı akışkanı sistem içine ya da dışına taşıyabilir. Bu özellik sızdırmazlığı sağlamak için aktif sızdırmazlık elemanlarında özellikle temassız sızdırmazlık elemanlarında kullanılmaktadır.

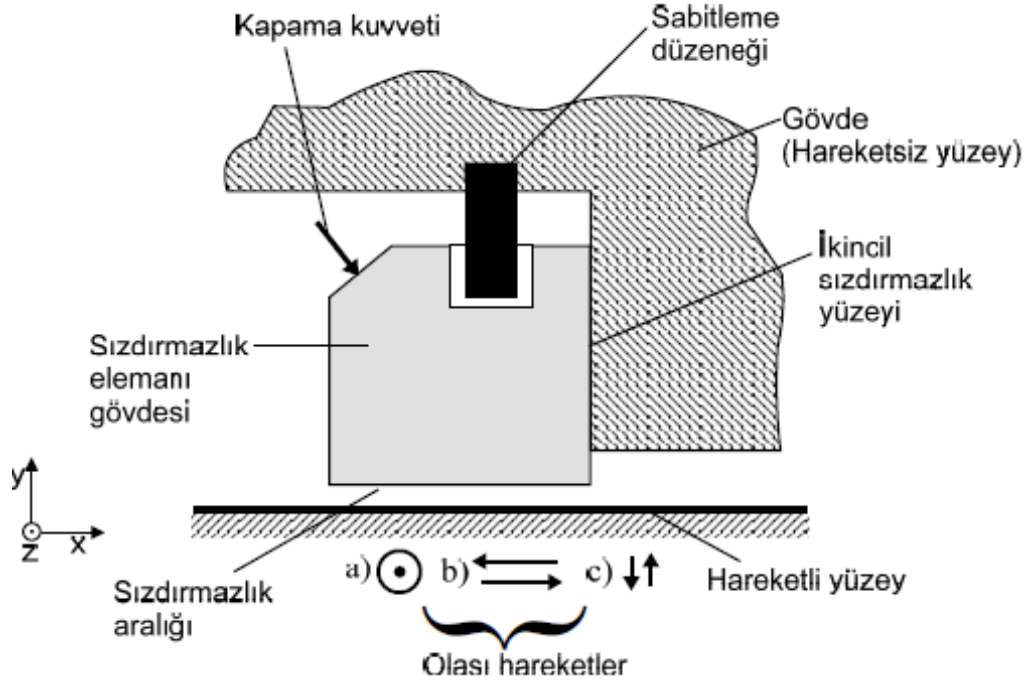
2.3 Basınç Farkından Dolayı Akış

Pratikte en çok meydana gelen kaçak türüdür. Basınç farkından dolayı oluşan sıvı fazdaki yağ kaçaqları, damlama ile veya normal sıvı akışı şeklinde meydana gelir. Bu kaçakta başka bir parametre değişmedikçe yağ kaçağı oranı basınç gradyanı ile birlikte artar ve akışkanın viskozitesi ile birlikte azalır.

2.4 Sızdırmazlık Elemanlarının Temel Yapısı

Çalışmanın bu bölümünde sızdırmazlık elemanlarının yapısından ve fonksiyonundan genelleştirilmiş bir şekilde bahsedilmiştir. Şekil 2.2’de bir sızdırmazlık sisteminin temel yapısı görülmektedir [16]. Bu sistemde bir sızdırmazlık gövdesi ve ona göre hareketli bir yüzey bulunmaktadır. Hareketli yüzey uygulamaya göre dönel ya da lineer hareket yapabilir. Sızdırmazlık gövdesi ve hareketli yüzey arasında bulunan aralığa sızdırmazlık aralığı ya da birincil sızdırmazlık yüzeyi denir. Sızdırmazlık aralığı mikrometre seviyelerinde olan oldukça dar bir aralıktır. İkincil sızdırmazlık yüzeyi ise sızdırmazlık elemanı ile gövde arasında oluşabilecek kaçağı önler. Genelde karmaşık uygulamalarda ikinci bir sızdırmazlık gövdesi bu görevi üstlenmektedir. Birincil sızdırmazlık yüzeyinde sızdırmazlığın sağlanması durumunda potansiyel kaçak bölgesi ikincil sızdırmazlık yüzeyidir. Bu nedenle bu yüzeydeki sızdırmazlığın sağlanmış olması da oldukça önemlidir. Kapama kuvveti sayesinde birincil ve ikincil sızdırmazlık yüzeyindeki aralığın minimum olması sağlanır.

Sabitleme düzeneği ise sızdırmazlık elemanının kaymasını önlemek amacıyla sisteme eklenmiştir. Sızdırmazlık elemanı montajı tamamlandıktan sonra yuvada hareket halinde olmamalı ve dönmemelidir. Bu sabitleme düzeneği aracılığıyla sağlanır.



Şekil 2.2 : Sızdırmazlık sisteminin temel yapısı.

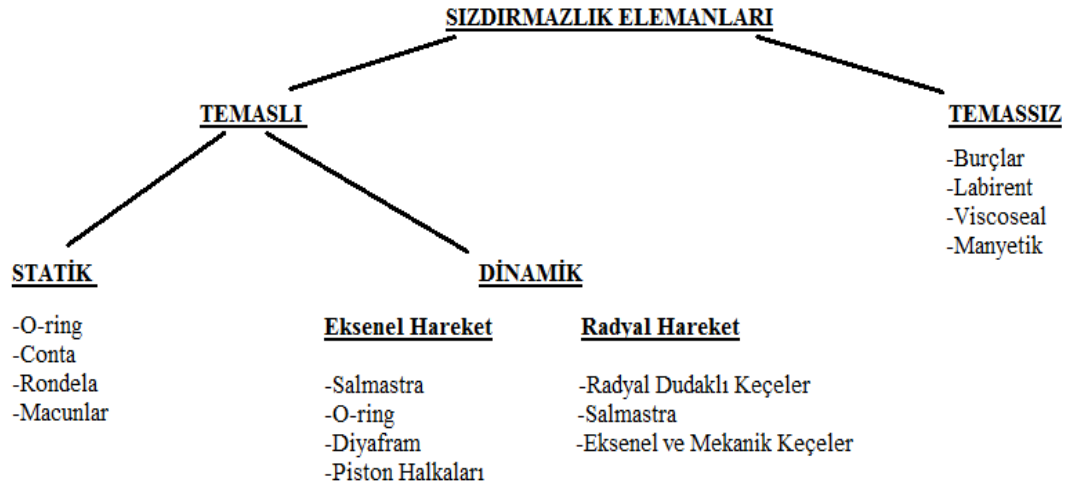
Sızdırmazlık ara yüzeyindeki izafi hareket sızdırmazlık elemanının yapısına bağlıdır. Ara yüzeye dik yönde bir hareket uygulamada pek çok probleme neden olabilir. Mildeki eksantriklik parçalar arasında istenmeyen temaslara sebep olabilir. Bu tür problemlerin önüne geçmek için sızdırmazlık elemanı, sızdırmazlık ara yüzeyine dik doğrultuda da belirli bir hareket serbestliğine sahip olmalı ve aynı zamanda ikincil sızdırmazlık yüzeyi ile de hareketsiz gövdeyle arasındaki yüzeyden meydana gelebilecek kaçığı önleyebilmelidir [11].

Şekil 2.2’de görülen temel yapı dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının tasarımını oldukça iyi açıklamaktadır. Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanları büyük ölçüde bu yapıya göre tasarlanmaktadır. Ayrıca uygulamalardaki ihtiyaçlara bağlı olarak dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının tasarımlarında gelişen makine teknolojisiyle beraber pek çok gelişme meydana gelmiştir.

3. SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI

Endüstriyel uygulamalarda yağlayıcının ya da sistemde bulunan basınçlı akışkanın çalışma esnasında sistemden herhangi bir biçimde dışarı sızmasını kontrol edebilmek amacıyla statik ya da dinamik sızdırmazlık elemanları kullanılır.

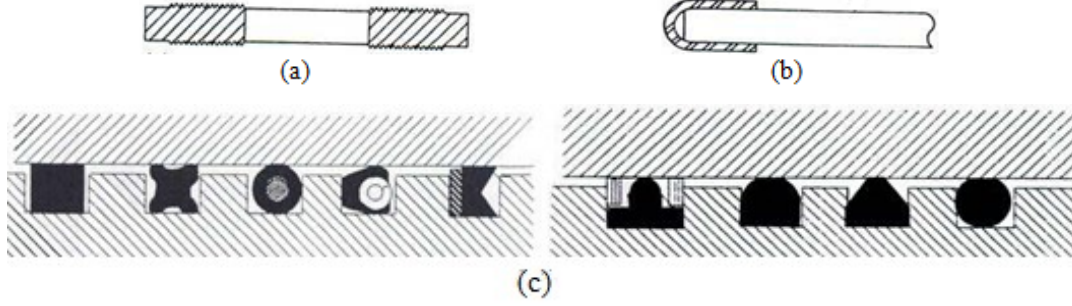
Sızdırmazlık elemanları temaslı ve temassız olmak üzere ikiye ayrılırlar (Şekil 3.1). Temaslı sızdırmazlık sistemlerinde sızdırmazlığı sağlayan eleman mil ile gövde veya kapak arasında her ikisine temas edecek şekildedir. Temassız sızdırmazlık sistemlerinde ise çok dar kanalların yağ akışına karşı oluşturdukları dirençten faydalanılarak sızdırmazlık sağlanır. Temassız sızdırmazlık elemanları bu sistemlerde sürtünme ve aşınma olmadığı için sonsuz ömre sahip olabilmektedirler.



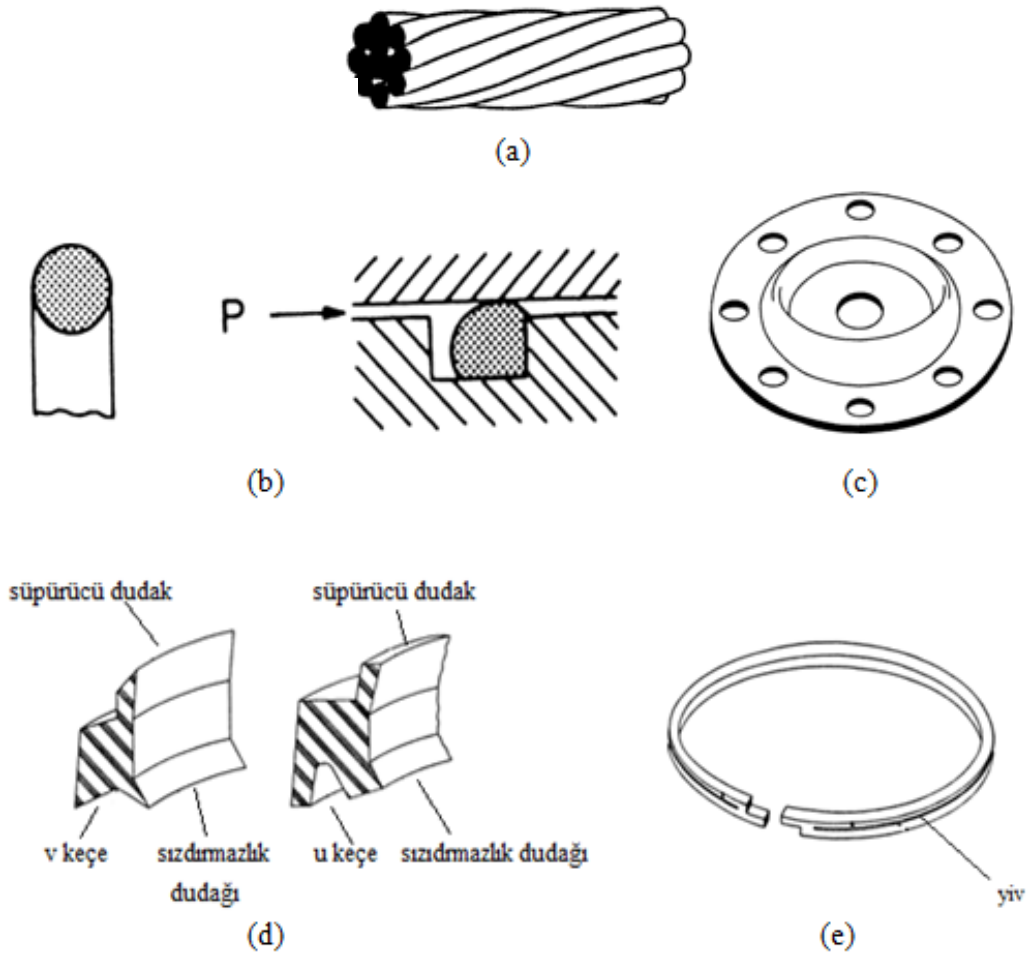
Şekil 3.1 : Sızdırmazlık Elemanlarının Sınıflandırılması.

Temaslı sızdırmazlık elemanları statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Conta, O-ring ve macun gibi elemanlar statik uygulamalarda sızdırmazlığı sağlarlar (Şekil 3.2). Dönme hareketi ya da lineer hareket yapan miller için kullanılan dinamik sızdırmazlık elemanları çok çeşitli olabilir. Doğrusal hareket yapan millerde sızdırmazlık salmastra, O-ring, piston halkaları, diyafram, dudaklı keçeler gibi elemanlarla sağlanabilir (Şekil 3.3). Dönme hareketi yapan miller içinse eksenel ve mekanik keçeler, salmastra ve dudaklı keçeler sızdırmazlığı sağlama amacıyla

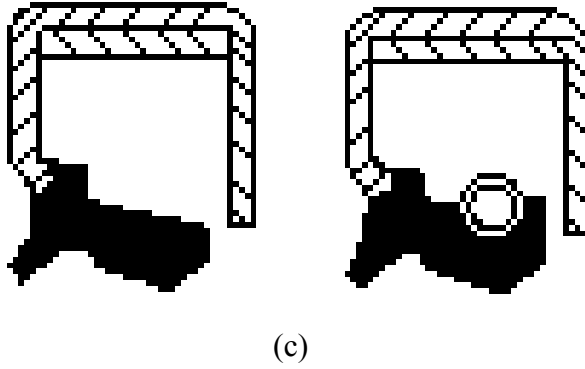
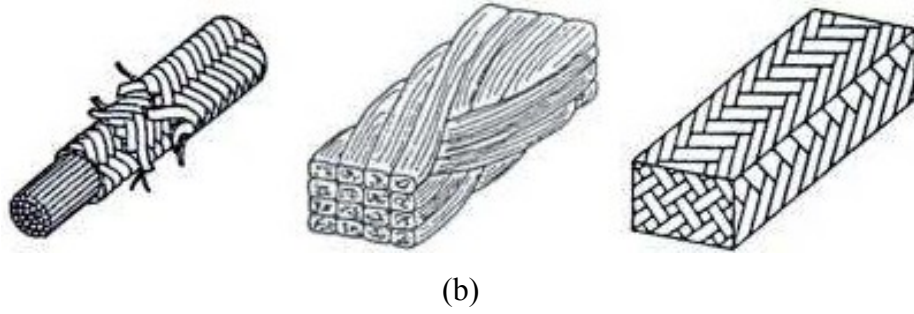
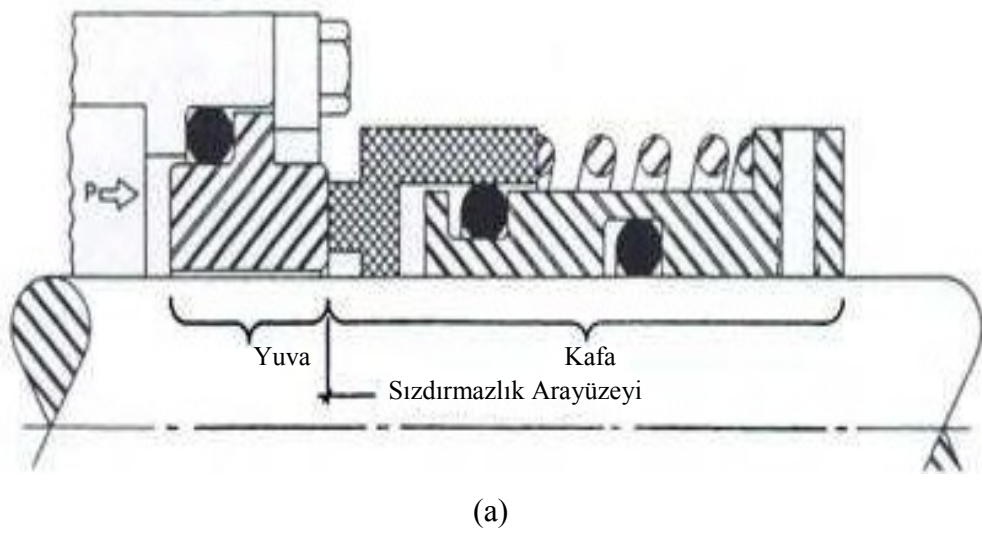
kullanılırlar (Şekil 3.4). Eksenel ve mekanik keçelerde yay kullanılarak yüzeyler sıkıştırılır ve kaçak önlenir. Radyal dudaklı keçeler ise mili radyal yönde bastırır. Hem dönme hareketinde hem de doğrusal harekette dudaklı keçeler iyi bir performans göstermenin yanı sıra ucuz da oldukları için diğer sızdırmazlık elemanlarına göre oldukça sık kullanılırlar [11, 12, 16].



Şekil 3.2 : Statik uygulamalar için kullanılan sızdırmazlık elemanları. (a) Metal conta; (b) metal olmayan conta; (c) çeşitli şekillerdeki o-ringler.

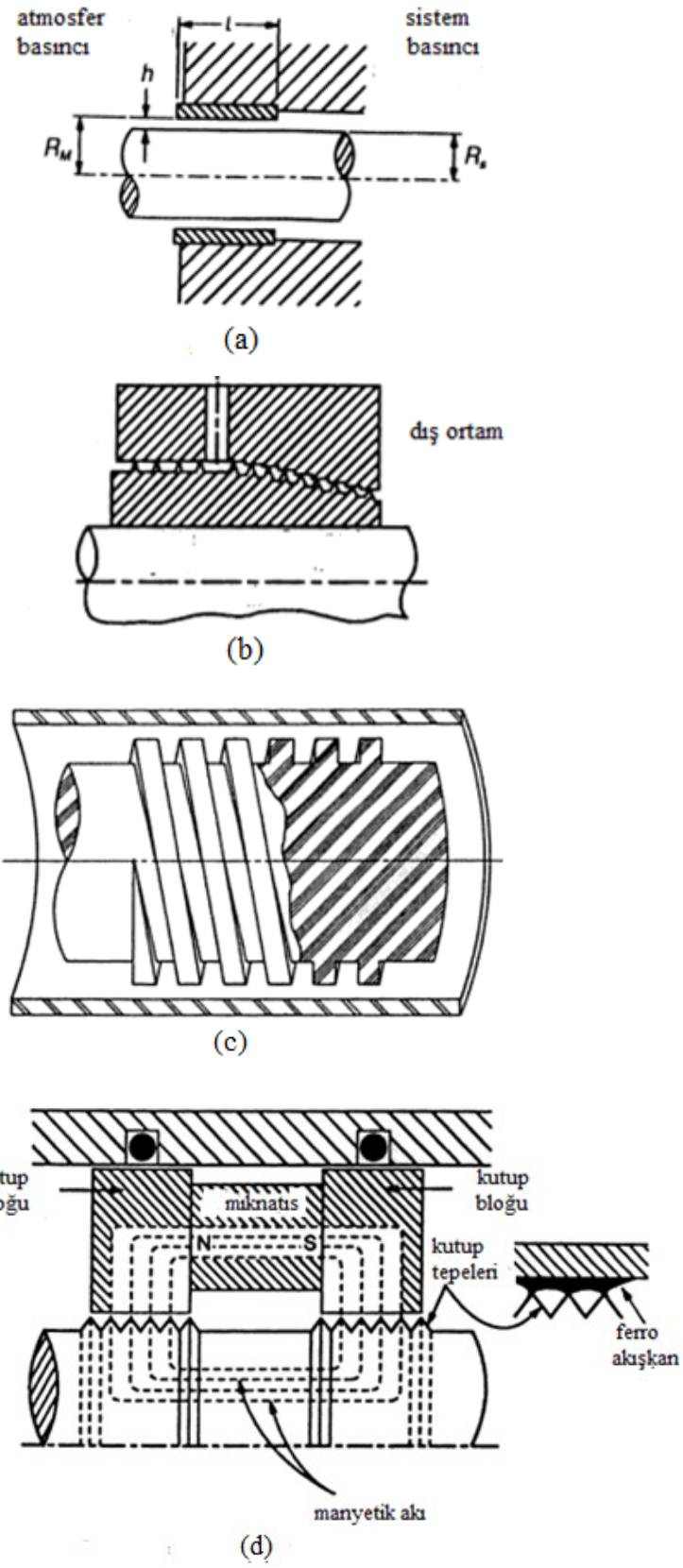


Şekil 3.3 : Lineer hareket yapan miller için kullanılan sızdırmazlık elemanları (a) salmastra; (b) o-ring; (c) diyafram; (d) dudaklı keçeler; v-takım halkası ve u-ring; (e) piston halkası.



Şekil 3.4 : Lineer hareket yapan miller için kullanılan temaslı sızdırmazlık elemanları (a) mekanik keçe; (b) salmastra; (c) dudaklı keçeler.

Temassız sızdırmazlık burç ve labirent sistemleri ile sağlanabildiği gibi visko/hidrokinamik ve manyetik sızdırmazlık ile de sağlanabilir. Burç ve labirent sızdırmazlık sistemlerinde mil ile geçtiği delik arasındaki boşluk dar yapıldığında basınç düşmesi yaratacağından sızdırmazlık görevi görür [6]. Visko/hidrokinamik sızdırmazlık sistemine mil üzerine vida dişlerinin açılmasıyla sızdırmazlık sağlanır. Manyetik sızdırmazlıkta ise bir ferro akışkanın manyetik etkiden yararlanılarak kaçağa yol açması engellenir.

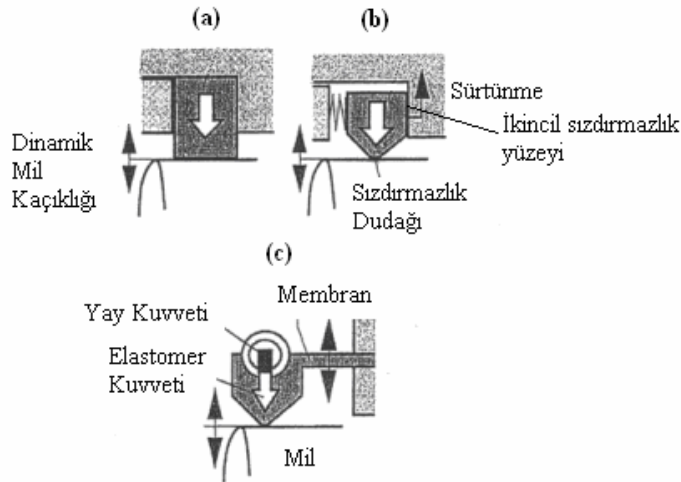


Şekil 3.5 : Temassız sızdırmazlık elemanları (a) burç; (b) labirent; (c) visko/hidrodinamik (d) manyetik.

3.1 Dönel Dudaklı Sızdırmazlık Elemanları

Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının çalışma mekanizması basit gibi gözükmemektedir ancak pratikte oldukça karmaşıktır ve 1950'lerden beri ciddi çalışmalar yapılmasına rağmen tam olarak anlaşılamamıştır. Bu sızdırmazlık elemanlarında elastik bir halka rijit bir bileziğe bağlanmıştır. Elastomer halkanın iç çapı mil dış çapından daha küçüktür. Dudak iç çapı ve mil dış çapı arasındaki bu fark sıkılık olarak adlandırılmaktadır. Keçeler monte edildikten sonra elastomer dudak dışı doğru gerilir ve dudağın sızdırmazlık sağlayan ucu ile mil arasında bir kuvvet oluşturur. Mil hareket ettiğinde elastomer dudak esner ve mil hareketini takip ederek sızıntıyı önlemek için bir hazne oluşturur. Keçelerde garter yayı kauçuğun zamanla ısıya ve çeşitli kimyasallara maruz kalarak yitirdiği özellikleri telafi etme amacıyla kullanılır. Çok çeşitli keçe tasarımları ve malzemeleri bulunmaktadır. Kullanıcılar seçim yaparken keçenin zayıf ve de güçlü yanlarını, kullanılacağı koşulları ve maliyeti göz önünde bulundarmalıdır.

1930'larda mineral yağlarla çalışmaya uygun sentetik nitril kauçuğun bulunmasıyla elastomer dudaklı keçelerin gelişimi başlamıştır. Şekil 4.2'de dönel dudaklı keçelerin gelişimi görülmektedir. Dönel dudaklı keçeler günümüzdeki tasarımlarına ulaşana kadar üç aşamadan geçilmiştir.



Şekil 3.6 : Elastomer dönel sızdırmazlık elemanlarının gelişimi.

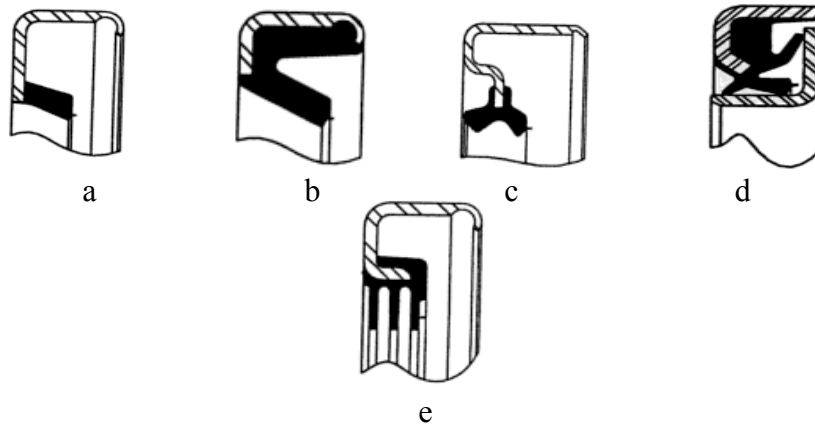
Şekil 3.6 (a) şıkında elastik malzemeden yapılmış salmastra geniş bir alanda mile temas etmektedir. Sürtünme çok fazla olup radyal titreşimleri sönümleme özelliği yetersizdir. Şekil 3.6 (b) şıkında ise sızdırmazlık halkası dar bir alana temas edecek şekilde geliştirilmiştir ve mil üzerine yük oluşturacak şekilde sıkıştırılmıştır.

Böylece sızdırmazlık ara yüzeylerinde artan sürtünme ve sıcaklık problemi azaltılmıştır. Ancak elastomerin ikincil sızdırmazlık yüzeyi ile teması, milin radyal yöndeki yer değiştirmelerinin takibini zorlaştırır. Şekil 3.6 (c) şıkında ise bir membranın sızdırmaz dudakla bağlantısı sağlanır. Böylece ikincil sızdırmazlık yüzeyi membran ile sağlanmış olunur. Zamanla elastomer malzemede meydana gelen gevşemeyi ve buna bağlı olarak çapsal yükteki azalmayı telafi etme amacıyla da garter yayı kullanılmıştır [11].

3.2 Dönel Dudaklı Keçe Çeşitleri

3.2.1 Yaysız keçeler

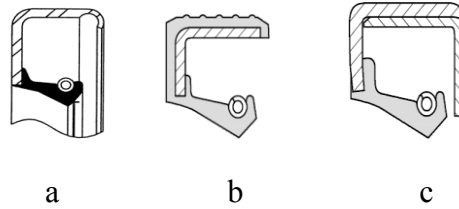
Yaysız keçeler düşük maliyetli olup 10 m/s'nin altındaki hızlarda ve 100°C'den düşük sıcaklıklarda kullanılırlar (Şekil 3.7 a). Yaysız keçeler için çeşitli tasarımlar mevcuttur. Şekil 3.7 b'deki keçede korozyon etkilerinin azaltılması amacıyla metal bileziğin iç yüzeyi elastomerle kaplanarak korozyon önlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca paslanmaz çelik de korozyon tehlikesi olan ortamlar için bilezik malzemesi olarak kullanılabilir ancak bu durumda maliyet artacaktır. Şekil 3.7 c'deki çift dudaklı yaysız keçede dudaklardan biri yağ kaçağını diğeri de kir ve toz girişini engeller. Bu tip keçeler daha çok araçlarda, konveyörlerde ve dişli kutularında kullanılır. Şekil 3.7 d'de aksel toz dudaklı keçe görülmektedir. Şekil 3.7 e'de ise çok dudaklı bir keçe görülmektedir. Bu tip keçeler ağır ve kirli koşullar için uygun olup çevresel hızı 2,5 m/s'yi geçmeyen uygulamalarda kullanılır. Bu keçeler tarım makinaları gibi zorlu koşullarda çalışan makinalar için uygundur.



Şekil 3.7 : Yaysız Keçeler.

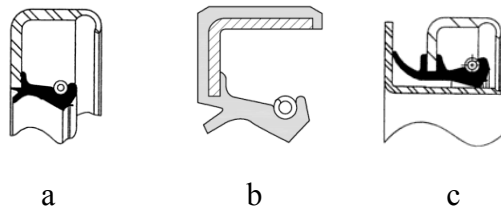
3.2.2 Yaylı keçeler

Gresden daha düşük viskoziteye sahip yağlar ile çalışılan uygulamalarda yaylı keçeler kullanılır. Yay düzgün çapsal yüklemeye sağlamanın yanı sıra sıcaklık ve zamanla elastomerde meydana gelecek değişiklikleri kompanse eder. Bu tip keçelerde çevresel hız, kullanılan elastomerin özelliklerine göre değişmekle beraber en yüksek 25 m/s'ye kadar olabilir. Özel malzeme ve tasarımlar sayesinde çevresel hızlar 50 m/s'ye kadar çıkabilir. En yüksek uygulama sıcaklığı ise keçenin dudak malzemesine bağlıdır. Şekil 3.8 a'da dış kısmı metal olan tek dudaklı yaylı bir keçe görülmektedir. Bu tip keçelerde dış çaptan sızma görülmemesi için yuva kalitesinin uygunluğuna dikkat edilmelidir. Isıl genleşmesi yüksek metal yuvalarda bu tip keçelerin kullanımı uygun değildir. Şekil 3.8 b'de ise dışı elastomer kaplı tek dudaklı keçe görülmektedir. Dış yüzeydeki elastomer sayesinde yüzeyi pürüzlü, gözenekli ya da ısıl genleşmesi yüksek malzemeden yapılmış olan yuva ile bilezik arasında oluşabilecek sızıntı önlenir. Ayrıca metal bilezik elastomer tarafından paslanmaya karşı da korunmuş olur. Büyük çaplarda (50 mm'den büyük çaplar için) çakma kolaylığı sağlamak amacıyla Şekil 3.8 c'deki gibi çift bilezikli bir keçe kullanılabilir. Bu keçelerde çift bilezik sayesinde mukavemet arttırılmış olunur. Ayrıca içerdeki bilezik yayın yerinden fırlamasını önlemeye destek olur. Çift bilezikli keçeler ağır çalışma şartları için uygundur.



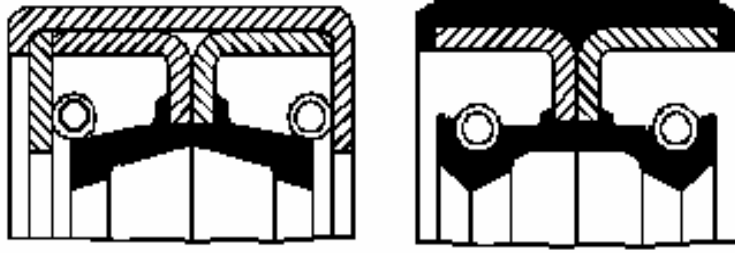
Şekil 3.8 : Yaylı Keçeler.

Şekil 3.9 a ve Şekil 3.9 b'de radyal toz dudaklı keçeler görülmektedir. Radyal toz dudağının tasarıma eklenmesiyle kirli ortamlardaki kirin ve tozun sisteme girişi engellenmektedir. Şekil 3.9 c'de ise eksenel toz dudaklı keçe görülmektedir.



Şekil 3.9 : Yaylı Keçeler.

Şekilde 3.10’da görülen çift dudaklı keçeler iki ortamı birbirinden ayırmak için kullanılırlar.

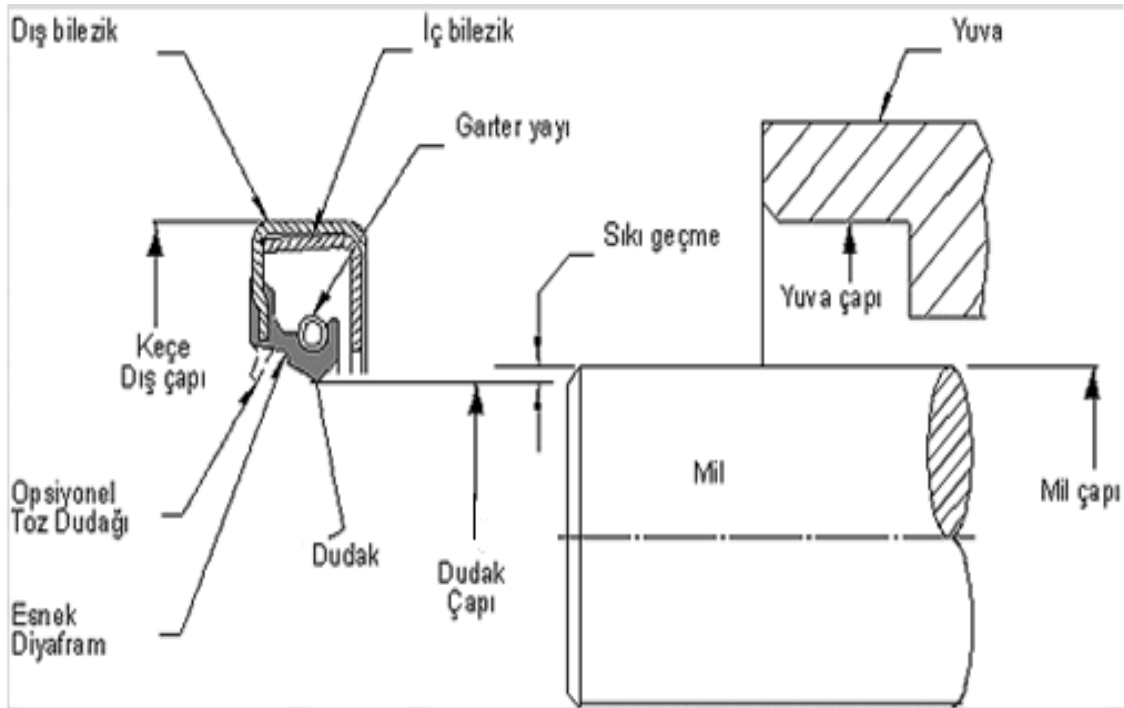


Şekil 3.10 : İki ortamı ayırmak için kullanılan yaylı keçeler.

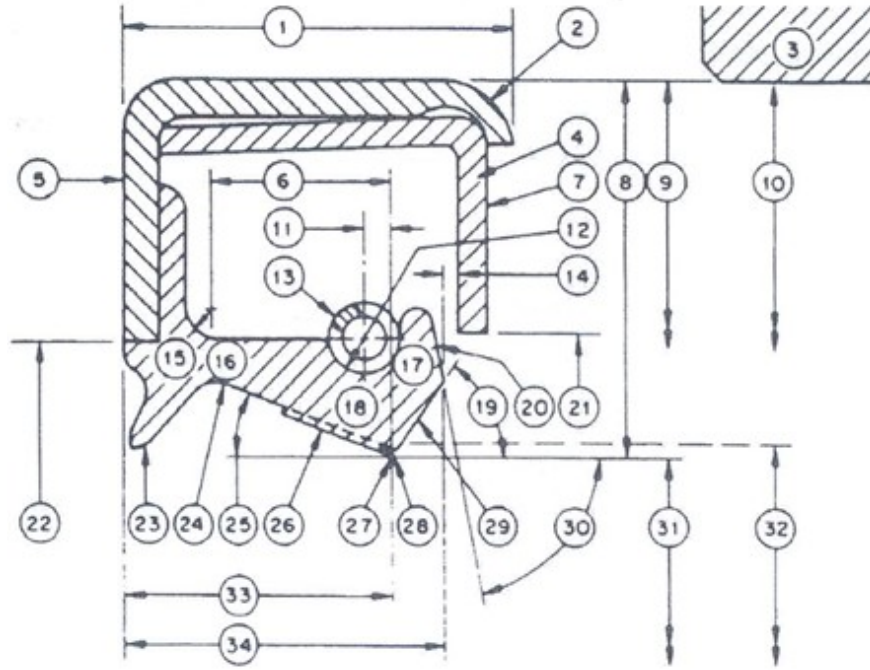
Yaylı keçeler düşük hızlardan yüksek hızlara ve sıcaklıklara kadar çeşitli koşullara sahip pek çok uygulama için kullanılabilirler. Belirtilen keçe tasarımlarının yetersiz kaldığı yüksek sıcaklık, az yağ ya da etkili kimyasallar gibi zorlu şartlar içeren uygulamalar için de çeşitli özel tasarımlar mevcuttur.

3.3 Dönel Dudaklı Sızdırmazlık Elemanlarının Bölümleri

Şekil 3.11 ve 3.12’de dönel dudaklı bir keçeye ait kesit görünüşü görülmektedir [10]. Keçeler metal bir bilezik, elastomer bir dudak ve de garter yayı olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bu bölümde keçeyi oluşturan parçalar açıklanacaktır.



Şekil 3.11 : Keçe kesit görünüşü.



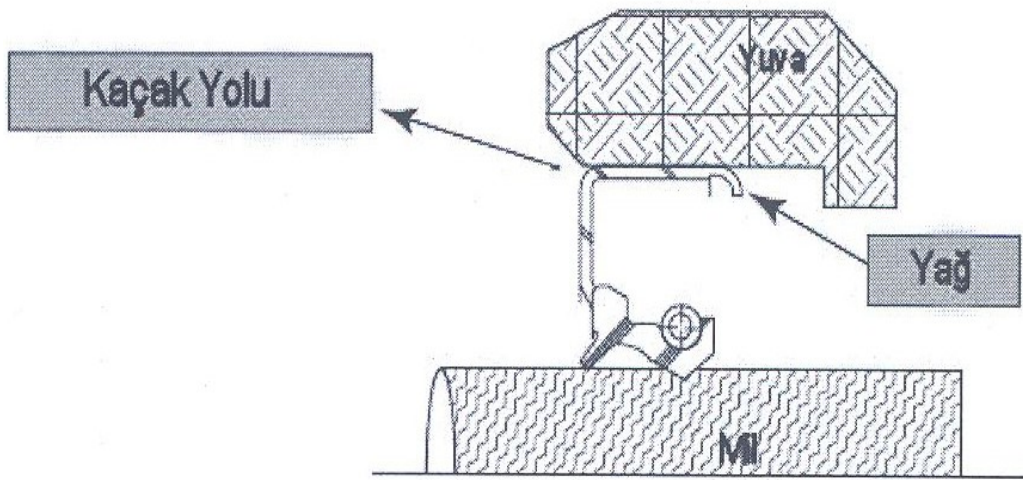
Şekil 3.12 : Keçe kesit görünüşü.

- | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1) Keçe genişliği | 13) Garter yayı | 25) Dış dudak açısı (hava) |
| 2) Dış bilezik | 14) Eksenel boşluk | 26) Yiv (helis keçede) |
| 3) Yuva | 15) Topuk kısmı | 27) Temas çizgisi |
| 4) İç bilezik | 16) Esneme kısmı | 28) Statik dudak |
| 5) Dış yüzey | 17) Yay tutucu dudak | 29) Dudak iç yüzeyi |
| 6) Dudak uzunluğu | 18) Kafa bölümü | 30) Kesme açısı |
| 7) İç yüzey | 19) İç dudak açısı (yağ) | 31) Dudak çapı |
| 8) Radyal duvar uzunluğu | 20) Kesme yüzeyi | 32) Sıkışmış dudak çapı |
| 9) Keçe dış çapı | 21) İç bilezik iç çapı | 33) Temas çizgi yüksekliği |
| 10) Yuva iç çapı | 22) Dış bilezik dış yüzeyi | 34) Dudak Yüksekliği |
| 11) Yay eksenel pozisyonu | 23) Toz dudağı | |
| 12) Yay yivi | 24) Dudak dış yüzeyi | |

3.3.1 Metal bilezik

Dönel sızdırmazlık elemanında elastomer kısım daha rijit olan bir bileziğe bağlanır (Şekil 3.13). Bilezik genellikle 1005 ya da 1020 soğuk haddelenmiş çeliktendir. Bileziğin dış çapı yuvadan daha büyük imal edilerek pres geçme ile yağ kaçağı engellenmiş olunur. Ayrıca bilezik sayesinde keçe dudağı korunmuş olur [12].

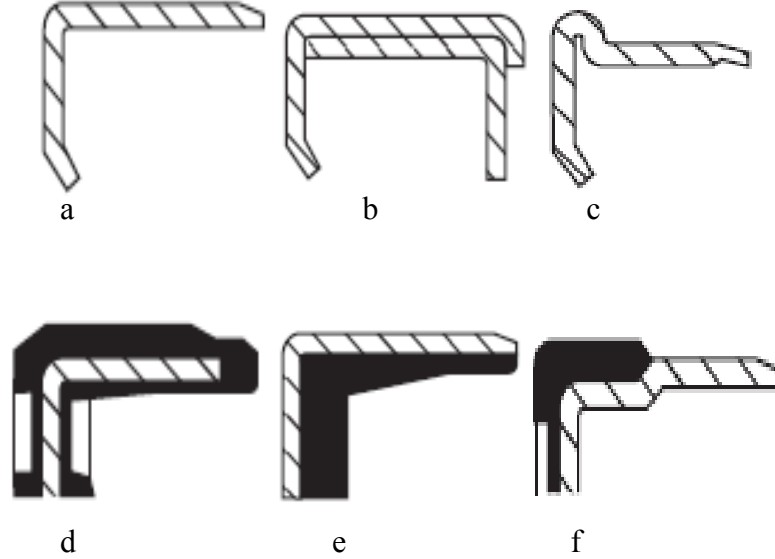
Dönel sızdırmazlık elemanının dış yüzeyi yuva içinde dönmemelidir ya da yuvadan çıkmamalıdır. Ayrıca yuva malzemesiyle uyumlu olmalı kolay monte edilebilmeli ve yuvadaki kusurları kompanse edebilmelidir.



Şekil 3.13 : Keçe-yuva teması.

Mil ile dudak arasında sızdırmazlık sağlandığı takdirde potansiyel kaçak bölgesi keçenin yuvaya temas ettiği bölge olacaktır (Şekil 3.14) . Bu bölgeden herhangi bir sızıntı olmaması için elastomer ve metalin birlikte kullanıldığı, dış çapın tamamen elastomer kaplandığı ve de sadece metal kullanılan konstrüksiyonlar geliştirilmiştir. Şekil 3.14 a'da en çok kullanılan ve en ucuz olan L şeklindeki keçe dış çapı tasarımı görülmektedir. Şekil 3.14 b'de ise keçenin daha mukavim olması için tasarıma bir iç bilezik eklenmiştir. Şekil 3.14 c'de keçe dış çapı P şeklinde tasarlanmış ve böylece keçe daha mukavim ve takıp çıkarması daha kolay bir hale gelmiştir. Şekil 3.14 d'de keçe dış çapı elastomerle kaplanmış. Dış çapı tamamen elastomer kaplı keçeler genellikle demir dışı ve yüksek genleşme katsayısına sahip bir malzemedir olan yuvalarda kullanılırlar. Şekil 3.14 e'de keçe iç çapı elastomer ile kaplanarak bileziğin korozyif etkilerden korunması amaçlanmıştır. Şekil 3.14 f'de keçe dış çapının bir bölümü elastomer ile kaplanmıştır. Bu tasarım keçe montajında kolaylık

sağlamakta ve elastomer sızdırmazlık sağlarken metal bölge ise keçenin montaj sırasında zarar görmesini engeller. Ayrıca metal bölge keçenin yuvaya doğru bir şekilde yerleşmesinde kolaylık sağlar.



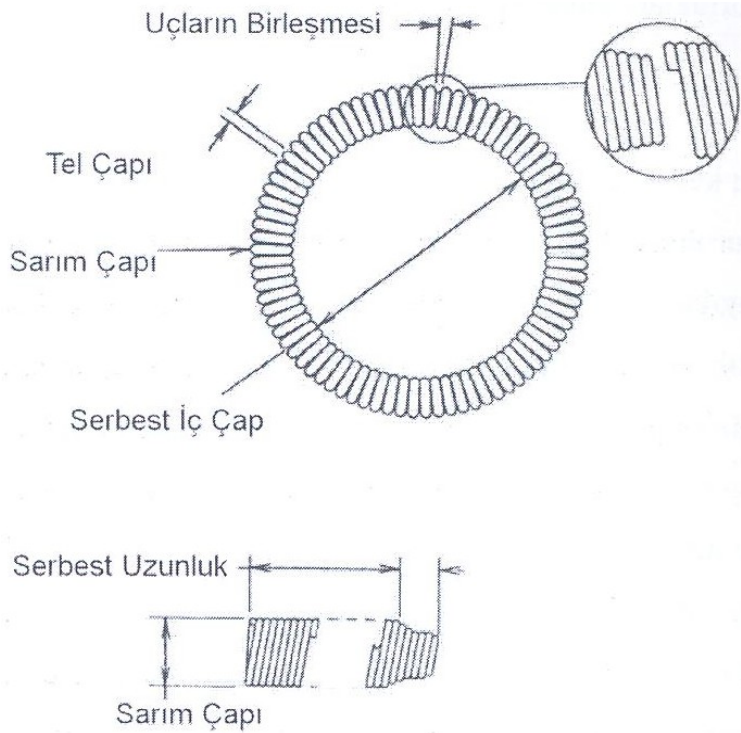
Şekil 3.14 : Keçe dış çapı tasarımları.

3.3.2 Garter yayı

Garter yayı, dönel dudaklı keçelerde elastomer dudak ile mil arasında sızdırmazlıkta gerekli çapsal yükün oluşturulması için kullanılır. Elastomerler yüksek sıcaklıklarda yağı emerler ve keçe dudağı yumuşayarak uzama eğilimi gösterir. Bunun sonucu olarak da dudak çapı artar, dudak temas bölgesi ve çapsal yükte azalma meydana gelir. Ayrıca elastomerlerin ısı genleşme katsayıları oldukça yüksektir. Bu yüzden ilk çalışma anında meydana gelen ani sıcaklık artışından ötürü elastik şekil değişimine uğrarlar. Uzun çalışma süresi boyunca sıcaklık ve zaman etkisiyle beraber dudakta plastik şekil değişimi söz konusu olur. Bundan dolayı da çapsal yükte bir düşüş gözlenecektir. çapsal yükteki düşüş garter yayı aracılığıyla kontrol altına alınır. Nitril butadien kauçukta %2 ile %5, silikonda %15 ile %20 hacim değişimi gözlenir. Florokarbon kauçukta teorik olarak bir hacim değişimi olmaz. Ancak silikon dışında tüm kauçuklarda gevşemeden dolayı garter yayından kaynaklanan basınç hariç dudak basıncı ilk bir saatlik çalışma sonucu oda sıcaklığında %15-35 ve ikinci çalışma saatinde de %25-40 azalır. Nitril butadien kauçuta 100°C’de %80 azalma görülür [11]. Bazı durumlarda dudak teması tamamen yitirebilir ve büyük kaçaklar meydana gelir. Bunu önlemek için garter yayı kullanılır.

Aynı zamanda garter yayı çapsal rijitliği arttırarak milin salgısını takip edebilmeyi kolaylaştırır. Uzun süre kullanılan keçelerde çapsal yükün sadece garter yayı ile sağlandığı gözlemlenmiştir.

Garter yayı, iki ucu birleştirilmiş bir yaydır (Şekil 3.15). Yay teli çapı garter yayının istenilen basıncı sağlaması için önemlidir. Sarım çapının yay teli çapı oranının 5,3:1 oranını geçmemesi yayın fazla zorlanmaması için gereklidir. Yay yuvasına oturduğunda dudağın iç çapını tayin eder ve bu çapa montaj sonrası iç çap adı verilir.



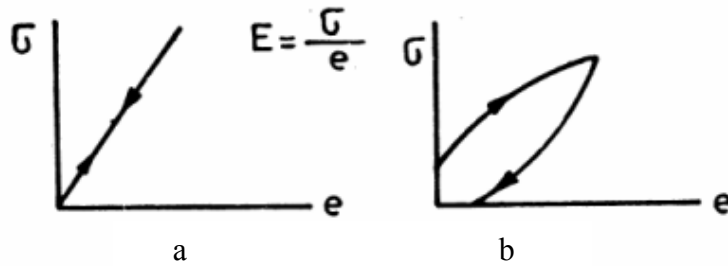
Şekil 3.15 : Garter yayı.

3.3.3 Dönel dudaklı keçelerde elastomer kısım

Dönel dudaklı keçelerin, dudak malzemesi bir baz polimer ve buna eklenen antioksidanlar ve diğer performans arttırıcı katkılardan oluşur. Dönel dudaklı keçe imalatçısı ve kullanıcısı uygun baz polimer seçimini uygulama şartlarını inceleyerek, polimerin özelliklerine ve sınırlarına bakarak karar vermelidir. Baz polimer, bileşimin sıvı direnci ve de dayanabileceği sıcaklık aralığını belirler. Uygun bileşim teknikleri, mil hareketini takip edebilmek için gerekli olan esnekliği malzemeye sağlar. Uygun bileşim elde edildikten sonra malzeme bir kalıba yerleştirilir ve vulkanizasyon (kauçuk karışımının sertleştirilmesi) işlemine tabii tutulur ya da

kürleştirilerek keçeye son şekli verilir. Vulkanizasyon işlemi tersine döndürülemez ve malzemeye istenilen özelliklerinin kazandırılabilmesi için bu işlem dikkatle takip edilmelidir. Malzeme sızdırmazlığı sağlanacak akışkanla uyumlu, aşınmaya ve yırtılmaya dayanıklı olmalı, uzun süre de özelliklerini koruyabilmelidir.

Metaller bir yüke maruz kaldıklarında Hooke kanununa göre hareket ederler, yani bir değere kadar elastik davranırken sınır değeri aşıldıktan sonra plastik şekil değişimi gösterirler. Şekil 3.16 a'da görüldüğü üzere elastisite sınırları içinde uygulanan yükün kalkması halinde malzeme eski halini alır. Termoplastik ve elastomer malzemeler ise yük altında hem elastik bir katı gibi (enerji depolama) davranırken hem de viskoz sıvı maddelerin özelliklerini (enerji yutma) gösterirler. Şekil 3.16 b'de görüldüğü üzere bir elastomer malzeme hem esnek hem plastik davranış göstereceği için uygulanan yük kalkınca eski durumuna dönmeden kalıcı bir şekil değişimi olur ve geri dönüş zamanı daha uzundur. Viskoelastik özellikler zaman, sıcaklık ve şekil değişimi hızından etkilenirler. Elastomer malzemeler sabit bir gerilme altında kaldıklarında deforme olurlar (sürünme). Bu malzemelerde verilmiş belirli bir birim uzamanın sabit kalabilmesi için gerekli gerilme değeri zamanla azalmalıdır. Elastomerlerin bu özelliklerinden dolayı bazı durumlarda keçedeki ön gerilmenin korunabilmesi için garter yayı kullanılmalıdır.



Şekil 3.16 : Metallerin Hooke kanununa göre davranışı (a) ve kauçuk malzemenin esnek ve plastik davranışı (b).

Elastomer malzemelerde dikkat edilmesi gereken bir diğer özellikse sertliktir. Sızdırmazlık elemanlarında kullanılan elastomer malzemelerin sertliği 40-45 Shore A ya da 90-95 Shore A değerleri arasında olabilir. Shore sertliğinde geçen sayı büyüdükçe sertlik artmaktadır. Yumuşak malzemeler aşınmaya ve basınca daha az direnç göstermelerine karşın pürüzlü yüzeylerde daha iyi çalışırlar. Dinamik keçelerde sertlik arttıkça sıklık ve çapsal yük değeri azaltılır. Bunun sonucunda sürtünme kuvvetleri azaltılmış olur. Sıklık miktarı sabit tutulursa, sertlik arttıkça

Çalışma sırasında sürtünme kuvveti de artacaktır. Bu da g tüketiminin artışı anlamına gelmektedir. Elastomer malzemenin sertliği keçe performansını etkileyen özelliklerden biri olduğundan dolayı malzeme seçimi yapılırken diğer özellikler gibi göz önünde bulundurulması ve uygulamaya uygun malzeme kullanılması oldukça önemlidir

3.3.4 Dönel dudaklı keçelerde kullanılan elastomer malzemeler

3.3.4.1 Nitril butadien kauçuk (NBR)

Nitril butadien kauçuk diğer malzemelere göre ucuz, aşınmaya ve yağlara karşı dirençli olduğu için en çok kullanılan baz polimerdir. NBR'nin katkı maddeleri ile ozon ve açık hava direnci arttırılabilir. Nitril oranı ve viskozitesi özelliklerini büyük lde etkiler. Nitril oranı %18 den 45 e dek arttıkça NBR malzemesinin:

1. Yağ, çözücülere karşı direnci artar,
2. Sertlik, modül ve sürekli kalıcılığı artar,
3. Sıcağa karşı direnci artarken, düşük sıcaklıklara direnci azalır.

NBR ile ilgili en büyük olumsuzluk yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmamasıdır. Bu sıcaklıklarda malzeme sertleşir, çatlar ve mil ile olan sıkılığını kaybederek sızdırmazlık görevini yerine getiremez. Uygulamada NBR malzemesinden yapılmış dönel dudaklı keçeler -40 ile +110  C arasında çalışabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda malzeme katılaşır ve mil dönerken keçede çatlak oluşabilir. NBR, bütadien ve akrilonitril (ACN) monomerlerinin birleşmesi ile oluşur. NBR'nin dayanabileceği maksimum sıcaklık ACN oranının arttırılmasıyla artar ancak bu durumda minimum sıcaklık değeri de artacaktır. ACN oranı düşürüldüğü takdirde ise minimum çalışma sıcaklığı azalırken üst sıcaklık limiti kötüleşir. NBR hafif çalışma koşulları için uygun bir seçimdir.

3.3.4.2 Yüksek yoğunluklu nitril butadien kauçuk (HNBR)

HNBR, 135 C'a kadar sertleşmeden esnekliğini koruyabilen gelişmiş bir nitril polimerdir. Bu malzeme, aşınmaya, yağlara ve yüksek basınç katkılarına dirençlidir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda çalışmaya uygun bir malzemedir. Ancak imalat süreci diğer malzemelere kıyasla daha zorludur. Bir diğer dezavantajı da yüksek maliyetli oluşudur. HNBR malzemesi, NBR malzemesine göre oldukça maliyetlidir.

3.3.4.3 Poliakrilik kauçuk (ACM)

Nitril ile fluoroelastomer arası özelliklere sahiptir. Sızdırmazlık elemanı olarak mineral yağ, hipoid yağ ve greslerde kullanılır. Çatlama ve yaşlanma direnci çok iyi olduğu için yağ keçesi malzemelerindendir. NBR'ye göre daha pahalı bir malzeme olan ACM yüksek sıcaklıklarda iyi performans sergiler. Dişli yağlarındaki yüksek basınç katkılarına karşı dirençlidir. Bu polimerler ayrıca motor ve şanzıman sıvılarında da 135°C'ye kadar iyi bir performans gösterirler. Poliakrilik polimerlerin su, asit, baz ve diğer polar çözücülere maruz kalan sızdırmazlık elemanlarında kullanımı tavsiye edilmez. Nem de malzeme özelliklerini etkileyen bir etmendir. Poliakrilik polimerlerin düşük sıcaklıklarda kullanılması durumunda dikkatli olunması gerekmektedir. Bazı poliakrilik polimerler düşük sıcaklıklarda kırılgan hale gelebilir ve -15°C'de kırılabilir. Bazı polimerlerse -40°C'ye kadar sorunsuz çalışabilir. Ayrıca poliakriliklerin kuru sürtünme karakteristikleri oldukça kötüdür ve erken arızalara sebep olabilecek geniş çaplı aşınmalar dudakta gözlenebilir.

3.3.4.4 Etilen akrilik (AEM)

Etilen Akrilik sıcaklık, yağ ve hava direnci gerektiren yerlerde kullanılır. Ozona, açık havaya ve suya karşı dirençlidir. Yırtılma ve kopma direnci iyidir. Sürekli kalıcılık ve sönümlenme özellikleri iyidir. Ancak ester, keton, yüksek aromatik akışkanlarda ve yüksek basınçlı buharda kullanımı uygun değildir. Sızdırmazlık elemanı malzemesi olarak dişli sistemlerde poliakrilikğin yerine kullanılmaktadır. Neme ve düşük sıcaklıklara karşı dirençleri poliakriliklerin dirençlerinden daha iyidir. Düşük sıcaklıklarda nadiren kırılırlar. -40°C'den 150°C'ye kadar sorunsuz çalışırlar.

3.3.4.5 Silikon (VMQ)

Silikon, ısıya ve soğuğa direncinin ve izolasyon özelliğinin çok iyi olması gibi üstün özellikleri nedeni ile geniş kullanım alanına sahiptir. Sızdırmazlık elemanı olarak krank keçeleri, soba ve fırın contaları olarak ayrıca buzluk ve buzdolabı sızdırmazlığı ve ozon üniteleri sızdırmazlığında kullanılır. Silikonun ozon, hava ve neme karşı direnci çok iyidir. Yaşlanma direnci yüksektir. Silikon oldukça geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. -70°C'den 150°C'ye kadar yumuşak ve esnek olarak kalabilmektedir. Mali açıdan NBR'ye göre daha pahalıdır. Pahalı olmasının yanında mekanik özellikleri de kötüdür. Kolay yırtılabilir, aşınmaya dirençli değildir. Yüksek basınç katkılarına ve yağlara direnci azdır. Ayrıca silikonun kuru sürtünme

karakteristikleri oldukça kötüdür ve uygulama sırasında bu durum dudakta büyük yırtılmalara yol açabilir. Az yağlı uygulamalarda silikon keçeler yağlanarak monte edilir ve böylece stick-slip önlenmiş olunur.

Silikon yağı kolayca absorbe edebilir ve keçe dudağı %30'u kadar ya da daha fazla şişebilir. Bu yüzden imalatçılar silikon dudağın üzerine genelde oldukça ağır garter yayları koyarak şişme gerçekleştiğinde oluşacak sıkılık kaybını mümkün olduğunca sınırlandırmaya çalışırlar. Silikon keçeler benzine, klorlu yağlara ve aromatik çözücülere maruz kaldıklarında kullanılamazlar. Genelde uygulamada sık sık zarar görürler. Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında silikon kullanımı çeşitli problemlerden ve sınırlamalardan dolayı azalmıştır.

3.3.4.6 Fluorosilikon (FVMQ)

Özellikle havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan gelişmiş bir malzemedir. Çok iyi bir sıcaklık direnci vardır. Ancak, oldukça maliyetlidir. Yağlara ve çeşitli kimyasallara karşı oldukça dirençlidir ve normal silikona göre şişme özelliği oldukça azdır. Düşük sıcaklıklar için uygundur ve genellikle yakıt sistemlerinde kullanılan statik sızdırmazlık elemanları için bu malzemeden faydalanılır. Dönel sızdırmazlık elemanı olarak kullanımı ise pahalı ve kuru sürtünme karakteristiklerinin kötü olmasından dolayı sınırlıdır.

3.3.4.7 Floroelastomer (FKM)

Yüksek sıcaklık ve kimyasal direnci çok iyidir ancak oldukça maliyetlidir. Asit, petrol yağları, hidrokarbonlar gibi çeşitli kimyasal ortamlardan etkilenmez. Yağlara ve çeşitli kimyasallara karşı direnci mükemmeldir ve çok az şişme gösterir. Bu yüzden keçe malzemesi olarak kullanımı günden güne artmaktadır. FKM 205°C ye dek dayanıklıdır. Aşınmaya karşı dirençlidir. Düşük sıcaklıklarda çok sertleşir ve mil titreşimlerini sürtünmeden dolayı ısınana kadar takip etmeyebilir. FKM yüksek hız ve sıcaklıklarda az miktarda yağlayıcının kullanıldığı uygulamalar için önerilir.

3.3.4.8 Politetra fluoroetilen (PTFE)

Politetrafluoroetilen, flor ve karbon atomlarının aralarında bağ oluşturmasıyla ortaya çıkan plastik bir hammaddedir. NBR'ye göre oldukça pahalıdır ancak çok geniş bir sıcaklık aralığı boyunca neredeyse tüm akışkanlara karşı dirençlidir. PTFE, bütün endüstriyel plastikler içinde en geniş çalışma sıcaklığı aralığına (-260°C - 270°C)

sahip oluşu, kimyasal maddelere dayanımı, bütün katılar içinde en düşük statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip oluşu, stick-slip (yapış-kay) özelliği ve mekanik özelliklerinin yeterli oluşu nedeniyle çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. En büyük dezavantajı aşınma direncinin az olmasıdır. Aşınma direncinin yüksek olması gereken yerlerde alaşımlı PTFE yeğlenmelidir. Bronz, grafit, cam elyafı katkılı PTFE'nin mekanik özellikleri daha iyidir. Sızdırmazlık elemanı olarak yağlamasız çalışan ve stick-slip istenmeyen ortamlarda, aktif kimyasal ortamda, O-halkası ve özellikle piston yatağı olarak uygun malzemedir.

PTFE, kauçuklarda bulunan elastiklikten yoksundur, polietilene benzer şekilde yarı sert bir malzemedir. PTFE keçelerde, dudak baskısı garter yayları ya da benzeri yöntemlerle sağlanmalıdır. Kolayca zarar görebildiği için montajı sırasında dikkatli olunmalıdır. Plastik bir malzeme olduğu için mil yalpalamalarını ve titreşimlerini düzgün bir şekilde karşılamayacaktır o yüzden sızdırmazlık elemanı olarak kullanıldığında özel tasarımlara ihtiyaç duyulur. Yüksek hız ve sıcaklıklarda az miktarda yağlayıcının kullanıldığı uygulamalarda öncelikli olarak kullanılırlar.

3.3.4.9 Termoplastik poliüretan (TPU)

Termoplastik poliüretan elastomer (TPU), yüksek aşınma direncine ve üstün fiziksel özelliklere sahiptir. Poliüretanın diğer malzemelere kıyasla en büyük avantajı, formülasyonunda değişiklik yapılarak birbirinden çok farklı sertlik, yoğunluk ve elastikiyete sahip ürünler elde edilebilmesidir. Termoplastik poliüretanlar yüksek çekme dayanımı, uzama ve elastikiyet gibi çok iyi fiziksel özelliklere sahiptir. Çizelge 3.1'de TPU'nun özellikleri görülebilir. Yeşil renkli bir malzemedir. Kimyasal yapılarına ve Shore sertliğine bağlı olarak TPU malzemesinin bazı türleri (60 - 95 Shore A) 45 MPa' a kadar çekme dayanımına sahiptir. Daha sert türleri (50 - 70 Shore D) ise 45 MPa'dan bile yüksek çekme dayanımına sahip olabilmektedir.

TPU malzemesinin en önemli fiziksel avantajları; aşınma direncinin yüksek olması, yüksek mekanik özelliklere sahip olması, geniş sıcaklık aralığında elastik özelliğini koruyabilmesi, düşük elektriksel iletkenliğe sahip olması ve düşük kalıp çekme özelliğidir.

TPU'nun en önemli kimyasal avantajları; yağ ve gres direnci, mikrobiyolojik dayanım, hidroliz dayanımı, ozon direnci ve oksidasyon dayanımıdır. Diğer malzemelere kıyasla sürtünme karakteristiği oldukça üstündür.

Çizelge 3.1 : TPU’nun özellikleri.

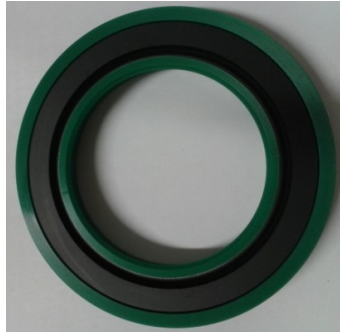
	Birim	Değer	Standart
Renk	-	Yeşil	
Sertlik	Shore A	95 ±2	DIN 53505
Sertlik	Shore D	48 ±3	DIN 53505
Yoğunluk	gr/cm ³	1,20 ±0,01	DIN EN ISO 1183-1
Çekme mukavemeti	N/mm ²	≥ 40	DIN 53504
Kopma uzaması	%	≥430	DIN 53504
Aşınma	mm ³	18	DIN ISO 4649
Maksimum çalışma sıcaklığı	°C	110	-
Minimum çalışma sıcaklığı	°C	-30	-

TPU malzemesi, NBR ve FPM malzemelerine göre çok daha iyi mekanik özelliklere sahiptir (Çizelge 3.2). Özellikle çekme dayanımı kauçuk elastomerlere göre oldukça yüksektir.

Çizelge 3.2 : TPU ve NBR’nin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

	Çekme mukavemeti DIN 53504	Kopma uzaması DIN 53504	Aşınma DIN 53516
TPU	50 N/mm ²	480 %	18 mm ³
NBR	17 N/mm ²	150 %	90 mm ³

TPU malzemesi sızdırmazlık alanında düşük sürtünme ve aşınmanın ayrıca uzun çalışma ömrünün istendiği uygulamalar için uygundur. Dudaklı keçe (Şekil 3.17), o-ring ve piston keçeleri gibi elemanlarda kullanılabilir [9, 15].



Şekil 3.17 : Termoplastik poliüretan malzemesinden bir dudaklı keçe.

3.3.4.10 Hidrolize karşı dayanıklı termoplastik poliüretan (H-TPU)

H-TPU diğer poliüretanların aksine hidrolize karşı oldukça dayanıklıdır. 90°C’ye kadar su içerisinde kararlılığını koruyabilir ve mineral yağlar içerisinde mükemmel şekilde sürekliliğini korur. H-TPU, hidrolize dirençli olmasından dolayı suda çalışan hidrolik ekipmanlar, madencilik, tünel açma ve pres uygulamalarında kullanılabilir.

Özellikle bitkisel yağlar ve sentetik ester gibi biyolojik olarak parçalanabilir hidrolik sıvılarda, saf su ve deniz suyunda, gıda maddelerinde ve de ateşe dayanıklı hidrolik sıvılar olan HFA ile HFB’de kullanımı tavsiye edilen bir malzemedir. H-TPU ve TPU malzemelerinin mekanik özellikleri yaklaşık olarak aynıdır. Çizelge 4.3’te H-TPU’nun özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.3 : H-TPU’nun özellikleri.

	Birim	Değer	Standart
Renk	-	Kırmızı	
Sertlik	Shore A	95 ±2	DIN 53505
Sertlik	Shore D	48 ±3	DIN 53505
Yoğunluk	gr/cm ³	1,20 ±0,01	DIN EN ISO 1183-1
Çekme mukavemeti	N/mm ²	≥ 50	DIN 53504
Kopma uzaması	%	≥330	DIN 53504
Aşınma	mm ³	17	DIN ISO 4649
Maksimum çalışma sıcaklığı	°C	110	-
Minimum çalışma sıcaklığı	°C	-20	-

H-TPU malzemesi sızdırmazlık alanında düşük sürtünme ve aşınmanın, uzun ömrün istendiği ve hidrolize karşı direncin gerektiği uygulamalar için uygundur. Dudaklı keçe (Şekil 3.18), o-ring ve piston keçeleri gibi elemanlarda kullanılabilir [9, 15].



Şekil 3.18 : H-Termoplastik poliüretan malzemesinden bir dudaklı keçe.

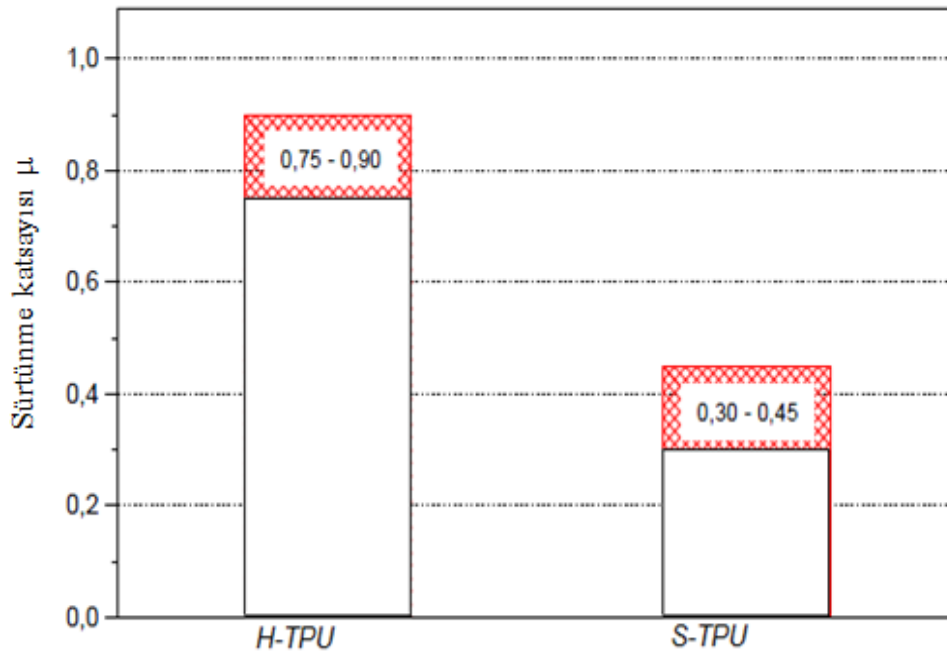
3.3.4.11 Kendinden yağlayıcı termoplastik poliüretan (S-TPU)

S-TPU malzemesinde katı yağlayıcıların çeşitli kombinasyonlarının eklenmesiyle sürtünme azaltılmış, aşınma direnciyse artırılmıştır. Suda çalışan hidrolik ekipmanların ve yağsız çalışan pnömomatiklerin en ağır uygulamaları için oldukça uygun bir malzemedir. Çizelge 4.4’te S-TPU malzemesinin özellikleri görülebilir.

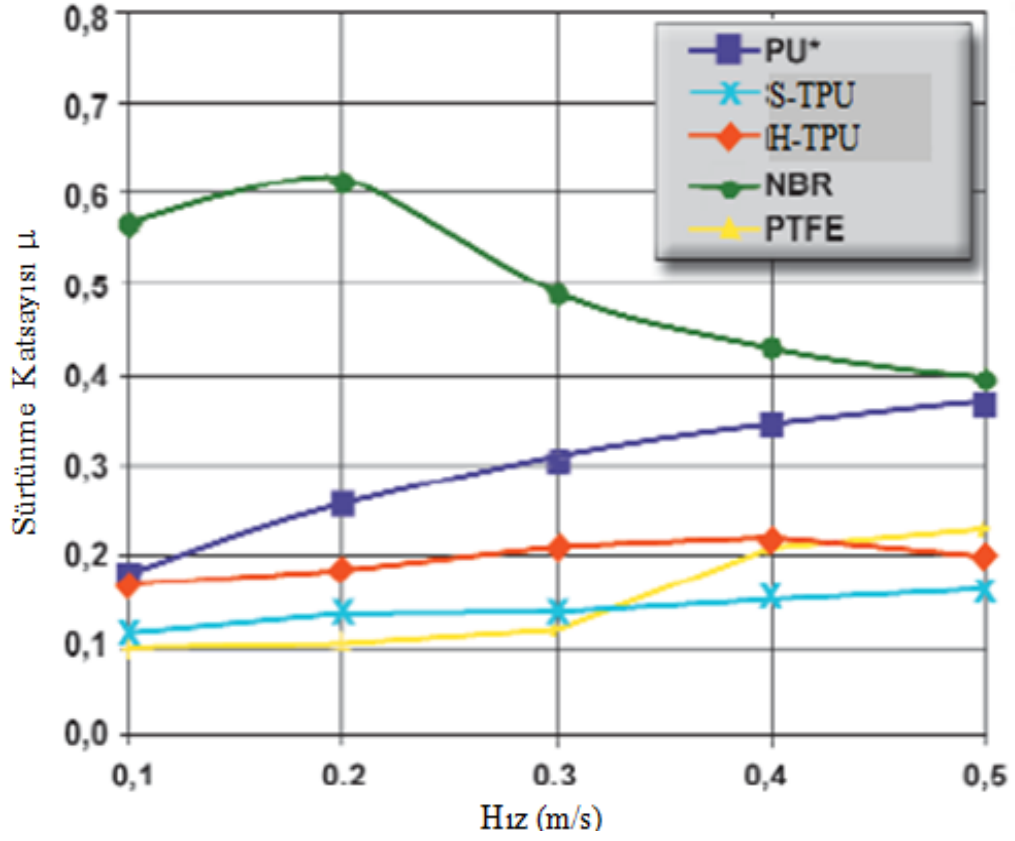
Çizelge 3.4 : S-TPU'özellikleri.

	Birim	Değer	Standart
Renk	-	Siyah/Gri	
Sertlik	Shore A	95 ±1	DIN 53505
Sertlik	Shore D	48 ±3	DIN 53505
Yoğunluk	gr/cm ³	1,23 ±0,02	DIN EN ISO 1183-1
Çekme mukavemeti	N/mm ²	≥ 48	DIN 53504
Kopma uzaması	%	≥400	DIN 53504
Aşınma	mm ³	21	DIN ISO 4649
Maksimum çalışma sıcaklığı	°C	110	-
Minimum çalışma sıcaklığı	°C	-20	-

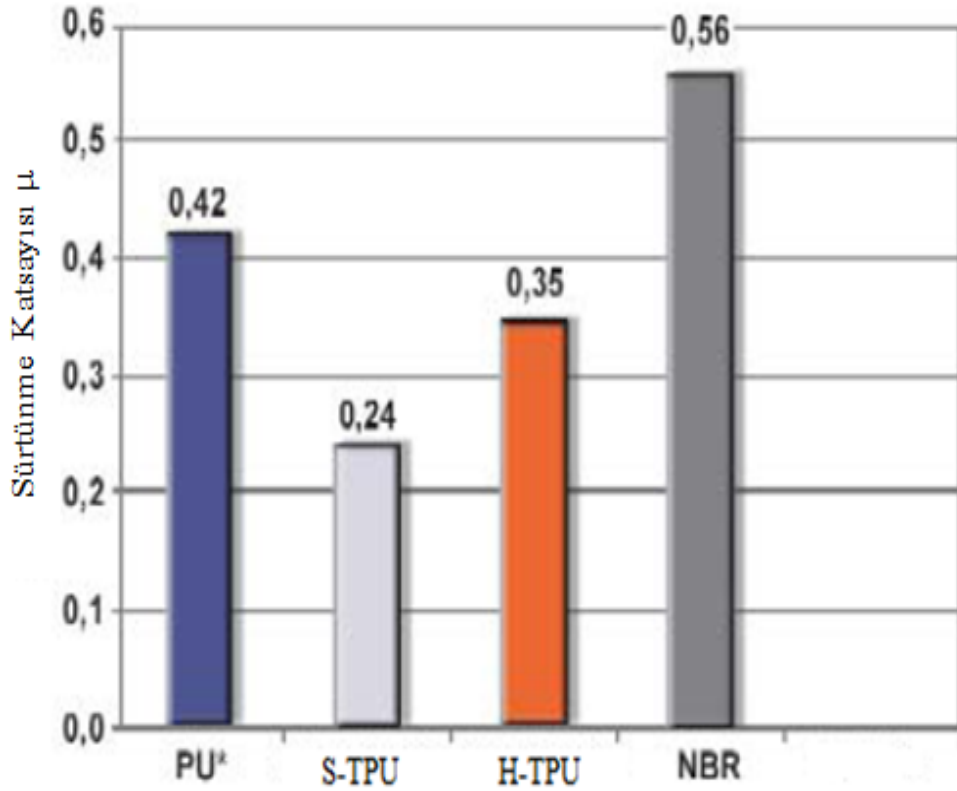
S-TPU malzemesinin sürtünme katsayısı H-TPU'ya göre oldukça düşüktür (Şekil 3.19). Şekil 3.20'de çelik üzerinde sınır sürtünme şartları altında çeşitli malzemelerin sürtünme katsayılarının hıza göre değişimi görülmektedir. Buna göre 0,3 m/s'den yüksek hızlarda S-TPU'nun sürtünme katsayısı değerleri PTFE'nin sürtünme katsayısı değerlerinden daha düşüktür. Şekil 3.21'de ise 14 saat boyunca 5 MPa yüke kaldıktan sonra sürtünme katsayıları ölçülen malzemeler görülmektedir. Buna göre S-TPU'nun sürtünme katsayısı standart poliüretanın sürtünme katsayısının neredeyse yarısı kadardır [21].



Şekil 3.19 : Yağlanmamış çelik üzerinde test edilen S-TPU ve H-TPU malzemelerinin sürtünme katsayıları.

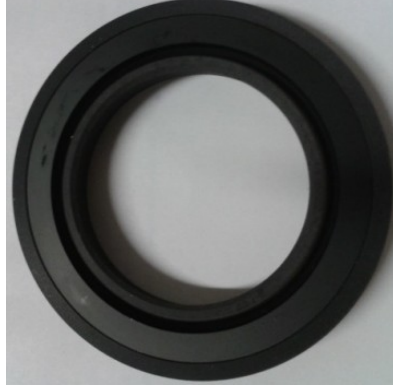


Şekil 3.20 : S-Termoplastik poliüretan ve değişik malzemelerin hıza göre sürtünme katsayıları.



Şekil 3.21 : S-Termoplastik poliüretan ve değişik malzemelerin 14 saat 5 Mpa yüke maruz kaldıktan sonra sürtünme katsayıları.

S-TPU malzemesi yüksek tribolojik özelliklere sahip olduğundan dolayı sızdırmazlık alanında pünomatik uygulamalarında, kuru sürtünmenin, yüksek hızın ve yüksek basıncın olduğu koşullarda kullanılabilir. Su gibi yağlama özelliği kötü olan akışkanların kullanıldığı uygulamalar için kullanımı da uygundur. Şekil 3.22’de S-TPU malzemesinden bir dudaklı keçe görülmektedir [20].



Şekil 3.22 : S-Termoplastik poliüretan malzemesinden bir dudaklı keçe.

4. SIZDIRMAZLIK MEKANİZMASI

4.1 Dinamik Sızdırmazlık Mekanizması

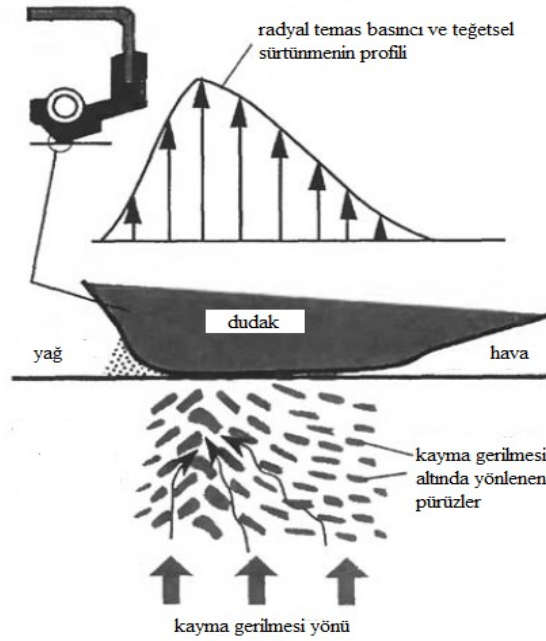
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sızdırmazlık elamanının hava tarafına bir miktar yağ konulduğunda bir süre sonra yağ tarafına geçtiği gözlenmiştir. Çalışmada keçe bir süre kuru sürtünmeye maruz kaldıktan sonra hava tarafına koyulan bir miktar yağ öncelikle mil ve dudak arasında hava tarafına yakın kenarda menüsküs oluşturur. Yağın sızdırmazlık ara yüzeyine geçmesi sonucu ise buradaki sürtünmede azalma olur ve yağ tarafına geçişin tamamlanmasıyla sürtünme yine artar. Çalışmalar boyunca 80 mm çapındaki bir milin yaklaşık 0,03 ml hacmindeki bir damla yağı 1000 devirde yağ tarafına pompaladığı anlaşılmıştır. Dudağın hava tarafındaki β ve yağ tarafındaki α açılarının eşit olması durumunda ise yağ tarafına doğru pompalamanın olmadığı gözlenmiştir. Bu yüzden dudak geometrisini oluşturan açıların belirli aralıklar içerisinde olması gerektiği görülmüştür [11].

Tersine pompalama etkisi sızıntıyı etkisiz hale getirdiği için dinamik sızdırmazlık mekanizması olarak adlandırılır ve bu mekanizmayı açıklamak için mikro ve makro sızdırmazlık mekanizması olmak üzere iki model öne sürülmüştür.

4.1.1 Mikro sızdırmazlık mekanizması

Keçe montajı yapıldıktan sonra çapsal yükten dolayı dudak mil ile temas eder ve temas çizgisinde bir basınç oluşur. Dudak profilinde yağ tarafındaki açılı hava tarafındakinden büyük olduğu için oluşan temas basıncı profili asimetriktir (Şekil 4.1). Radyal temas basıncı profilinin maksimum noktası temas bölgesinin yağ tarafına daha yakın olarak oluşur. Milin dönmesi sonucunda temas bölgesinde sürtünme kaynaklı kayma gerilmesi oluşur. Bu kayma gerilmesi elastomer yüzeyini maksimum teğetsel şekil değişimi ile maksimum radyal temas basıncı çıkaracak şekilde deforme eder. Yani maksimum teğetsel şekil değişimi dağılımı temas basıncı dağılımını yansıtır. Maksimum temas basıncının iki tarafında pürüzler maksimum kayma gerilmesi etkisiyle birbirlerine ters yönde deforme olurlar. İçleri yağ dolu olan birbirlerine göre ters yönlenmiş pürüzler yağı temas basıncının maksimum olduğu

noktaya doğru pompalarlar. Dudak geometrisi sebebiyle bu yön değiştirici durum karşısında hava tarafında yağ tarafında olduğundan daha fazla deforme olmuş pürüz bulunur. Bu yüzden de pompalama kapasitesi temas çizgisinin iki tarafında farklıdır. Normal bir uygulamada yağ öncelikle kapiler etki ve yağ tarafındaki pürüzlerin pompalama etkisi ile sızdırmazlık alanına girer. Yağ sızdırmazlık yüzeyine nüfuz ettikten sonra ters pompalama devreye girer. Hava tarafındaki mikropompalama daha güçlüdür böylece hidrodinamik denge sağlanır. Dönel sızdırmazlık elemanı sızıntı olmadan yağ filminin üzerinde hareket etmeye başlar. Böylece kapiler etki ile temas bölgesindeki pürüzlere nüfuz etmiş olan yağ mikropompalama ile hava tarafından yağ tarafına pompalanır. Klasik hidrodinamik ve yatak teorisine göre yağ filminin olduğu durumlarda aksel yönde yağ kaçağının olması beklenir ancak bu durumda mikropompalama ile sızdırmazlık sağlanmaktadır.



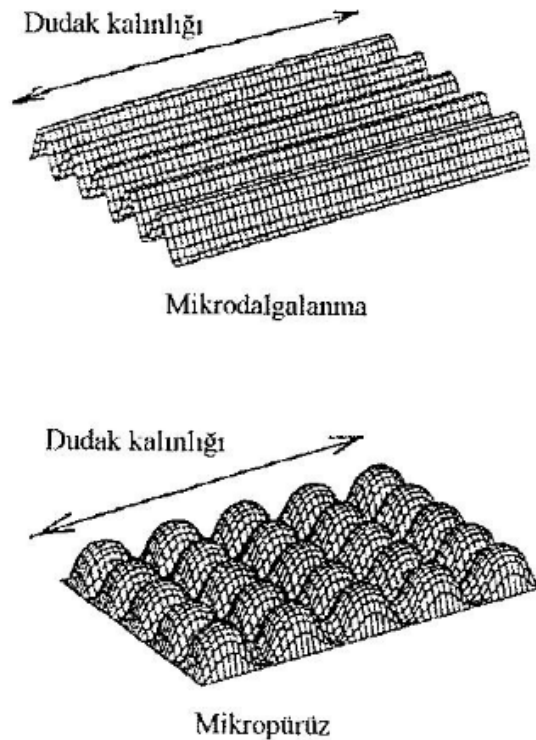
Şekil 4.1 : Dönel dudaklı keçede radyal temas basıncı ve teğetsel sürtünme profili.

Mikropompalamayı etkileyen faktörlerden biri de pürüzler arası kavitasyondur [15]. Ortalama film kalınlığında az da olsa bir değişim olması basınçta gradyen oluşmasına sebep olacaktır. Bu da mikropompalamayı olumlu yönde etkiler. Toplam mikropompalamanın üçte ikisi kayma gerilmesi sebebiyle mikropürüzlerin pompa gibi davranmasından kaynaklanırken üçte biri kavitasyon sebebiyle oluşan mikropompalamadır [16].

Sızdırmalılık elemanının yüzeyi, mil yüzeyi, dudak geometrisi ve çapsal yük mikrosızdırmazlık mekanizmasına etkileyen faktörlerdir.

4.1.1.1 Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanının yüzeyi

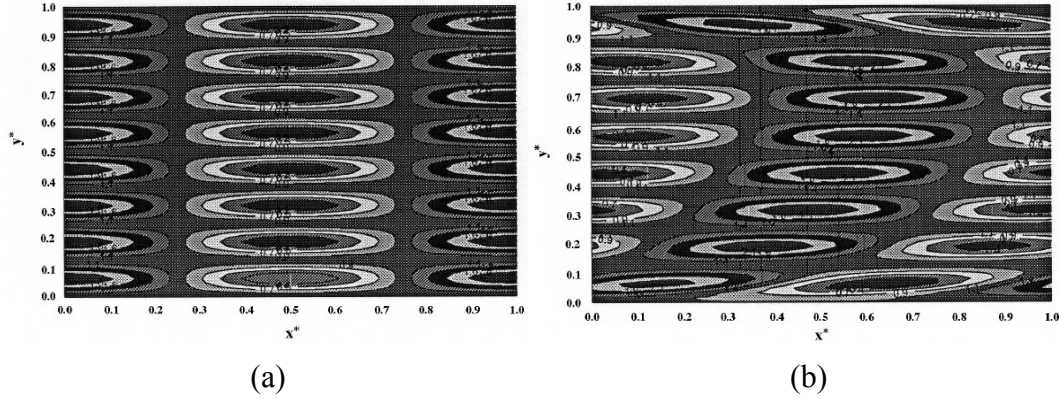
Uygun bir elastomer seçimi ile imal edilmiş dudaklı sızdırmazlık elemanın yüzeyinde monte edilmesinden sonra milin ilk birkaç dönüşünde karakteristik aşınma dokusu (characteristic wear pattern) oluşur [11]. İmalatta kalıptan pürüssüz olarak çıkan elastomerin yüzeyinde alışma süresinde oluşan bu aşınma dokusu mikrodalgalanma ve mikropürüzler şeklinde gerçekleşir ve de birkaç mikrometre derinliğindedir (Şekil 4.2). Mikrodalgalanma ve mikropürüzler muhtemel sızıntıları yağ tarafına geri ileten mikropompalama mekanizmasında etkilidir. Ancak mikrodalgalanma dudaklı keçelerin az bir kısmında görülen bir özelliktir. Mikropompalamanın esas kaynağı mikropürüzler olarak tanımlanabilir [17]. Birim genişlikte yaklaşık 8-10 adet mikropürüze rastlanır [18].



Şekil 4.2 : Keçe dudağında mikrodalgalanma ve mikropürüz.

Mikropürüz oluşumu elastomerin yapısıyla ilgilidir. Bu yüzden imalat süreci iyi bir sızdırmazlık için önemli bir rol oynar. Mikropürüzlerin sızdırmazlıktaki önemi keşfedildikten sonra kontrol altında olmayan bir aşınma sonucunda oluşmaları yerine sistematik olarak oluşturulmaları için çalışılmıştır ve yapay pürüzlendirme yapılmıştır. Ancak elastomer malzemenin kalitesiz olması durumunda yapay pürüzler kaybolacaktır ve elastomer yüzeyi pürüzsüzleşerek sızdırmazlık özelliğini kaybedecektir.

Elastomer yüzeyinde mikropürüz oluştuktan sonra bu pürüzler daha fazla aşınmaya sebep olmayacak şekilde yağ cepleri oluştururlar. Yağ bu cepleri mil döndükçe teğetsel yönde kayma gerilmesine maruz bırakır. Şekil 4.3’de mikropürüzlerin kayma gerilmesi altındaki görünüşleri görülmektedir [16]. Y-ekseni temas bölgesinin kalınlığını ifade etmektedir. Mikropürüzler dudak temas açıları ve garter yayının pozisyonu sebebiyle oluşan asimetrik basınç dağılımının etkisiyle şekildeki gibi şekil değiştirmişlerdir.



Şekil 4.3 : Mikropürüzlerin kayma gerilmesi altındaki görünüşleri (a) statik durumda mikropürüzler (b) kayma gerilmesi etkisi altında mikropürüzler.

4.1.1.2 Mil yüzeyi

Dönel sızdırmazlık elemanı ile temas halinde olan mil yüzeyinin kalitesi sızdırmazlık fonksiyonunun gerçekleşmesinde önemli bir rol oynar. Mil yüzeyi keçe dudağının ne çok fazla aşınmasına yol açacak kadar pürüzlü ne de elastomer yüzeyinde mikropompalama yapacak pürüzlerin oluşmasını sağlayamayacak kadar pürüzsüz olmalıdır. Daldırma tipi taşlama bu durum için önerilir. Bu yöntem ile mil yüzeyinde talaş kaldırma izlerinin sebep olduğu ve dönme yönüne bağlı olarak pompalama yaparak kaçağa sebebiyet veren mikroskobik vida dişlerinin oluşumuna engel olunur.

Yönlendirilmiş mil yüzeyi milin bir vidalı pompa gibi davranmasına yol açarak yağı, dönüş yönüne göre yağ tarafına ya da hava tarafına pompalar. Uç açısı arttıkça milin yaptığı pompalama etkisi de artacaktır. Uç açısı $0,1^\circ$ 'yi geçtiğinde milin pompalama etkisi kaçağa sebep olur. Kaçağa sebep olmayacak uygun uç açısı Kauçuk Üreticileri Birliği tarafından yaklaşık olarak $0,05^\circ$ olarak açıklanmıştır [19].

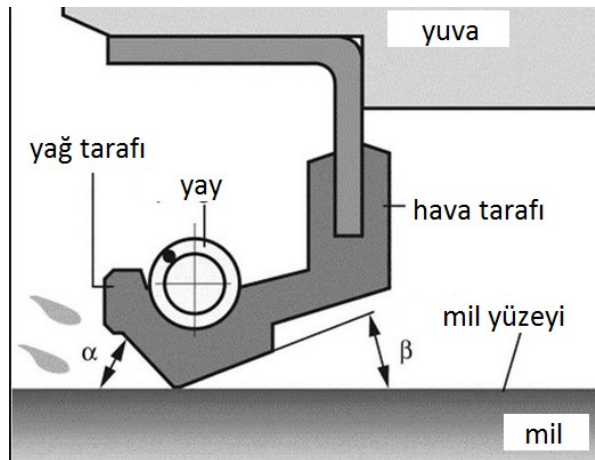
Mil yüzey pürüzlülüğünün (R_a) optimum değeri $0,2-0,6 \mu m$ olarak belirlenmiştir (R_a 'nın tanımı için ISO 4287/1'e bakılabilir). Mil sertliği de C30 ile C45 arasında hatta bazı durumlar için C55 Rockwell sertliğinde olabilir. Mil pürüzleri statik

durumdayken yağ depolayarak çalışma başlangıcında yağ filmi oluşumuna etki eder. Alışma sırasında dudakta mikropürüz oluşumunu sağlar. Yağ filminin hidrodinamik ve elastohidrodinamik özellikleri sebebiyle yük kaldırma mekanizması ve sızdırmazlık mekanizmasında etkili olur [13].

Yağ filmi hem pompalama mekanizmasının çalışmasını sağlar hem de sürtünme ısını ve aşınmayı azaltır. Yağ filminin kırılmaması keçenin sağlıklı çalışması açısından önemlidir. Milin yüzey kalitesi yağ filminin sürekliliğini etkiler. Mil yüzeyindeki çizikler yerel olarak yağ filminin kalınlaşıp kırılmasına ve yağ kaçağına sebep olur. Yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması durumunda mil yüzeyindeki pürüz tepe noktaları yağ filmini yırtarak keçe dudağının kuru sürtünmeye maruz kalmasına yol açar. Kuru sürtünmeye maruz kalan keçe dudağı hızla ısınır ve aşınır. Yüzey pürüzlülüğünün yetersiz olduğu durumda ise yağ filmi yüzeye tutunamaz ve kaçak oluşur.

4.1.1.3 Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında dudak geometrisi

Şekil 4.4'te bir dudaklı keçenin yapısı görülmektedir. Sızdırmazlık arayüzeyi iki konik yüzeyin kesişimidir. Yağın olduğu taraftaki α açısının, havanın bulunduğu taraftaki β açısından daha büyük olması keçenin sızdırmazlık fonksiyonunu yerine getirebilmesi için çok önemlidir. Yapılan çalışmalarda dudak temas açıları α ve β eşit olduğu takdirde pompalamaya sebep olan dudak asimetrikliği olmayacağı için pompalama gözlenmez ve keçe sızdırmazlık görevini yerine getiremez. Yapılan çalışmalar sonucu optimum sızdırmazlığın $\alpha=40^\circ-60^\circ$, $\beta=20^\circ-35^\circ$ açıları için sağlandığı görülmüştür [11].



Şekil 4.4 : Dönel sızdırmazlık elemanının dudak yapısı.

Dönel dudaklı keçelerde sızdırmazlık ara yüzeyi 0,1-0,2 mm genişliğinde olan oldukça dar bir banttır. Sızdırmazlık temas bandının şekli, pozisyonu ve yaya göre konumuyla oldukça ilgilidir. Temas bandı sızdırmazlık performansını etkileyen bir etmendir. Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarında dudak temas genişliği kullanılmamış keçeler için 0,1-0,15 mm iken 500-1000 saatlik kullanımdan sonra bu değer 0,2-0,3 mm'ye çıkar [6]. Keçenin aşındırıcı bir ortamda çalıştırılması durumunda ise dudak temas genişliği 0,5-0,7 mm'ye kadar ulaşabilir.

Garter yayı, mil üzerinde olması gereken sürekli basıncı sağlar. Yay kaçıklığı aksel yönde yay ekseni ile sızdırmaz yüzey arasındaki uzaklıktır (R değeri) ve de 0,4-0,7 mm arasında olmalıdır. Yay ekseni çizgisi hava tarafında ise R değeri pozitif yağ tarafında ise negatiftir. Negatif R değeri kaçağa sebep olur.

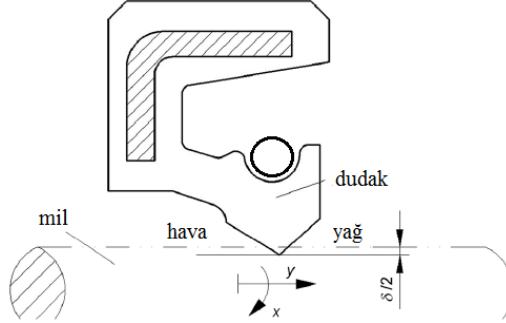
Keçenin üst ve yan yüzeylerinin daha sağlam olması amacıyla metal bilezik kullanılır. Normal şartlarda keçenin çalışması sırasında oluşacak iç basıncın en fazla 0,5 bar olması istenir. Basınç arttıkça keçenin ömrü de artış oranında azalır.

Keçe dudağının biçimi ilk olarak keçenin ilk montajı sırasında gerçekleşir. Mil birkaç devir tamamladıktan sonra ise keçe dudağı mile belli bir genişlikte temas edinceye kadar aşınır ve bu alan altında yağ filmi oluşur. Yağ film kalınlığı sızıntının gerçekleşmemesi için 1 μ m ile 3 μ m arasında olmalıdır. Mil ile düzleşen keçe dudağı arasındaki yağ filmi, hava tarafı ile akışkan tarafı arasında yarım ay şeklini alır. Bu yarım ay şeklinde oluşacak her kırılma sızıntıya sebebiyet verir. Bu noktada da sızdırmazlık bölgesinde yüzey kalitesi önem kazanır. Çizikler, yırtıklar ve yüzey hataları yağ filminin kalınlaşmasına ve sonuçta kırılarak yağ sızmasına sebep olacaktır.

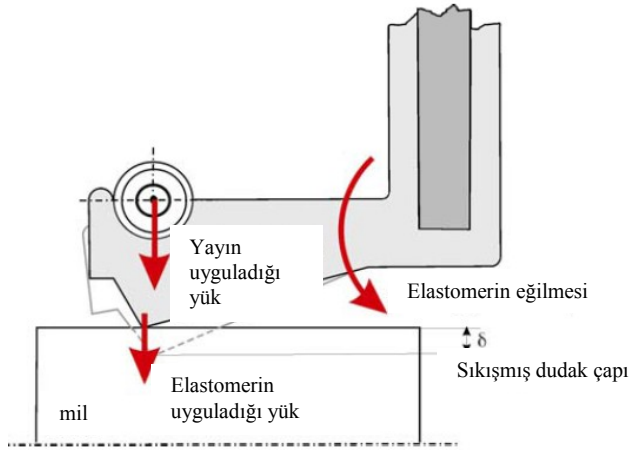
4.1.1.4 Çapsal yük

Çapsal yük garter yayının meydana getirdiği yük ile keçe dudağının milin çapından küçük olmasından kaynaklanan sıkı geçmenin meydana getirdiği yükün toplamına eşittir. Şekil 4.5'te δ keçe iç çapı ile mil dış çapı arasındaki fark olmak üzere montajdan sonra sıkışmış dudak çapı görülmektedir. Elastomer malzemelerin yapılarından dolayı bazı özellikleri uygulama sırasında değişiklik gösterir. Sıcaklık ve zamanla değişen bu özelliklerinden dolayı çapsal yükte zamanla düşme gözlenir ancak garter yayı kullanılarak bu düşüş kompanse edilmektedir. Şekil 4.6'da keçe montajından sonra radyal yükü oluşturan bileşenler ayrıntılı olarak görülmektedir.

Garter yayı radyal yükün %50'sini oluştururken elastomerden kaynaklı yükün %40'ını dudağın mil üzerine uyguladığı baskı oluşturur. Elastomerin eğilmesi ise radyal yükün kalan %10'unu oluşturur [2].



Şekil 4.5 : Dönel sızdırmazlık elemanının montajdan sonra sıkışmış dudak çapı.

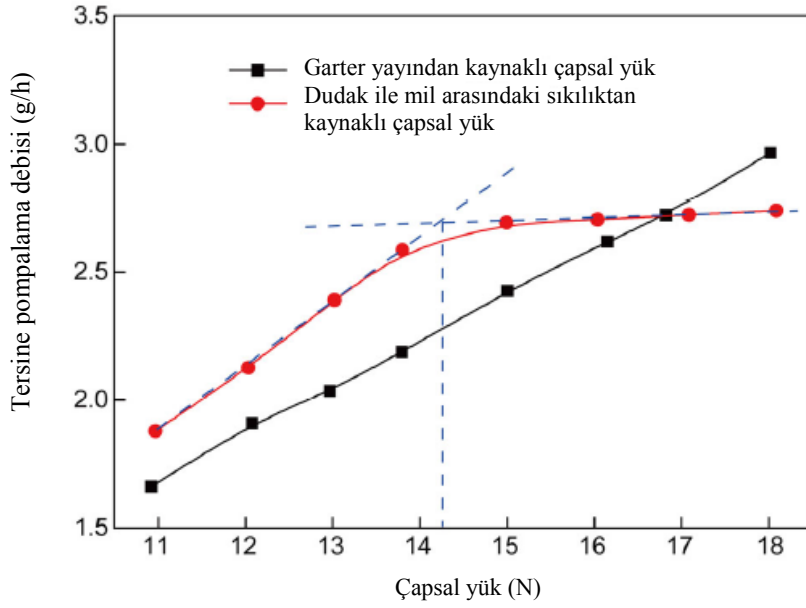


Şekil 4.6 : Dönel sızdırmazlık elemanında çapsal yükü oluşturan bileşenler.

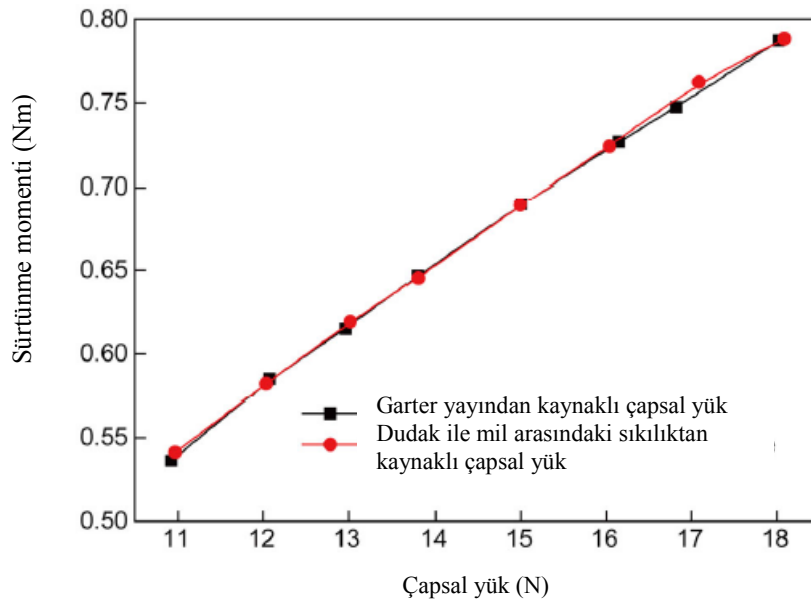
Çapsal yük aşınma ve kaçak oluşumu ile bağlantılı olduğu için keçe tasarımında önemli bir rol oynar. Çapsal yükün çok küçük olması durumunda milin hareketlerini karşılayamayan keçe kaçağa sebep olur. Çapsal yükün gerekenden fazla olması durumunda ise temas basıncı fazlalaşır, sürtünme momenti yükselir ve dudak aşırı bir aşınmaya maruz kalır. Bu durumda keçe ömrü kısılacaktır. Önceleri iyi bir sızdırmazlık performansı için radyal yükün mümkün olduğunca yüksek olması gerektiği düşünülürdü. Ancak aşınma ve sürtünmenin dikkate alınmasıyla radyal yükün sızdırmazlığı sağlayacak kadar olmasının yeterli olduğu anlaşılmıştır.

XiaoHong Jia, Fei Guo ve Le Huang tarafından yapılan çalışmalar sonucunda garter yayından kaynaklı çapsal yükün artışıyla mikropompalama oranının arttığı gözlenirken sıkılıktan kaynaklı çapsal yükün artmasıyla artan mikropompalama oranının belli bir değerden sonra sabit kaldığı anlaşılmıştır (Şekil 4.7). Çalışmada

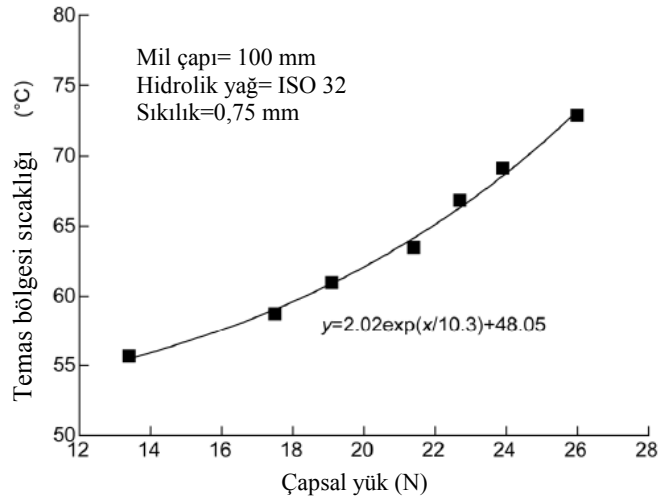
ayrıca hem garter yayından ve hem de sıkılıktan kaynaklı çapsal yükün artmasıyla sürütme momentinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.8). Bu yüzden keçe tasarımında mikropompalama ile sürütme moment değerleri arasında dengenin sağlanabileceği bir sıkılık değerinin seçilmesi önemlidir. Çapsal yük ayrıca dudak sıcaklığını da etkileyen bir faktördür. Şekil 4.9’da 2000 devir/dakika için çapsal yükün arttırılmasıyla temas bölgesindeki sıcaklığının arttığı görülmektedir [1].



Şekil 4.7 : Dönel sızdırmazlık elemanlarında çapsal yükün mikropompalamaya etkisi.



Şekil 4.8 : Dönel sızdırmazlık elemanlarında çapsal yükün sürütme momentıyla ilişkisi.



Şekil 4.9 : Dönel sızdırmazlık elemanlarında çapsal yükün temas bölgesindeki sıcaklığa etkisi.

Dönel dudaklı keçelerde çapsal yükü etkileyen faktörlerden biri olan nominal sıklık değerleri uygulamaya göre değişir. Milin düşük dönme hızlarında çalıştığı bir uygulama için kullanılan bir basınç keçesinde yüksek sıklıklar olabilirken, yüksek dönme hızlarında kullanılan keçeler sürtünmeden kaynaklı sıcaklık artışını azaltmak için daha düşük sıklıklarda olmalıdır. Keçelerde iç çap sızdırmazlık performansını etkileyen bir faktördür ve uygun değerlerde seçilmelidir. Keçe dudağı ve mil arasındaki sıklığın çok fazla olması durumunda yüksek çapsal yükleme ve tork oluşmasının yanı sıra dudakta da aşırı bir ısınma gözlenecektir. Sıklığın gereğinden daha az olması durumunda ise keçe mil titreşimlerini ve kaçıklığı karşılayamaz. Bu durumlarda dudakta ya da milde herhangi bir aşınma olmamasına rağmen sızıntı gözlenebilir. Keçe dudağı ile mil arasındaki sıklık dudak malzemesine, uygulama şartlarına, mil ölçülerine bağlıdır. Sıklık değerleri 1,25 ile 3,75 mm arasında değişebilir. Çizelge 4.1’de dönel dudaklı sızdırmazlık elemanları için Kauçuk Üreticileri Birliği tarafından belirlenen keçe iç çap toleransları görülebilir [8, 12].

Çizelge 4.1. : Keçe iç çapı toleransları (RMA-Kauçuk Üreticileri Birliği).

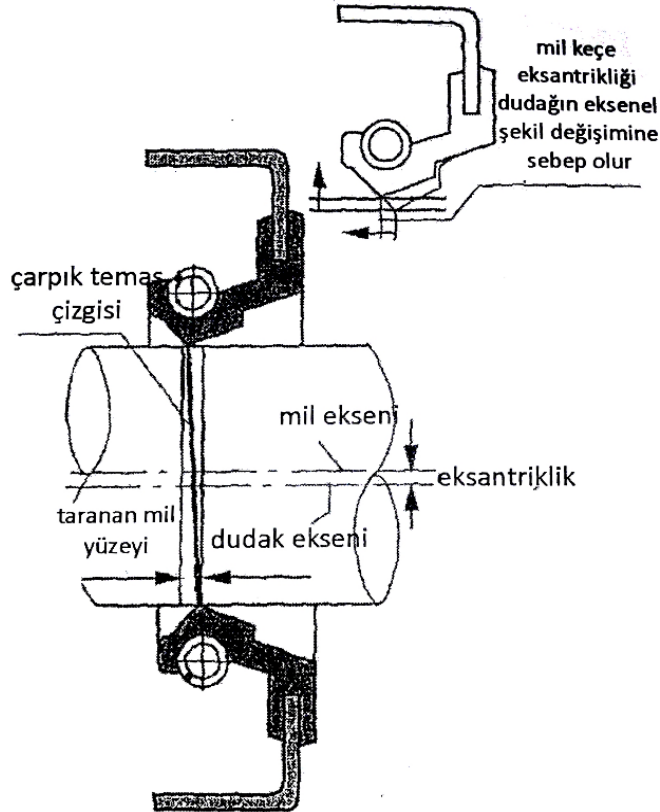
Mil Dış Çapı dm	Dudak İç Çapı
$dm \leq 75$	± 0.50
$75 < dm \leq 150$	± 0.65
$150 < dm \leq 250$	± 0.75

Sonuç olarak çapsal yük belirtildiği üzere yağ kaçağı, aşınma ve enerji tüketimi konusunda bir denge sağlanmalıdır. Uygulama sırasında dudağın, başlangıçtaki yükünün yarısını muhafaza etmesi beklenir. Bu ortalama 1N/mm^2 radyal temas

basıncına ve 0,2 N/mm çapsal yüke tekabül eder. Yeni keçelerde 0,1-0,15 N/mm kabul edilebilir bir aralıktır. Bu şartlarda 80 mm çapındaki bir dönel dudaklı sızdırmazlık elemanı mile ortalama 25-40 N civarında bir yük uygular [6].

4.1.2 Makro sızdırmazlık mekanizması

Sızdırmazlık elemanı yuvaya tam oturmayabilir ya da keçe imalat toleranslarından ötürü sızdırmazlık elemanının bileziği ile dudağı arasında açısall bir eksantrisite oluşabilir. Bazen de yuva ile milin ekseni paralel olmayabilir. Bu etkilerden dolayı mil dönerken keçe dudağı mile göre küçük boyutta bir doğrusal hareket yapar (Şekil 4.10). Bu hareket milin dönme frekansıyl a aynı frekansa sahiptir ve strok uzunluğu açısall eksantrisiteye bağılıdır. Doğrusal hareket yapan sızdırmazlık elemanı pompalama işlemini basınç gradyeninin daha dik olduğı tarafa doğru yapar yani dönel sızdırmazlık elemanında açısall bir eksantrisite olduğı takdirde pompalama dudak açısının daha büyük olduğı tarafa doğru olur. Çalışmalar keçenin çarpıklığı arttıkça sızdırmazlık elemanının pompalama debisinin arttığını göstermektedir. Çarpık keçe dudağı daha fazla mil yüzey alanı tarar bu da daha iyi bir yağlama ve soğutma demektir. Bu prensipten faydalanarak WaveSeal™ keçeler imal edilmiştir.



Şekil 4.10 : Makro sızdırmazlık mekanizması.

4.2 Dönel Dudaklı Sızdırmazlık Elemanlarının Performansına Etkiyen Parametreler

Keçelerin çalışma performansına mil, keçe yuvası, yağlama basınç ve sıcaklık gibi pek çok faktör etkilimtedir. Çalışmanın bu bölümünde mil ve keçe yuvası tasarımı, basınç, sıcaklık, yağın viskozitesi, montaj esnasında yapılan hatalar (eksantriklik, keçe bükülmesi) gibi etkiler incelenmiştir.

4.2.1 Mil tasarımı

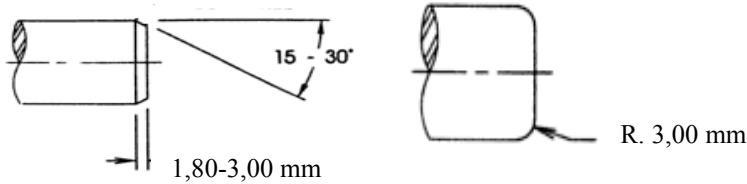
Keçe dudağı mil ile temas halinde olacağından mil geometrisi ve yüzey kalitesi sızdırmazlık performansını etkileyen önemli bir faktördür.

Mil malzemesi olarak genellikle makina yapımında kullanılan çelikler (SAE 1035,1045) mil için uygundur. Ancak mile ısıtım ve nitrüleme yapılmalıdır. Mil malzemesi olarak grafit dağılımlı gözeneksiz dökme demir kullanıldığı takdirde keçe temas bölgesinde gözenek genişliği 0,05 mm den küçük olmalıdır. Sulu ortamda düşük hızlar için pirinç alaşımı kullanılabilir. Ancak bu tip uygulamalarda paslanmaz çelik en uygun malzemedir. Mil malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılıyorsa bu malzemenin nikel içerdiğinden dolayı ısı iletimini azalttığı ve yüksek hızlarda dudak sıcaklığının fazlalaştığı unutulmamalıdır. Plastik malzemelerin ısı iletkenliği çok azdır. Bu yüzden mil malzemesi olarak kullanılmaya uygun değildirler. Plastik malzemelerde ısı yetersiz iletilmesi nedeniyle keçe temas bölgesinde yüksek sıcaklık oluşur ve mile zarar verir. Seramik burçlar aşınmaya çok dayanıklıdır ve özel uygulamalarda çok iyi sonuç verirler. Yumuşak metaller (bakır, kurşun, bronz, alüminyum) sızdırmazlık açısından başlangıçta olumlu sonuç verebilir, fakat keçe dudağının aşındırması sonucu çok çabuk sızıntıya yol açarlar. Özel durumlarda, düşük yüzey hızında (1-2 m/s) ve keçe dudağındaki sıkılık azaltılarak kullanılabilirler. Yüksek hızlarda ise sert malzeme kullanmak gerekir.

Mil yüzey sertliği için Rockwell C30 sertliği yeterlidir. Ancak taşıma ve montaj sırasında, zayıf yağlama ve aşındırıcı ortamda yüzeyin zedelenmemesi için Rockwell C45 önerilen değerdir. Krom ya da nikel kaplama sayesinde sert bir yüzey elde edilirken korozyona karşı da önlem alınmış olunur. Tozlu ve kirli ortamda ya da mil yüzey hızının 4 m/s'yi geçtiği durumlarda mil sertliği en az Rockwell C55 olmalı ve 0,3 mm içeri işlemelidir. Mil yüzeyini sertleştirirken çok ani soğutma yapılmamalıdır. Ani soğutma yüzeyde kristal tabaka oluşturacağından, sürtünme

nedeniyle oluşacak yüksek frekanstaki titreşimler kristallerin ayrışmasına ve aşındırıcı parçacık durumuna gelmesine yol açar.

Keçe dudağının mile temas ettiği bölgede torna kalem ve taşlama izi olmamasına dikkat edilmelidir. Taşlama işleminde yüzeyden tamamen talaş kaldırmak gerekir. Nitrürlenmeden sonra da parlatma işlemi yapılmalıdır. Milin üzerinde helis çizikler olması durumunda bunlar yağı içeri pompalayacak biçimde olmalıdır. Mil yüzeyindeki pürüzler mikropompalamada aktif rol oynayan keçe yüzeyindeki pürüzlerin oluşumunda etkilidir. Ayrıca mil üzerindeki pürüzler çalışma esnasında yağı depolayarak mikropompalamaya katkıda bulunurlar. Mil yüzey pürüzlülüğünün istenenden fazla olması dudakta yırtılmalara ve istenmeyen şekilde pürüzlenmeye yol açar [17]. Ayrıca pürüzlülüğün az olması da mikropompalamayı olumsuz yönde etkiler. Mil yüzey pürüzlülüğü $R_a = 0,2$ ile $0,8 \mu m$ arasında olabilir [6]. ISO 6194/1 standardında belirtilen yüzey pürüzlülük değerleri ise $0,25 \mu m$ ile $0,50 \mu m$ arasındadır [7]. RMA OS-1 standartlarına göre ise $0,20-0,50 \mu m$ mil yüzey pürüzlülüğü için uygundur [8]. Mil ucu köşeleri çentik ve pürüzden arınmış bir şekilde yuvarlatılmalıdır böylece keçenin montajı sırasında dudağın zarar görmesi önlenmiş olunur (Şekil 4.11). Mil çapı ölçüsü ise ISO standartlarına göre h11 toleransına göre işlenmelidir [6].



Şekil 4.11 : Mil ucu pah ve yuvarlatma ölçüleri.

4.2.2 Keçe yuvası tasarımı

Keçenin yuvaya montajı pres geçme şeklinde olmalıdır. Yuva malzemesi seçilirken malzemenin ısı genleşme miktarı göz önünde bulundurulmalıdır. Hafif metaller, plastik ve benzeri malzemeler kullanılırsa, yuva ısındığında yuva çapı ile keçe dış çapı arasındaki sıkılık azalacaktır bu da keçe yuvasından yağ sızmasına yol açar. Dış kauçuk kaplı keçelerin geçme toleransı daha sıkı olduğundan dolayı dışı metal keçelere göre daha güvenlidirler. Ayrıca kauçuk malzemenin genleşme katsayısı daha fazla olduğundan, yuvanın genleşmesini kolayca dengeler.

Yuva ölçüsü için H8 toleransı uygulanır. Et kalınlığı az olan yuvalarda keçeyi çakarken çatlama ya da kırılma olabilir. Bu durumu önlemek için dışı kauçuk kaplı

keçe kullanılabilir ya da H8 toleransı yerine F8 toleransı tercih edilebilir. Yuva sertliği için istenen belli bir değer yoktur ancak yeterli dirençte olmalıdır. Yuvanın temiz işlenmesi ise yuva yüzeyindeki uzunlamasına çizgiler sızma kaynağı olabileceğinden önem taşımaktadır.

Yuvanın kenarlarına 1,5 – 3 mm uzunluğunda 15° – 30° derecesinde pah kırılmalıdır böylece keçenin dış yüzeyinin montaj esnasında zarar görmesi önlenir. Yuva derinliği ise keçe genişliğine göre değişir.

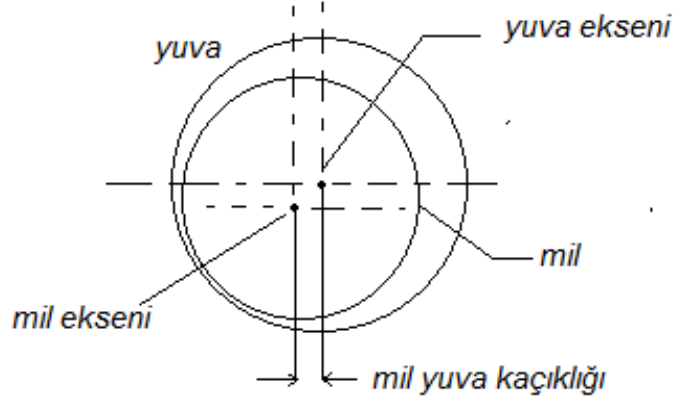
Yuva ile keçe arasından sızıntı olmaması için yuva yüzey pürüzlülüğü $Ra = 1,6$ ile $3,2 \mu m$ arasında olmalıdır [7]. Yüzey pürüzlülüğü $Ra = 2,54 \mu m$ 'den büyük ise dışı kauçuk olan keçelerin kullanılması tavsiye edilir [12].

4.2.3 Yağ sıcaklığı

Yağ sıcaklığı keçe performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Belirli bir hızda yağ sıcaklığı arttırıldığı takdirde yağın viskozitesi düşer bu yüzden tork ve güç tüketiminde de düşüş olur. Sabit sıcaklıkta hız arttırıldığıdaysa sürtünmenin artması sonucu tork ve güç tüketimi artar. Keçenin yağ pompalama kabiliyeti hem hız hem de sıcaklık arttıkça artmaktadır. Ancak sıcaklığın en büyük etkisi keçe ömrü üzerinde görülür. Sıcaklık artışı keçenin ömrünü kısaltır. Sıcaklık artışıyla beraber keçenin yapısındaki nitril malzemesinde sertleşme meydana gelir. Bunun sonucu olarak keçe esnekliğini yitirir ve milin hareketlerini takip edemez. Aynı sıcaklıkta poliakrilat malzemenin sertleşmesi nitrile göre 10-15 kat daha fazla zaman alır. Bu süre silikon, fluoroelastomer malzemeler içinse daha da uzundur. Sabit sıcaklık altında hızın arttırılması sonucu dudak sıcaklığı artar ve keçe ömrü kısalmır. Yapılan çalışmalarda hız on kat arttırıldığında keçe ömrünün yarıya düştüğü gözlemlenmiştir [12].

4.2.4 Mil yuva kaçıklığı

Mil yuva kaçıklığı, keçe eksenini ile yuva ekseninin üst üste gelmemesinden ve aralarında fark olduğu durumda meydana gelir (Şekil 4.12). Bu durum statik kaçıklık olarak da adlandırılır. İmalat ve montaj hataları bu kaçıklığın oluşmasına sebebiyet verebilir. Statik kaçıklık temas basıncının düzgün dağılmasını engeller. Bu da sızdırmazlık elemanının bir yanında aşırı yüksek basınç diğer yanında ise daha düşük bir basınç oluşmasını anlamına gelir. Bu keçenin sızdırmazlık performansını etkiler hatta bazen yağ filminin kopmasına bile yol açabilir. Mil yuva kaçıklığı sızdırmazlık performansının olumsuz etkilenmemesi için 0,25 mm'den fazla olmamalıdır.



Şekil 4.12 : Mil yuva kaçıklığı.

4.2.5 Dinamik kaçıklık

Dinamik kaçıklık montaj, imalat kusurları, titreşim, milin eğilmesi ya da milin dengelenmemiş olması gibi sebeplerden dolayı oluşur ve mil yüzeyinin mil ekseninde dönmemesi durumudur. Mil doğru ekseninde dönmemesinden ötürü radyal doğrultuda hareket eder (mil salgısı). Keçe dudağı tasarım ve malzeme açısından milin bu hareketlerini takip edebilecek kapasitede olmalıdır. Aksi takdirde oluşacak boşluklardan sızıntı gerçekleşir. Keçe dudağı özellikle yeterince esnek değilse mil ile dudak arasında boşluklar oluşacak ve sızıntı meydana gelecektir. Ayrıca kabul edilebilir salgı miktarı mil dönüş hızına da bağlıdır.

Dinamik kaçıklık mil ekseninin yuvadan kaçıklığından daha önemlidir. Çünkü ikincisinde çapsal yönde statik yük söz konusudur ve daha sıkı keçe dudağı ile bu aksaklık giderilebilir. Dinamik kaçıklık ise keçe dudağının bütün çevresini aşındırır, özellikle yüksek devirlerde atalet nedeniyle önem kazanır. Dinamik kaçıklık kabul edilir sınırı geçerse, keçenin sızdırdığı miktar çok fazlalaşır. Titreşim ve esnemeyi, dolayısıyla dinamik kaçıklığı en aza indirmek için keçe sırtını yatağa dayamalı ve yatak oynamamalıdır. Eksenden kaçıklık değerleri belirtilen sınırlar içinde kalmışsa yay yükü ve uygun esneklikteki gereç ile başarılı sonuç alınır.

Mil yuva kaçıklığını ve dinamik kaçıklığı 0,0 – 0,5 mm arasında değiştirmek keçe dudağındaki sıcaklıkta, dudaktaki sürtünme momentinde, güç tüketiminde ya da pompalamada önemli bir değişiklik meydana getirmez [20]. Keçe ömrü ise mil yuva kaçıklığının 0,0 – 0,5 mm arasında değişmesinden etkilenmezken dinamik kaçıklığın aynı aralıkta değişmesi durumunda olumsuz etkilenecektir. Dinamik kaçıklık 0,6 mm'yi aşarsa keçe ömründe önemli oranda bir azalma gözlenir.

4.2.6 Açısal kaçıklık

Daha önce makropompalama konusunda değinilen açısal kaçıklık (angular misalignment) ya da başka bir deyişle keçe bükülmesi (seal cocking) keçe arka yüzeyinin mil eksenine göre dik olmaması durumudur. Açısal kaçıklık belli değerler arasındayken sızdırmazlık elemanının pompalama özelliğini artırır ancak belli sınırları aştığı takdirde keçede bozulma ve yağ kaçağı meydana gelir.

4.2.7 Yağlayıcı

Yağ performansları katkılar ile iyileştirilebilir ancak bu katkılar elastomer ile etkileşime girerek sertleşmesine yol açabilir. Bu yüzden sızdırmazlık elemanı seçilirken kullanılacak yağlayıcı göz önünde bulundurulmalıdır. Yağ viskozitesinin azalmasıyla sürtünme ve harcanan güç azalır.

4.2.8 Yağ seviyesi

Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanları kuru sürtünmeye maruz bırakılmamalıdır. Yağlama olmadan çalıştırılan keçelerde yüksek aşınma ve tutma bırakma (stick-slip) gözlenir. Yağ yüksek aşınmayı ve dudak temas bölgesinde oluşabilecek aşırı ısınmaları önler. Milin İçinde bulunduğu yağ seviyesi keçe ömrünü etkileyen bir faktördür. Yağ seviyesi azaldıkça keçe ömrü de azalır. Ayrıca yağ seviyesi ısının dağılabilme kapasitesini belirler. Milin tamamı yağ içinde kalırsa ısı yeterince iyi dağılamaz. Yapılan çalışmalara göre ısının iyi bir şekilde dağılabilmesi için milin %25'i yağ içerisinde olması gerektiği anlaşılmıştır [12].

4.2.9 Basınç

Standart keçeler 0,5 bara kadar kullanılabilir. Yüksek basınçlar hava tarafındaki dudağı mile bastırır ve dudağın hızlı bir şekilde normalden daha fazla aşınmasına yol açar. Ayrıca dedak temas bölgesinde yüksek sıcaklıklar meydana gelir. Bu gibi etkilerden dolayı yüksek basınçlar dönel dudaklı keçe ömrüne etki eder ve azaltır. Yüksek basınçlar için farklı tasarımlara sahip basınç keçeleri kullanılması gerekmektedir. Yüksek basınç keçeleri beş bara kadar çalışabilme özelliğine sahiptirler.

4.2.10 Çevreden gelen kirletici maddeler ve toz dudağı

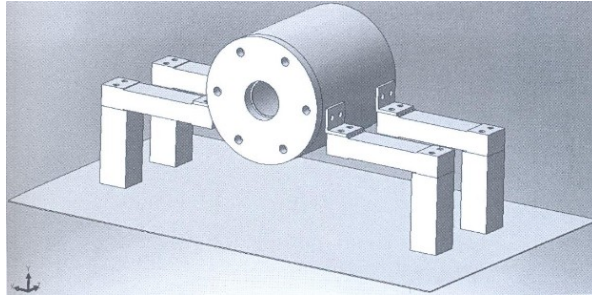
Çevredeki toz ve çeşitli kirletici maddeler dudak yüzeyini aşındırarak yağ filminin kopmasına yol açabilir. Ayrıca keçeden geçerek sisteme giren kirletici maddeler diğer makine elemanlarına da zarar verebilir. Bu yüzden kirli ortamlarda toz dudaklı keçeler kullanılabilir. Ancak bu keçelerde ana dudak ile toz dudağı arasında biriken tozlar mil yüzeyini aşındırabilir. Bu yüzden çift dudaklı keçelerin ömrü tek dudaklı keçelere göre düşüktür ancak toz dudağının mile temas etmediği keçe tasarımlarında toz birikmesi gerçekleşmeyeceği için keçe ömründe de iyileşme gözlenir.

Radyal ve eksenel toz dudakları kir ve tozun sisteme girişini önlerler. Radyal toz dudağı kısa ve yaysız olup keçenin hava tarafında mile göre radyal doğrultuda uzanarak toz ve kirin sisteme girişine engel olur. Eksenel toz dudakları da yaysız dudaklardır ancak kirin ve tozun girişini önlemede daha verimlidirler. Radyal ve eksenel toz dudakları dışında iki adet birbirine zıt yönlü yaylı dudakta toz ve kiri önleme amacıyla kullanılabilir.

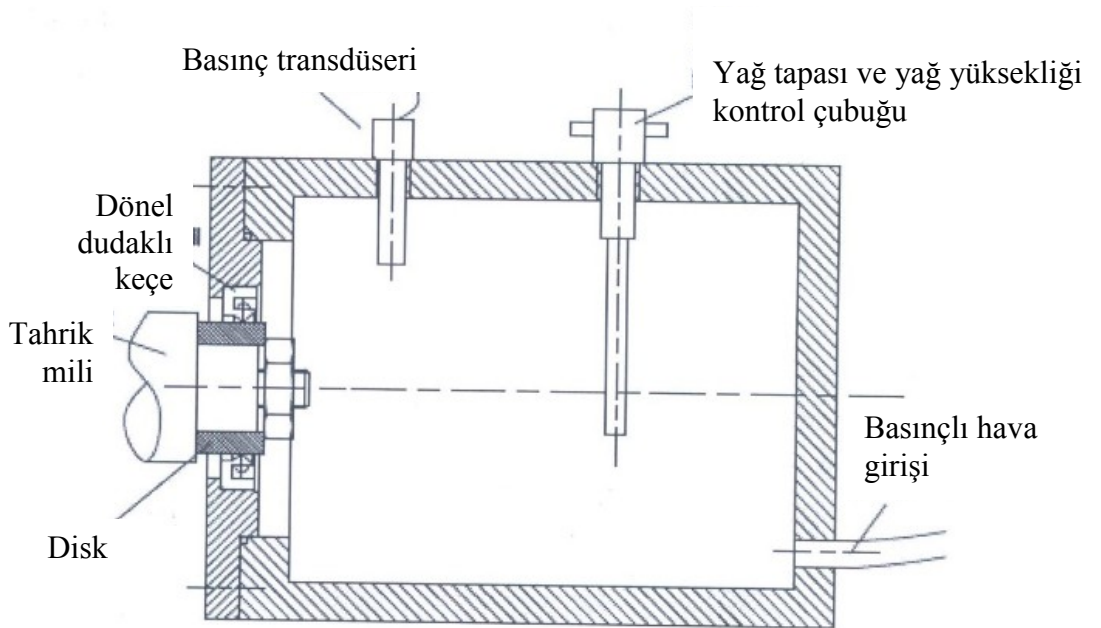
5. DENEY TESİSATI VE DENEYİN YAPILIŞI

5.1 Deney Tesisatı

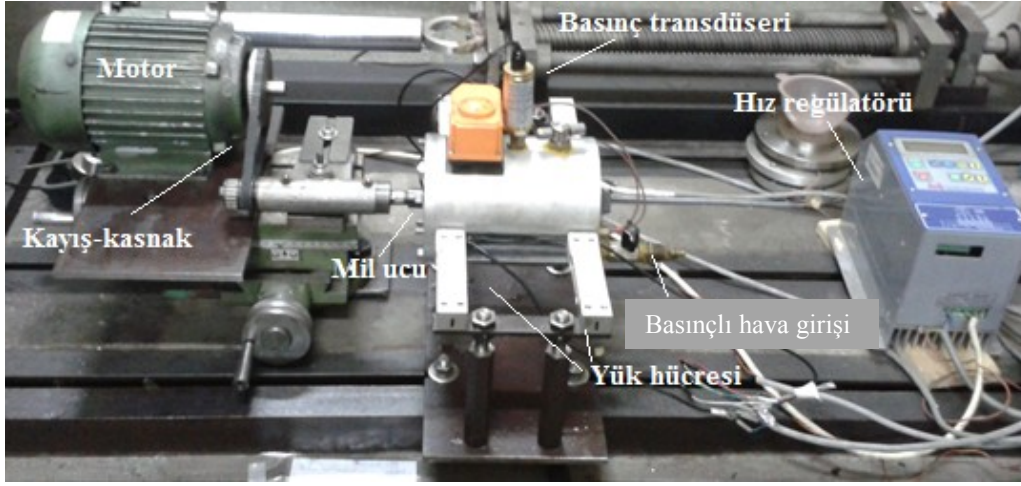
Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının performansına çapsal yükün etkisini gözlemlemek amacıyla Şekil 5.1’de genel görünüşü, Şekil 5.2’de prensip şeması ve Şekil 5.3’te genel görünüşü verilen deney düzeneği standart ömür testinden yola çıkılarak tasarlanmıştır. Sistemde kullanılan yağ yüksek performanslı endüstriyel dişli yağıdır. Tablaya bağlı mil ucu kapağın içindeki keçenin içine doğru itilerek montaj tamamlanır ve motor ile tahrik edilir.



Şekil 5.1 : Deney tesisatının şematik görünüşü.



Şekil 5.2 : Deney tesisatının prensip şeması.



Şekil 5.3 : Deney tesisatının genel görünüşü.

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere deney düzeneği bir silindir blok ve dört adet yük hücresinden oluşmaktadır. Sistem 0 ile 1500 d/d arasında hızı ayarlanabilen bir motor ile tahrik edilmektedir. Motor mile kayış kasnak aracılığıyla bağlanmıştır. Mil devir sayısı optik bir takometre aracılığıyla ölçülebilmektedir. Silindir içerisine yağ konabilecek şekilde bir gövde ve kapaktan oluşmaktadır. Kapaktaki yuvaya keçe monte edilebilmektedir. Keçenin çalışması sırasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti dört kanallı veri toplama cihazı aracılığıyla ölçülmüş ve oradan da sürtünme momentine geçilmiştir. Ayrıca silindir blok üzerine yerleştirilen %2 hassasiyetinde 0 ile 2 bar arasında ölçüm yapabilen basınç transdüseri ile silindir içerisindeki basınç kontrol edilebilmekte ve ayarlanabilmektedir.

Deney düzeneğinde dalma tipi yağlama esas alınmıştır. Yüksek performanslı endüstriyel dişli yağı kullanılmıştır. Yağın viskozitesi ISO standartlarına göre (ISO 12925-1) 150 cSt'dir. Kullanılan yağın fiziksel özellikleri Çizelge 5.1'de görülmektedir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.1 : Deneyde kullanılan yağın fiziksel özellikleri.

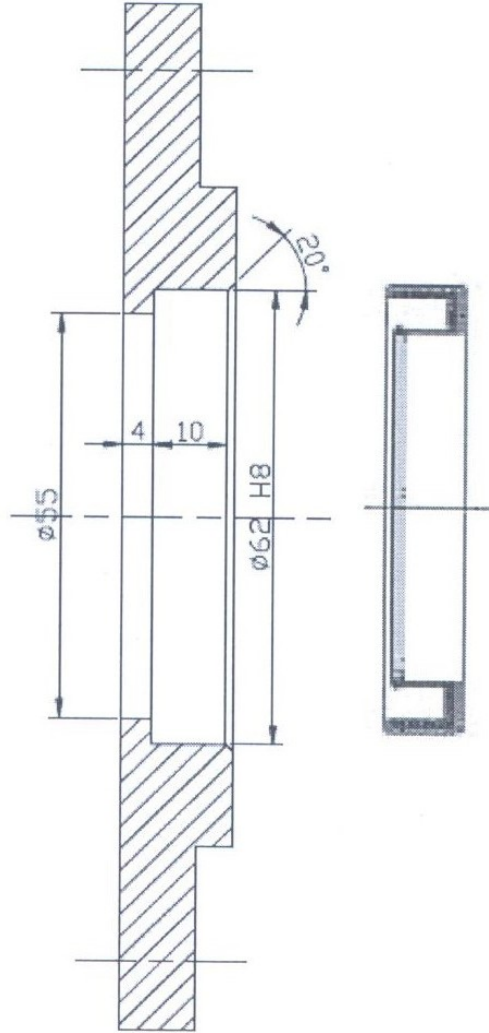
ISO Viskozite Sınıfı	150
Kinematik Viskozite	
40 ⁰ C mm ² /s	150
100 ⁰ C mm ² /s	15
Viskozite İndeksi	100
Parlama noktası COC ⁰ C	195
Akma noktası ⁰ C	-24
Yoğunluk 15 ⁰ C kg/m ³	897

5.2 Mil

Deneyde 40 mm çapındaki taşlanarak hazırlanmış mil ucu kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü standartlarda önerilen 0,2-0,6 μm değerindedir. Montaj sırasında keçelerin zarar görmemesi için mil ucuna 0,6 mm değerinde radyüsler verilmiştir.

5.3 Keçe Yuvası-Kapak

Test edilecek dönel dudaklı keçelerin dış çapı 62 mm'dir. Keçe yuva toleransı H8 ve yüzey przllk değeri $R_a=2,5 \mu\text{m}$ 'dir. Yuva ağzına 20° pah kırılarak keçe montajı için kolaylık sağlanmıştır. Test edilecek keçeler yuvaya faturaya oturuncaya kadar çakılarak monte edilmiştir.



şekil 5.4 : Keçe yuvasının kesit görünüşü.

5.4 Deney Şartları ve Deney Numuneleri

Deneyler 18⁰-20⁰ sıcaklığında %40-50 izafî nem bulunan laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir.

TPU, H-TPU ve S-TPU malzemelerinden toz dudaksız keçeler SKF firmasından temin edilmişlerdir. Keçelerin iç çapı 40, 39,80 ve 39,60 olarak seçilmiştir. 0,5 ve 0,3 bar basınç altında çalıştırılan keçelerde çapsal yükün sürtünme momentleri üzerindeki etkileri değişik hızlar için araştırılmıştır. Çizelge 5.2'deki görüldüğü şekilde bir deney matrisi oluşturulmuş ve değişik çapraz karşılaştırmalar yapılmıştır. Daha sonra ise keçeler 10.000 metreye kadar test edilmiş kaçak meydana gelip gelmediği gözlemlenmiş ve moment ölçümü yapılmıştır.

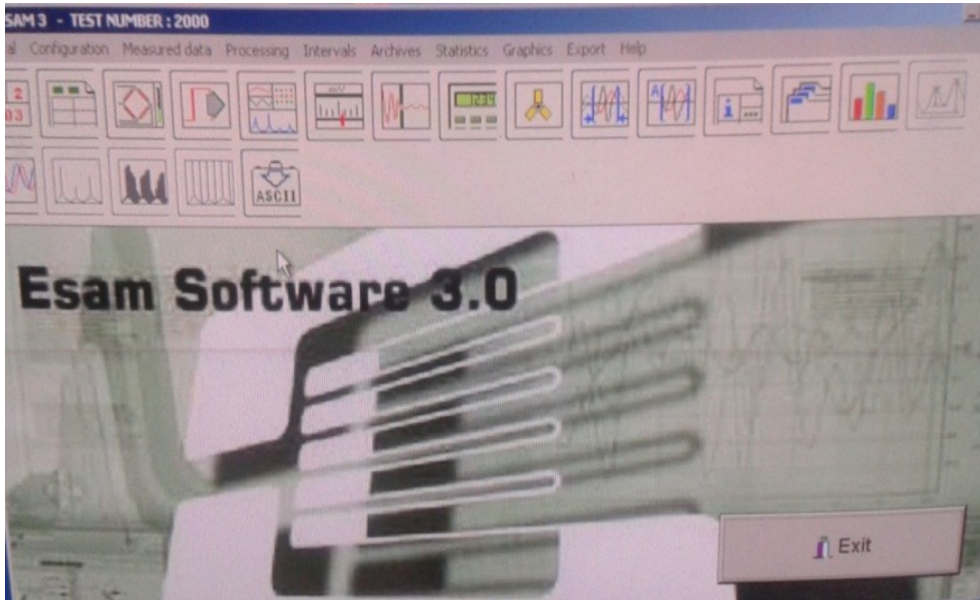
Deneyler süresince 27 adet radyal dudaklı yaylı keçe denenmiştir. Keçe montajları tamamlanmadan önce bir komparatör yardımıyla $\pm 0,05$ mm hassasiyette diskin eksenel yöndeki kaçıklıkları giderilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 5.2 : Deney matrisi.

			Malzeme		
Dudak iç çapı (mm)	Hız (m/s)	Basınç (bar)	TPU	H-TPU	S-TPU
Ø40	1	0,5			
		0,3			
	3	0,5			
		0,3			
	5	0,5			
		0,3			
Ø39,80	1	0,5			
		0,3			
	3	0,5			
		0,3			
	5	0,5			
		0,3			
Ø39,60	1	0,5			
		0,3			
	3	0,5			
		0,3			
	5	0,5			
		0,3			

5.5 Deneyin Yapılışı

Dönel dudaklı keçelerin deney düzeneğindeki silindir kapağına montajı yapılmadan önce dış çapları hafifçe yağlanmıştır. Dış çapları yağlanan dönel dudaklı keçeler daha sonra yuvaya çakılmak suretiyle silindir kapağına monte edilmişlerdir. Kapak silindir bloğa cıvatalar aracılığıyla tutturulmuştur. Bu sayede keçeler kolayca monte edilip sökülebilmektedir. Keçe montajı tamamlandıktan sonra mil ucu ve keçe dudağı hafifçe yağlanır. Bu işlemin yapılmaması durumunda dönel dudaklı keçeler çalışmanın ilk anında yüksek bir aşınmaya maruz kalabilirler. Mil ucu kayar tabla aracılığıyla silindir blok içerisine itilir ve mil keçe içerisine itildikten sonra silindir yağ ile doldurulmuştur. Yağ seviyesi literatürde önerildiği gibi milin %25'i yağ içerisinde kalacak ayarlanmıştır. Basınç ayarlandıktan sonra, hız kontrol ünitesi aracılığıyla hız istenilen değerlere ayarlanır. Keçenin çalışması esnasında oluşan sürtünme kuvveti yük hücreleri aracılığı ile ölçülür. Ölçülen sürtünme kuvveti değerleri ESAM veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılır. Son olarak elde edilen sürtünme kuvveti değerlerinden sürtünme momentine geçilmiştir. Deneyler süresince yağ sıcaklığı değiştirilmemiştir.



Şekil 5.5 : Veri toplama.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanları 1, 3 ve 5 m/s hızları için test edilmiştir.

Çizelge A.1’de 40, 39,80 ve 39,60 mm iç çapları ve 0,5 ile 0,3 bar için TPU keçenin sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.1’de 0,5 bar için üç farklı iç çaptaki TPU keçelerin sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere en düşük moment değerleri referanslarda önerilen 40 mm iç çap değerinde gözlemlenmiştir. Sıklılığın artmasıyla moment değerlerinde bir artış söz konusudur. 1 m/s hızda 40 ve 39,80 mm iç çaplı keçelerin moment değerleri arasında fark hızın artmasıyla belirginleşmiştir. En büyük moment değerlerine ise 39,60 mm iç çapında ulaşılmıştır. Şekil A.2’de ise TPU keçenin 0,3 bar altında test edilmesi sonucunda elde edilen sürtünme momentleri görülmektedir. Basıncın düşmesiyle moment değerlerinde de bir miktar düşüş gözlenmiştir. En yüksek moment değerleri tıpkı Şekil A.1’deki gibi 39,60 mm iç çaplı keçede elde edilirken en düşük moment değerleriyse 40 mm iç çaplı keçe için elde edilmiştir.

Çizelge A.2’de 40, 39,80 ve 39,60 mm iç çapları ve 0,5 ile 0,3 bar için H-TPU keçenin sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.3’de 0,5 bar için üç farklı iç çaptaki H-TPU keçelerin sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere en düşük moment değerleri 40 mm iç çap değerinde gözlenmiştir. Sıklılığın artmasıyla moment değerleri de artmıştır. 40 mm iç çaplı keçeden elde edilen moment değerleri ile 39,80 mm iç çaplı keçeden elde edilen moment değerleri arasındaki farkın özellikle 1 m/s hızı için çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere en büyük moment değerlerine 39,60 mm iç çapında ulaşılmıştır. Şekil A.4’de ise H-TPU keçenin 0,3 bar altında test edilmesi sonucunda elde edilen sürtünme momentleri görülmektedir. Basıncın düşmesiyle moment değerlerinde de bir miktar düşüş gözlenmiştir. En yüksek moment değerleri tıpkı Şekil A.3’deki gibi 39,60 mm iç çaplı keçede elde edilirken en düşük moment değerleriyse 40 mm iç çaplı keçe için elde edilmiştir.

Çizelge A.3’de 40, 39,80 ve 39,60 mm iç çapları ve 0,5 ile 0,3 bar için S-TPU keçenin sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.5’te 0,5 bar için üç

farklı iç çaptaki S-TPU keçelerin sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere 1m/s hızında üç çaptaki moment değerleri birbirine oldukça yakındır. Diğer grafiklerin aksine 39,80 mm iç çaplı keçeden elde edilen sürtünme momenti değerleriyle 39,60 mm iç çaplı keçeden elde edilen sürtünme momenti değerleri arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmekte ve 3m/s hız için en yüksek moment değerine 39,80 mm iç çaplı keçede ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Şekil A.6'da ise S-TPU keçenin 0,3 bar altında test edilmesi sonucunda elde edilen sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Basıncın düşmesiyle moment değerlerinde de genel olarak bir miktar düşüş gözlenmiştir. Her üç iç çap için de elde edilen değerler her üç hızda da birbirine oldukça yakındır.

TPU, H-TPU ve S-TPU keçeler her bir iç çap için birbirleriyle de kıyaslanmıştır.

Şekil A.7'de 0,5 bar için 40 mm iç çapındaki TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. 1 m/s hız için literatüre uygun olarak beklenildiği gibi TPU ve H-TPU keçelerin sürtünme momenti değerleri, S-TPU keçeden elde edilen sürtünme momenti değerlerinden daha büyüktür. Ancak hızın artmasıyla beraber yapılarındaki katkı maddelerinden dolayı H-TPU ve S-TPU keçelerden, TPU keçeye göre daha yüksek moment değerleri elde edilmiştir. Şekil A.8'de ise keçelerin 0,3 bar için sürtünme momenti karşılaştırmaları yapılmış ve her üç malzemeden elde edilen değerler arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.

Şekil A.9'da 0,5 bar için 39,80 mm iç çapındaki TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere her üç malzemeden keçelerin sürtünme momenti değerleri birbirine oldukça yakındır yakındır ancak TPU keçeden elde edilen sürtünme momenti değreleri H-TPU ve S-TPU keçeden elde edilen momentlere göre biraz daha büyüktür. Bu fark hızın artmasıyla beraber daha belirgin bir hale gelmiştir. Şekil 10'da ise ise keçelerin 0,3 bar için sürtünme momenti karşılaştırmaları yapılmış ve 0,5 bar için yapılan karşılaştırmayla benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil A11'de 0,5 bar için 39,60 mm iç çapındaki TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikte TPU ve H-TPU keçelerin sürtünme momenti değerlerinin 1 ve 5 m/s hızları için birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. En küçük moment değerleri ise S-TPU keçede gözlenmiştir. Şekil A.12'da ise ise keçelerin 0,3 bar için sürtünme momenti karşılaştırmaları yapılmıştır.

Grafikte görüldüğü üzere TPU keçeden elde edilen sürtünme momentleri H-TPU keçeden elde edilenlere göre çok fazla olmamakla beraber bir miktar daha büyüktür. En küçük moment değerleri ise tıpkı Şekil A.11'de olduğu gibi S-TPU keçede gözlenmiştir.

Keçeler 10.000 m'ye kadar da çalıştırılmış ve kaçak ile moment değerlerindeki değişim gözlemlenmiştir.

TPU keçenin 10000 m'ye kadar üç farklı çap için 1m/s hızda çalıştırılmasıyla elde edilen moment değerleri Şekil A.13'te görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere sıklığın sonuçlarda önemli bir etkisi olmamıştır. Şekil A.14'te ise 3 m/s için sonuçlar görülmektedir. Buna göre 39,60 mm çap için moment değerleri oldukça yüksekken, 39,80 ve 40 mm için büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil A.15'te 5m/s için ise moment değerleri 39,80 mm çap için en yüksek, 39,60 mm çap için en düşük değerlerdedir.

H-TPU keçenin 10000 m'ye kadar üç farklı çap için 1m/s hızda çalıştırılmasıyla elde edilen moment değerleri Şekil A.16'da görülmektedir. Buna göre 39,60 mm için moment değerleri oldukça yüksekken, 39,80 ve 40 mm için büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil A.17'de ise 3 m/s için sonuçlar görülmektedir. Buna göre 39,80 mm için en yüksek moment değerleri elde edilirken, 40 ve 39,60 mm için büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil A.18'de 5m/s için ise her üç çaptaki keçeler için sonuçlar arasında önemli bir fark görülmemektedir.

S-TPU keçenin 10000 m'ye kadar üç farklı çap için 1m/s hızda çalıştırılmasıyla elde edilen moment değerleri Şekil A.19'da görülmektedir. Buna göre 39,60 mm, 39,80 ve 40 mm çap için moment değerleri arasında büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil A.20'de ise 3 m/s için sonuçlar görülmektedir. Buna göre her üç çap için yine moment değerleri oldukça yakındır. Şekil A.21'de 5m/s için ise 3000 m'ye kadar her üç çaptaki keçeler için sonuçlar arasında önemli bir fark görülmezken alınan yolun artmasıyla 39,80 mm çaptaki keçeden elde edilen değerlerin belirgin şekilde arttığı görülmektedir.

10000 m'ye kadar test edilen keçelerden elde edilen veriler malzeme bazında da kıyaslanmıştır. Şekil A.22'de 1 m/s için 40 mm çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerden elde edilen moment değişimi grafiği görülmektedir. TPU ve S-TPU keçelerden elde edilen moment değerleri oldukça yakınken H-TPU keçeden elde

edilen değerlerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil A.23'te 1m/s ve 39,80 mm çap için her üç malzemeden keçelerin moment değerleri arasında belirgin bir fark yoktur. Şekil A.24'de ise 1m/s ve 39,60 mm çap için her üç malzemeden elde edilen sonuçların yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil A.25'de 3 m/s için 40 mm çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerden elde edilen moment değişimi grafiği görülmektedir. H-TPU keçeden en düşük moment değerleri elde edilmiştir. En yüksek moment değerleri ise yapısındaki katkı maddelerinden dolayı S-TPU keçeden elde edilmiştir. Şekil A.26'te 3m/s ve 39,80 mm çap için her TPU keçeden en düşük moment değerleri elde edilmiştir ve yine katkı maddelerinin eklenmiş olduğu H-TPU ve S-TPU keçelerden daha yüksek momentler elde edilmiştir. Şekil A.27'de ise 3m/s ve 39,60 mm çap için S-TPU ve H-TPU keçelerden literatüre uygun olarak daha düşük moment değerleri elde edilmiştir.

Şekil A.28'de 5 m/s için 40 mm çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerden elde edilen moment değişimi grafiği görülmektedir. Her üç malzeme için de elde edilen değerlerin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil A.29'te 5m/s ve 39,80 mm çap için her TPU keçeden en yüksek, H-TPU keçeden ise en düşük moment değerleri elde edilmiştir. Şekil A.30'de ise 5m/s ve 39,60 mm çap için he üç malzeme için elde edilen moment değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Yapılan deneylere göre keçe iç çapının artmasıyla sürtünme momenti değerlerinde genel olarak artış gözlemlendiği söylenebilir. Düşük hızlarda sıklığın değiştirilmesi moment üzerinde belirgin bir fark yaratmamıştır. Yüksek hızlarda ise 40 ve 39,60 mm iç çaplı keçeler için elde edilen moment değerleri arasında oldukça az bir fark varken 39,80 mm iç çaplı keçeler için daha büyük moment değerleri elde edilmiştir. S-TPU keçede sürtünmenin azaltılması amacıyla malzemeye eklenen katkılar moment değerlerine olumsuz yansımış ve S-TPU malzemesinin literatürde belirtildiğinin aksine sürtünme momentinin TPU ve H-TPU malzemelerine göre daha yüksek değerlerde olduğu gözlenmiştir. Deneylerde kaçak gözlenmemiştir ancak artan iç sıklıkla beraber dudak temas bölgesinde belirgin sıcaklık artışları olmuştur. Keçe temas yüzeylerinde makro boyutta belirgin bir aşınma gözlemlenmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Jia, X. H., Guo, F., Huang, L., Wang, L. K., Gao, Z., Wang, Y. M.** (2013). Effects of the radial force on the static contact properties and sealing performance of a radial lip seal, *Science China Tech. Sci*, **57**, 1175-1182.
- [2] **Plath, S., Meyer, S., Wollesen, V.** (2005). Friction torque of a rotary shaft lip type seal-a comparison between test results and finite element simulation, *Mechanika*, **4**, 55-59.
- [3] **Keitzel, H., Meyer, S., Wollesen, V.** (2005). Enhancement of the measurement of the radial force of radial lip seals in accordance with DIN 3761, PART 9 by consideration of the influence of temperature and lubrication medium as basis for the modelling, *Agricultural Engineering Research Papers*, **37**, 146-158.
- [4] **Gabelli, A., Ponson, F., ve Poll, G.** (1992). Computation and measurement of the sealing contact stress and its role in rotary lip seal design, *Fluid Mechanics and its Applications*, **8**, 21-39.
- [5] **Guo, F., Jia, X. H., Salant, R. F.** (2013). A mixed lubrication model of a rotary lip seal using flow factors, *Tribology International*, **57**, 195–201.
- [6] **Akgül, H.** (1986). Sızdırmazlık Elemanları. T.M.M.O.B., Makine Mühendisleri Odası, Yayın No:120, Bursa.
- [7] **ISO 6194/1** (1982). Rotary shaft lip type seals, Nominal dimensions and tolerances, *International Organization for Standardization*, İsviçre.
- [8] **RMA OS-1** (1985). Shaft finishing techniques for radial lip type shaft seals *Rubber Manufacturers Association*, Amerika.
- [10] **Temiz, V. ve Özperk H.** (2009). *Dönel sızdırmazlık elemanlarında sürtünme momentinin deneysel tayini*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı, İstanbul.
- [11] **Müller, H. ve Bernard, S. N.** (1998). *Fluid Sealing Technology*. Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, NY 10016.
- [12] **Horve, L. A.** (1996). *Shaft Seals for Dynamic Applications*. Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, NY 10016.
- [13] **Salant, R. F., ve Shen D.** (2003). Hydrodynamic Effects of Shaft Surface Roughness on Rotary Lip Seal Behaviour, *Sealing Technology*, July 2005, 5-9.
- [14] **Temiz, V. ve Kerküklü, Y.** (2008). *Dönel sızdırmazlık elemanlarının performansına yüzey pürüzlülüğünün etkileri*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

- [15] **Shi, F. ve Salant R. F.** (2001). A mixed Soft Elastohydrodynamic Lubrication Model with Asperity Cavitation and Surface Shear Deformation, *ASME, Journal of Tribology*, **122**, 308-316.
- [16] **Salant, R. F.** (1997). Modelling Rotary Lip Seals, *Wear*, Volume **207**, 92-99.
- [17] **Salant, R. F.** (1999). Theory of Lubrication of Elastomeric Rotary Shaft Seals, *Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Tribology*, Volume **213**, 189-201.
- [18] **Shi, F. ve Salant, R. F.** (2001). Numerical Study of a Rotary Lip Seal with a Quasi-Random Sealing Surface, *Journal of Tribology*, Volume **123**, 517-524.
- [19] **SAE** (1996). Fluid Sealing Handbook, Radial Lip Seals, *SAE HS-1417*, 117.
- [20] **Brink, R. V. ve Czernik, E., Horve, L. A.** (1993). Handbook of Fluid Sealing, *McGraw-Hill*, New York.
- [21] **Url 1** <www.sealjet.co.il>, alındığı tarih: 20.11.2014
- [22] **Url 2** <www.skf.com>, alındığı tarih 16.11.2014

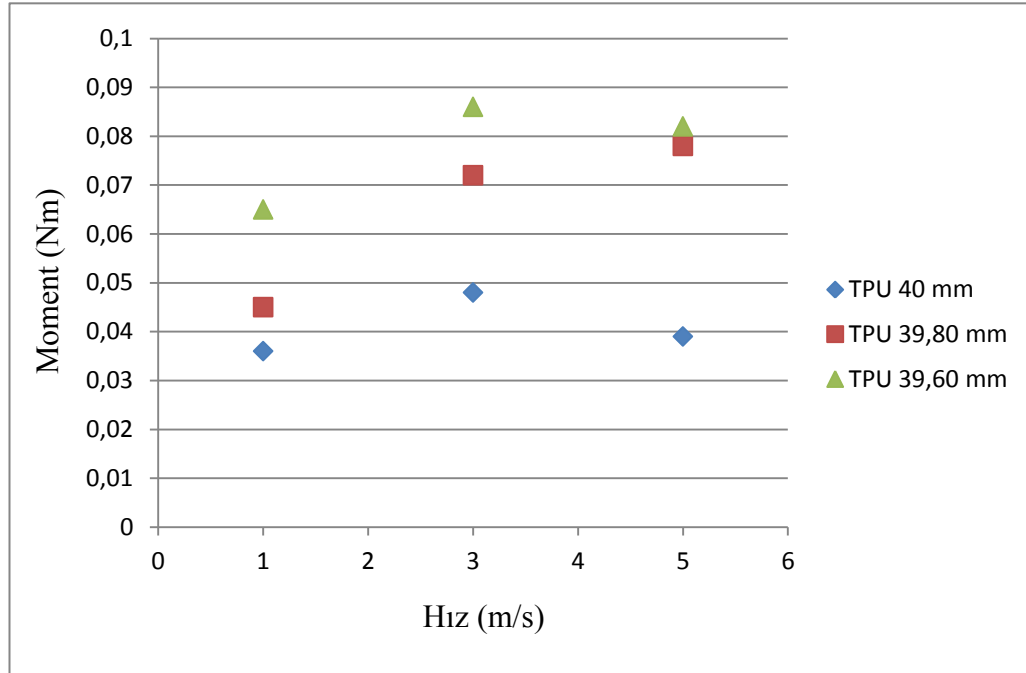
EKLER

EK A: Moment Değerleri

EK A

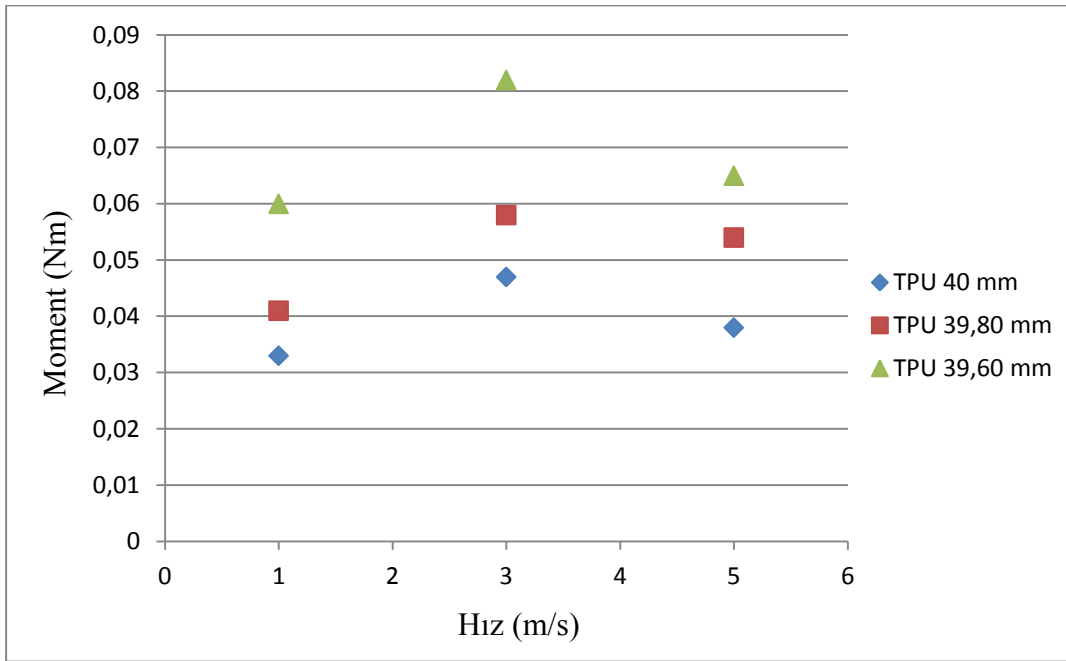
Çizelge A.1. : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki TPU keçeler için 0,5 ve 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.

TPU					
Basınç (bar)	Dudak iç çapı (mm)	Hız (m/s)	Sürtünme momenti (Nm)	Basınç (bar)	Sürtünme momenti (Nm)
0,5	Ø40	1	0,036	0,3	0,033
		3	0,048		0,047
		5	0,039		0,038
	Ø39,80	1	0,062		0,041
		3	0,072		0,058
		5	0,078		0,054
		1	0,065		0,06
		3	0,086		0,082
		5	0,082		0,065



Şekil A.1 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki TPU keçeler için 0,5 bar altında sürtünme momenti değerleri.

EK A

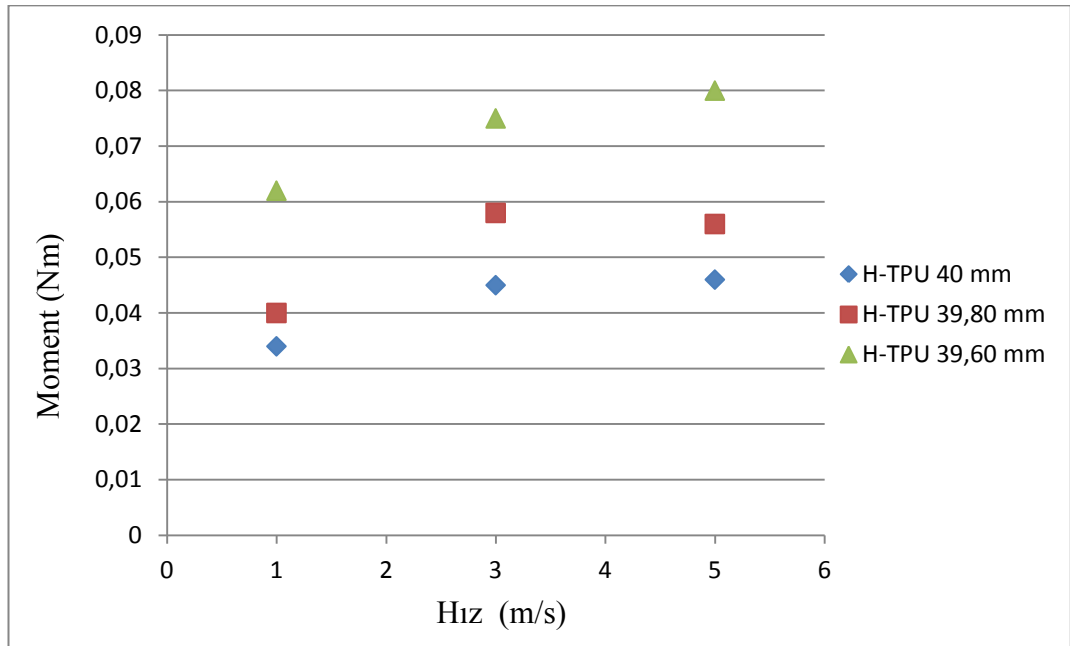


Şekil A.2 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki TPU keçeler için 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.

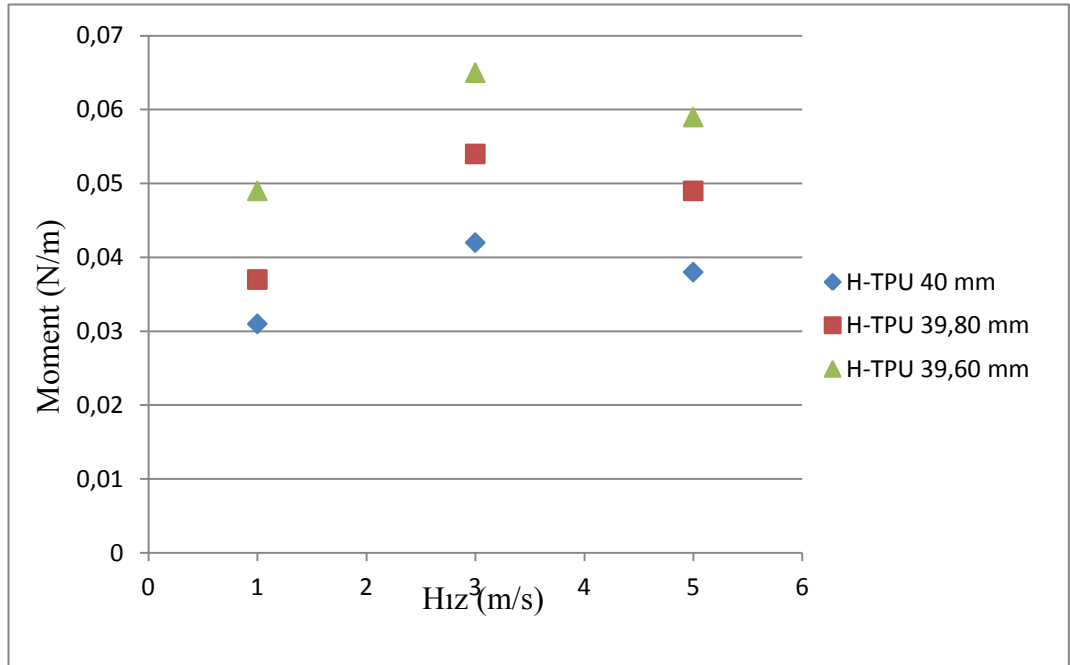
Çizelge A.2. : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki H-TPU keçeler için 0,5 ve 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.

H-TPU					
Basınç (bar)	Dudak iç çapı (mm)	Hız (m/s)	Sürtünme momenti (Nm)	Basınç (bar)	Sürtünme momenti (Nm)
0,5	Ø40	1	0,034	0,3	0,031
		3	0,045		0,042
		5	0,046		0,038
	Ø39,80	1	0,04		0,037
		3	0,058		0,054
		5	0,056		0,049
	Ø39,60	1	0,062		0,049
		3	0,075		0,065
		5	0,08		0,059

EK A



Şekil A.3 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki H-TPU keçeler için 0,5 bar altında sürtünme momenti değerleri.

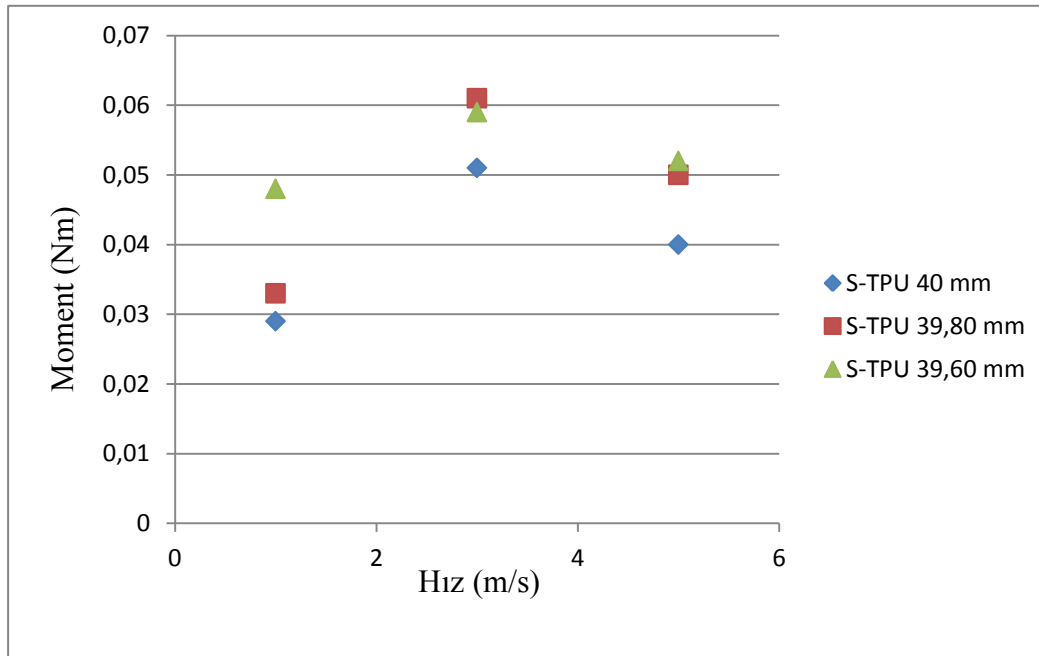


Şekil A.4 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki H-TPU keçeler için 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.

EK A

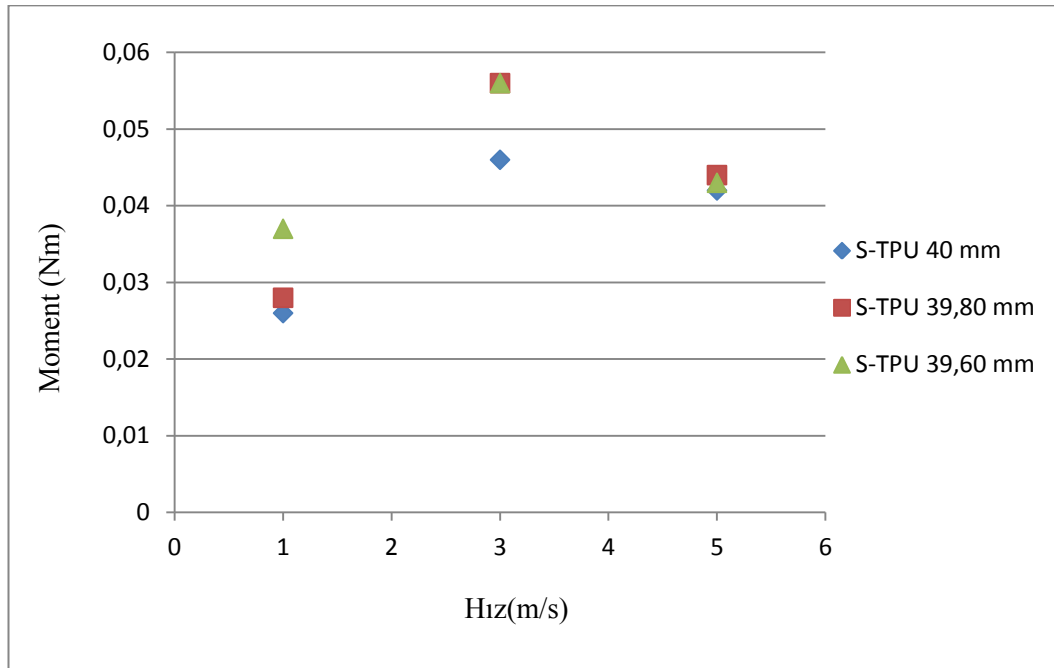
Çizelge A.3 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki S-TPU keçeler için 0,5 ve 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.

S-TPU					
Basınç (bar)	Dudak iç çapı (mm)	Hız (m/s)	Sürtünme momenti (Nm)	Basınç (bar)	Sürtünme momenti (Nm)
0,5	Ø40	1	0,029	0,3	0,026
		3	0,051		0,046
		5	0,04		0,042
	Ø39,80	1	0,033		0,028
		3	0,061		0,056
		5	0,05		0,044
	Ø39,60	1	0,048		0,037
		3	0,059		0,056
		5	0,052		0,043

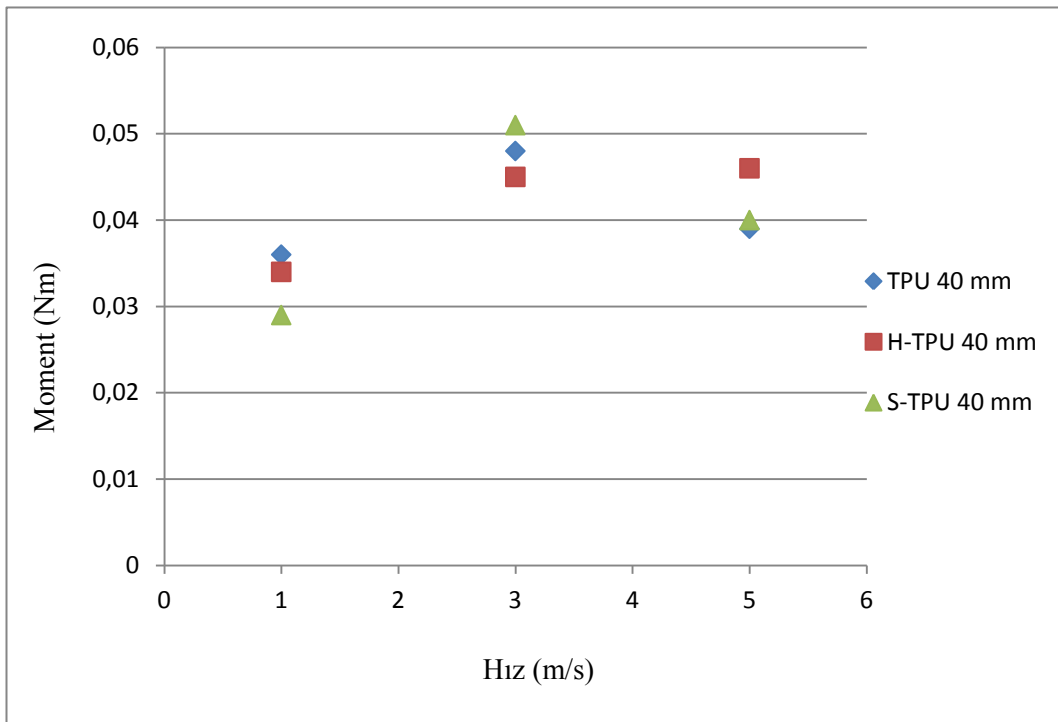


Şekil A.5 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki S-TPU keçeler için 0,5 bar altında sürtünme momenti değerleri.

EK A

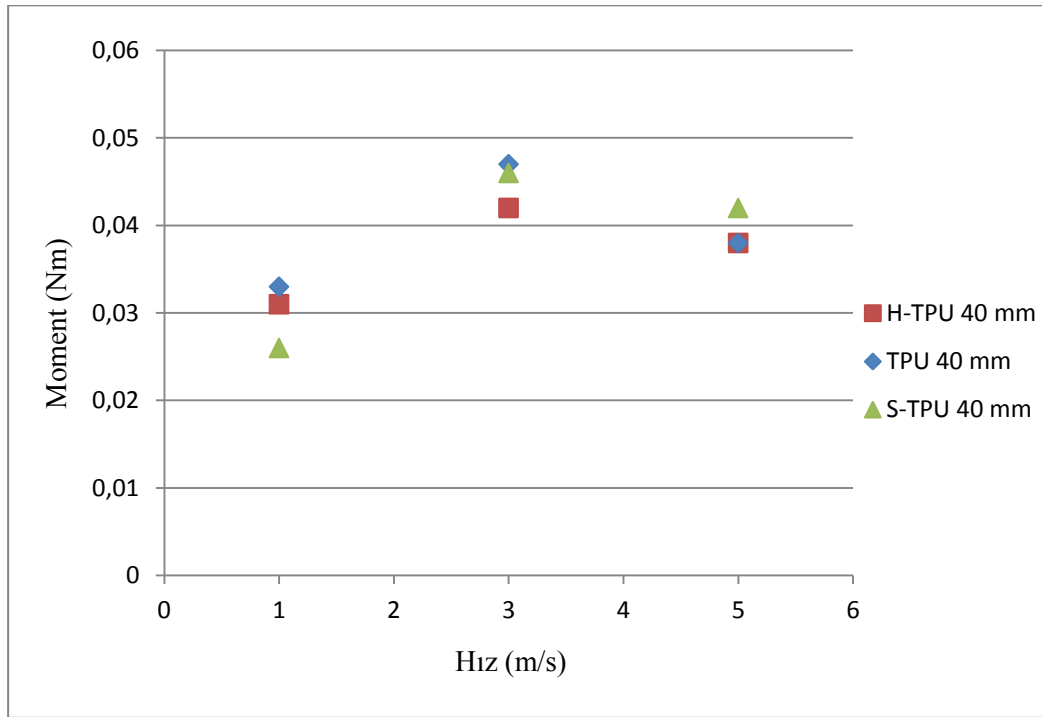


Şekil A.6 : 40 mm, 39,80 mm ve 39,60 mm iç çaplarındaki S-TPU keçeler için 0,3 bar altında sürtünme momenti değerleri.

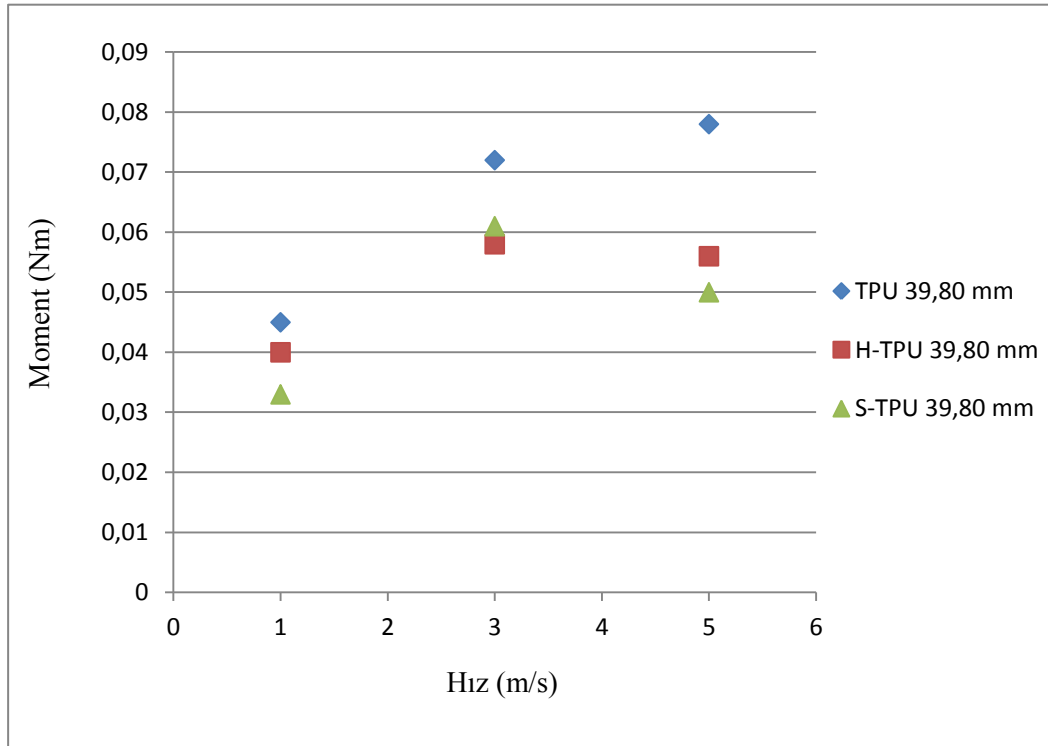


Şekil A.7 : 0,5 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.

EK A

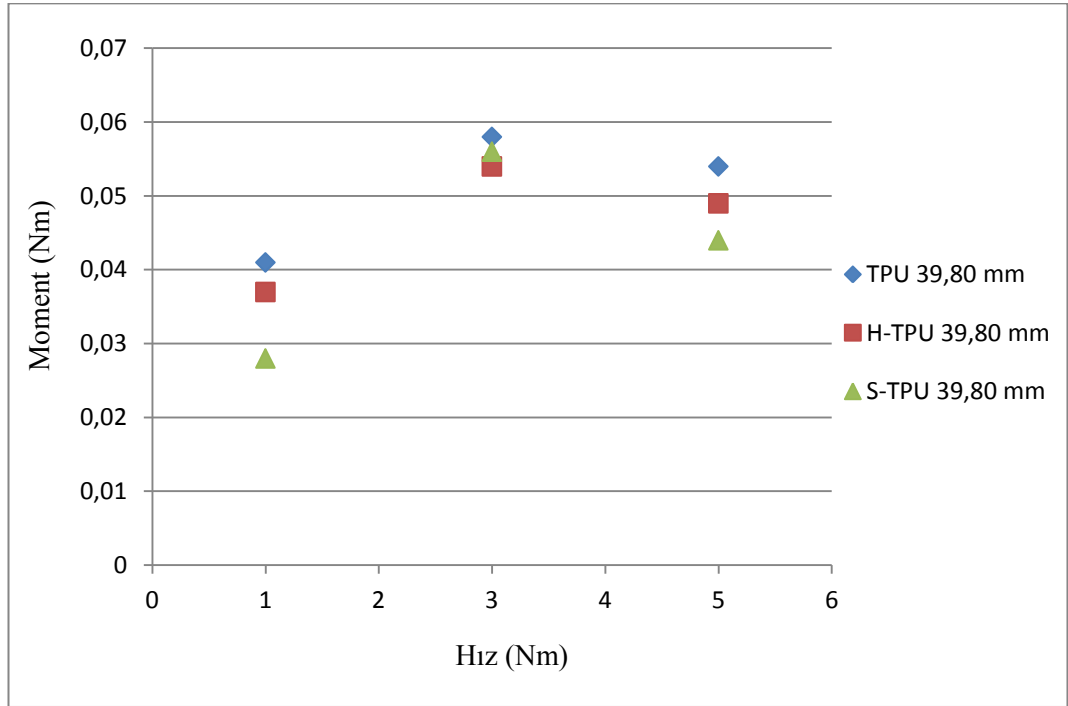


Şekil A.8 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.

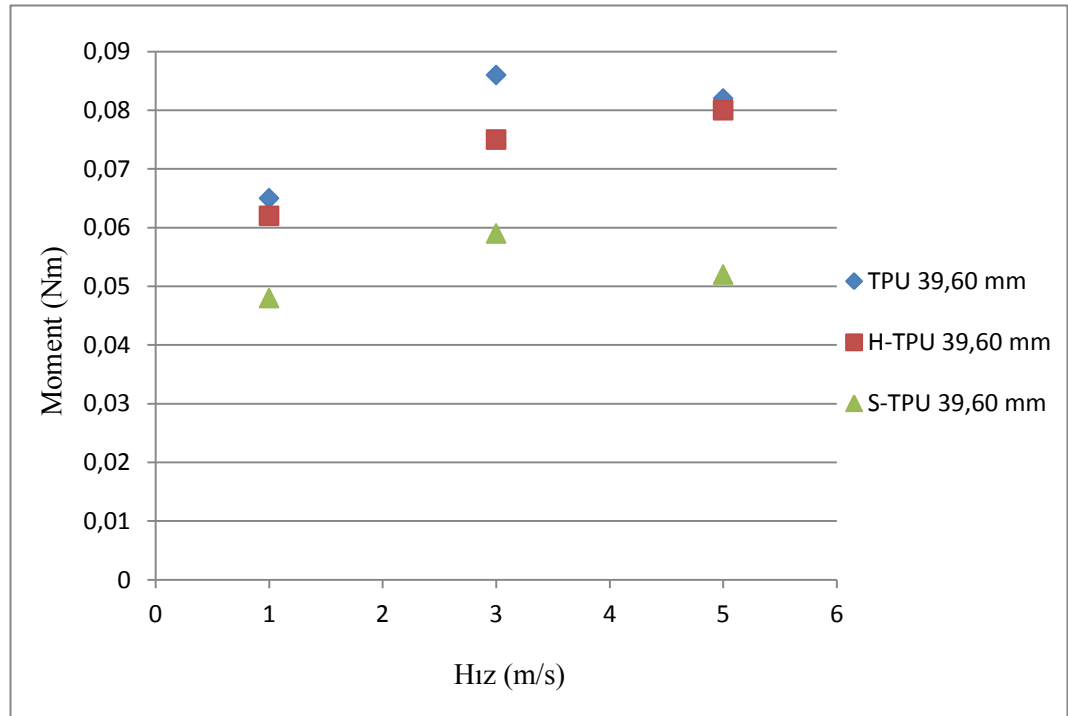


Şekil A.9 : 0,5 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.

EK A

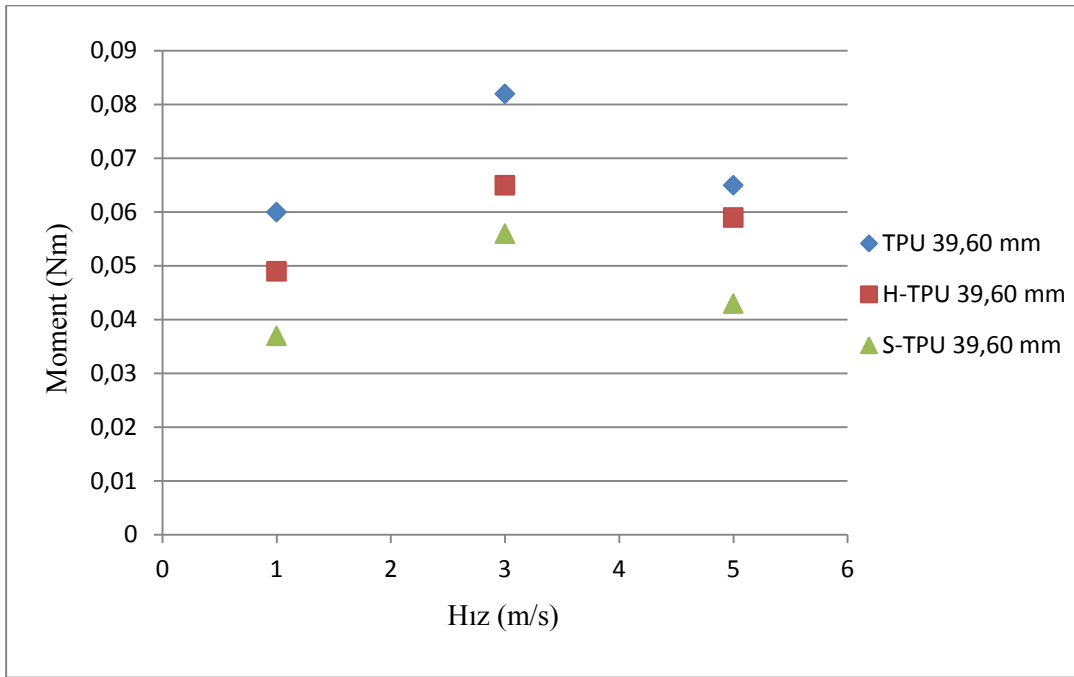


Şekil A.10 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.

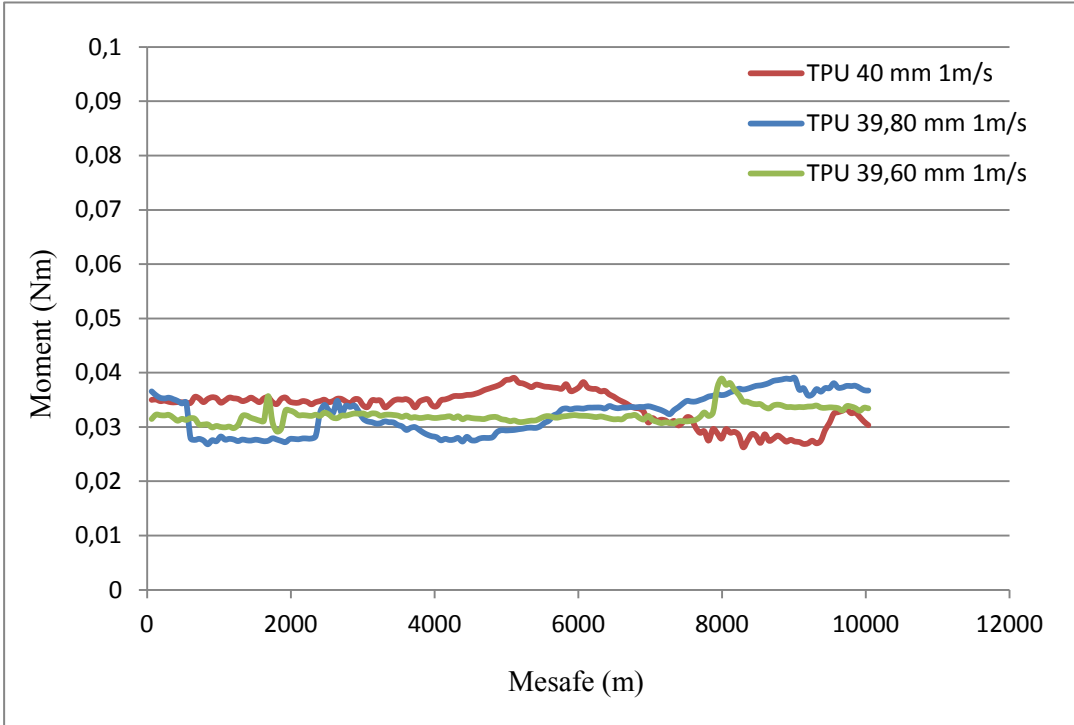


Şekil A.11 : 0,5 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.

EK A

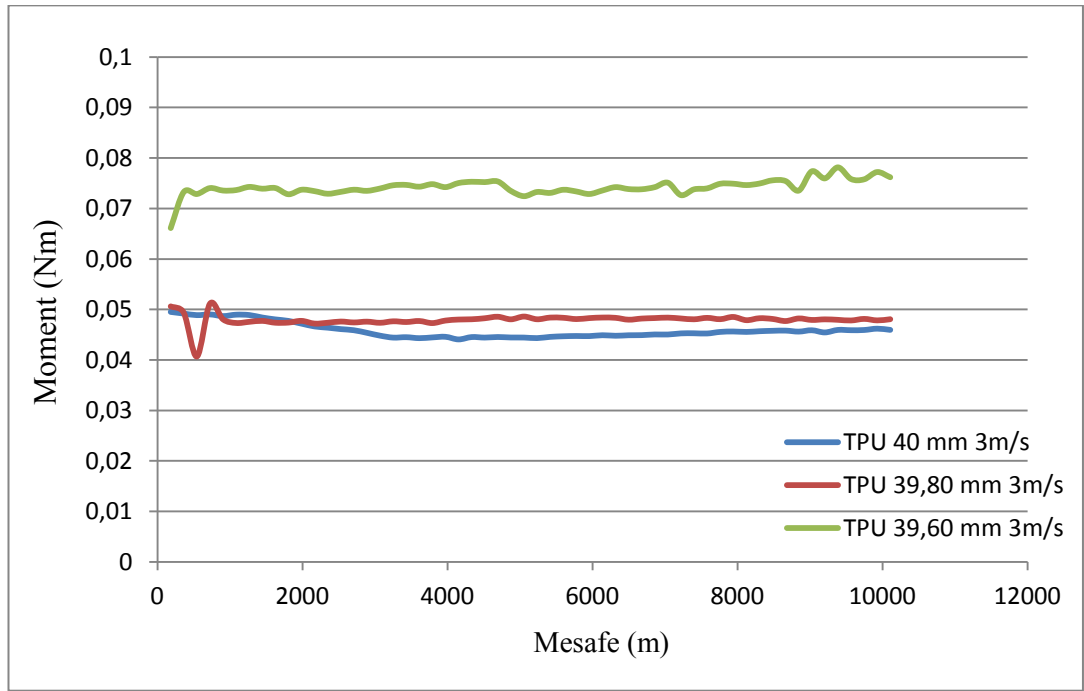


Şekil A.12 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerinin sürtünme momenti değerleri.

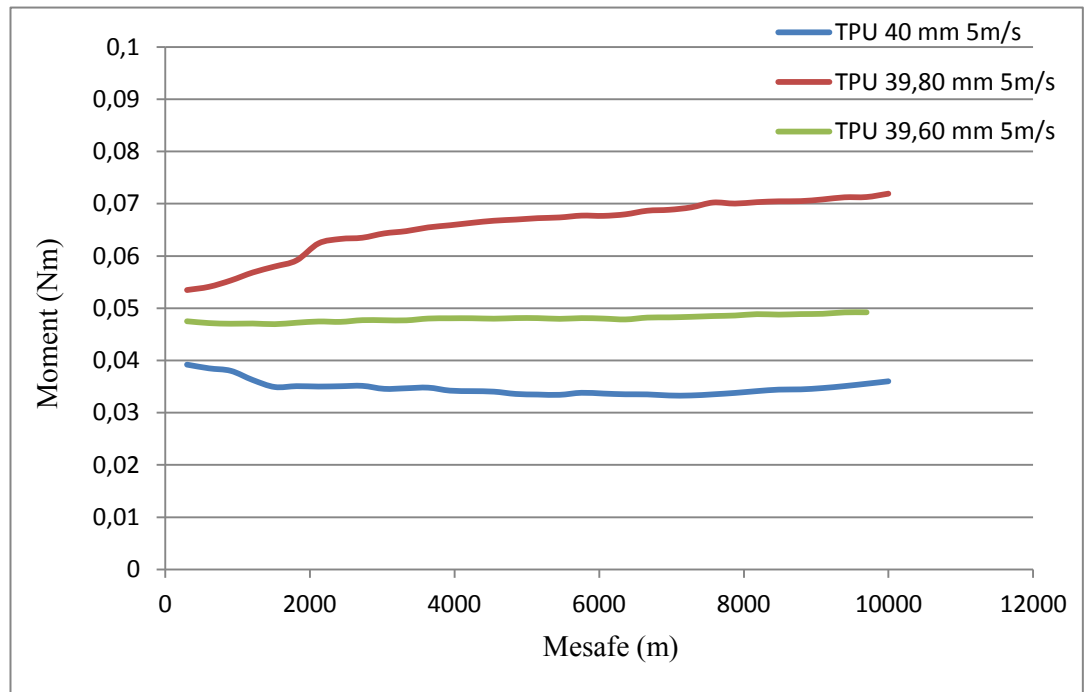


Şekil A.13 : 0,3 bar altında TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

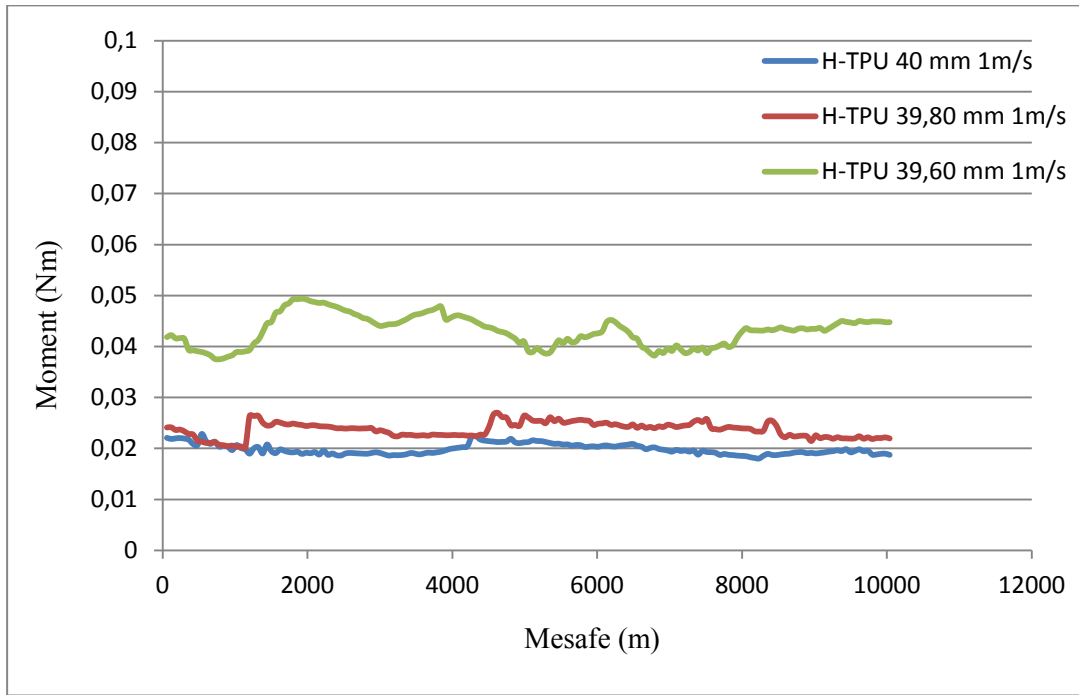


Şekil A.14 : 0,3 bar altında TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

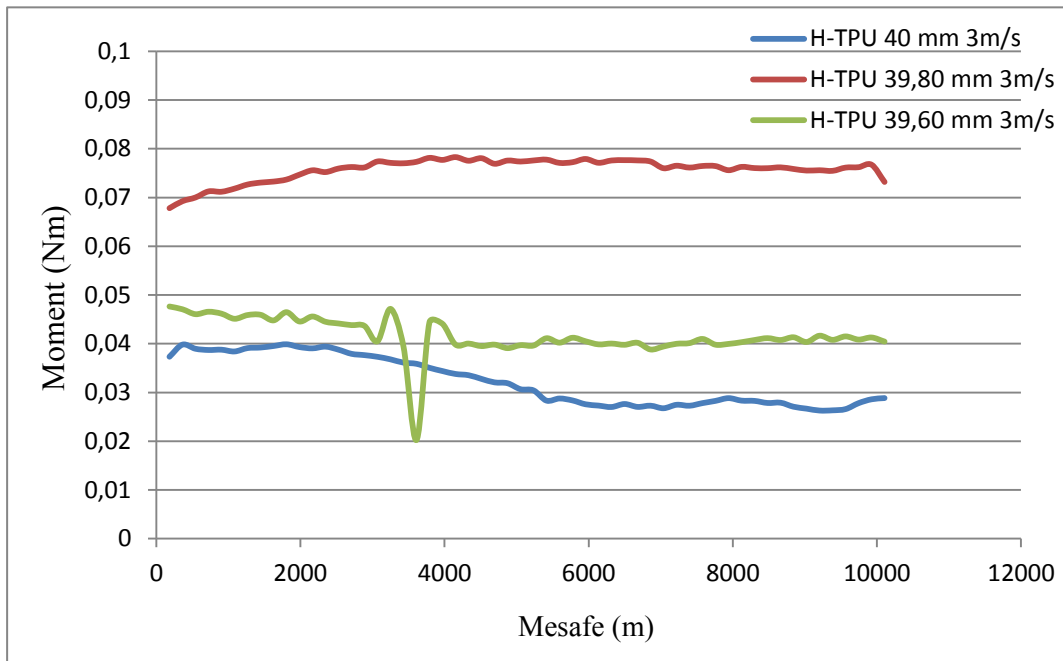


Şekil A.15 : 0,3 bar altında TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

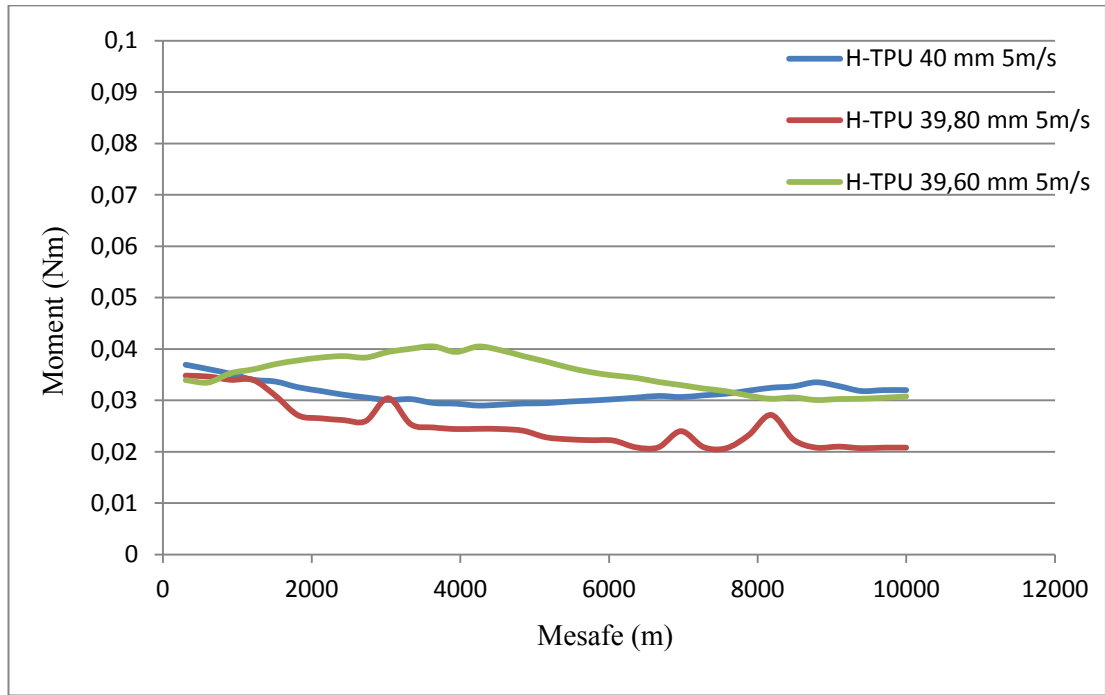


Şekil A.16 : 0,3 bar altında H-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti de eriinin değişimi.

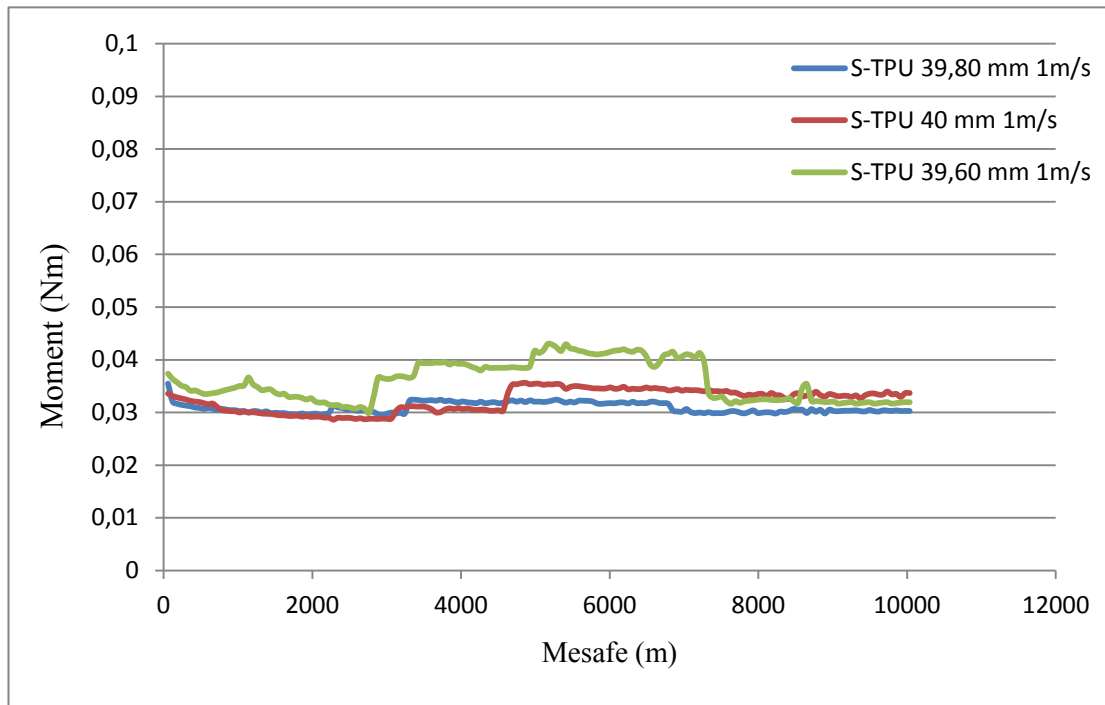


Şekil A.17 : 0,3 bar altında H-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti de eriinin değişimi.

EK A

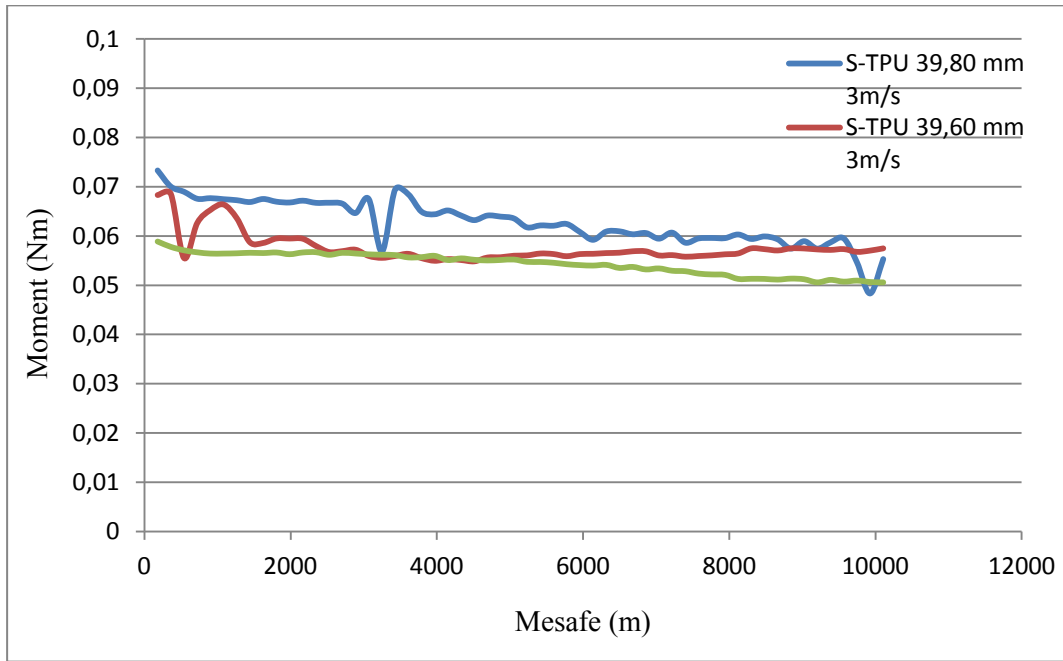


Şekil A.18 : 0,3 bar altında H-TPU ke erlerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

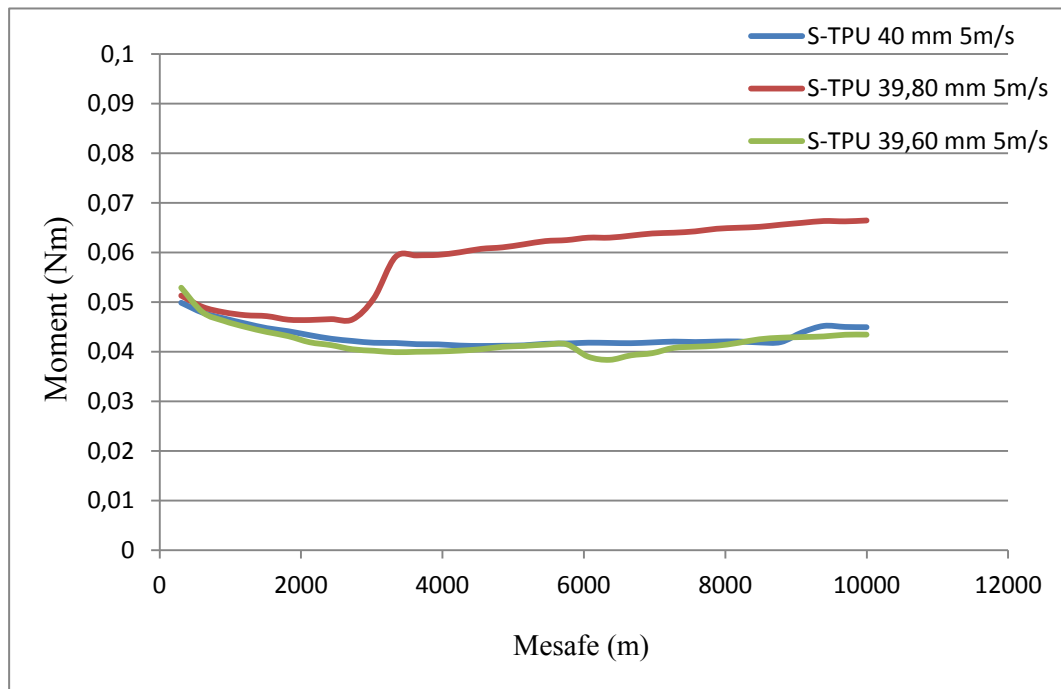


Şekil A.19 : 0,3 bar altında S-TPU ke erlerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

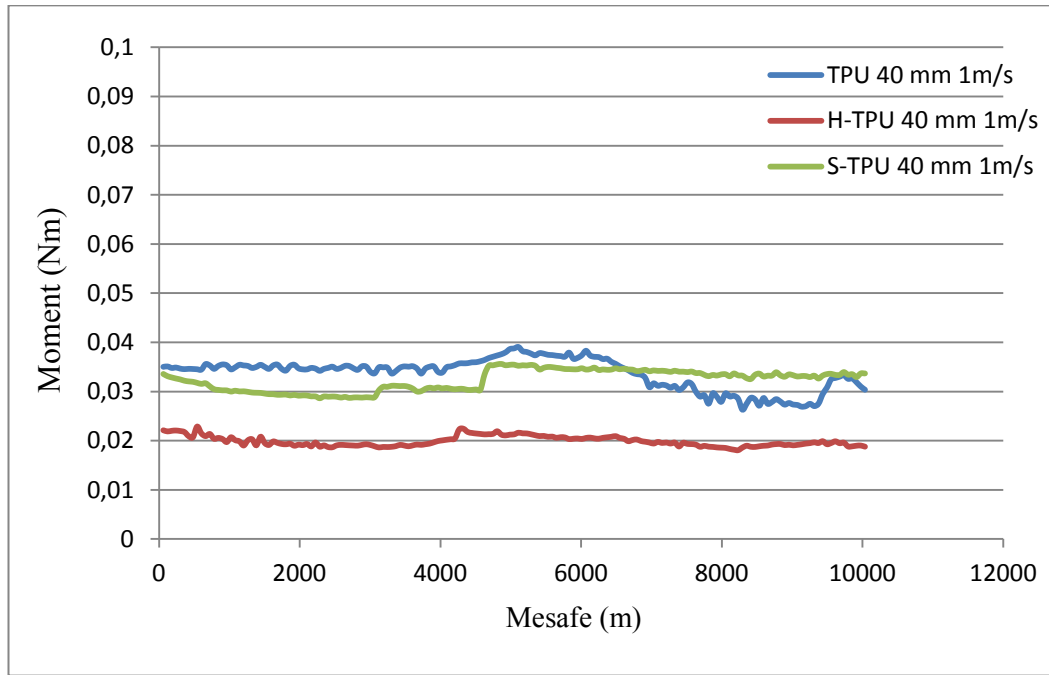


Şekil A.20 : 0,3 bar altında S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

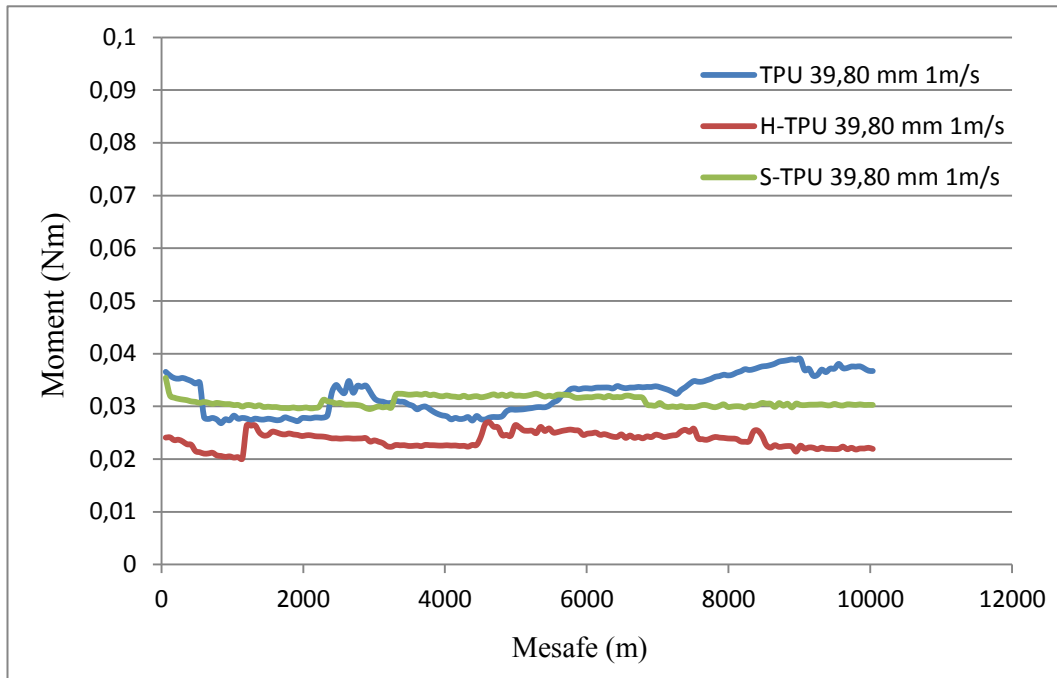


Şekil A.21 : 0,3 bar altında S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

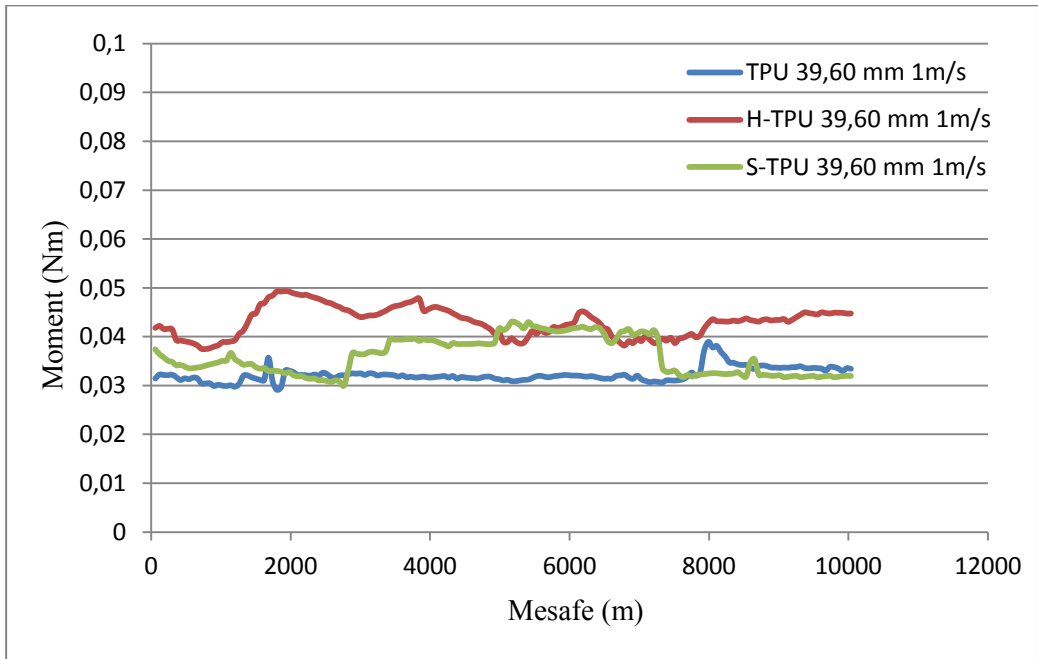


Şekil A.22 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

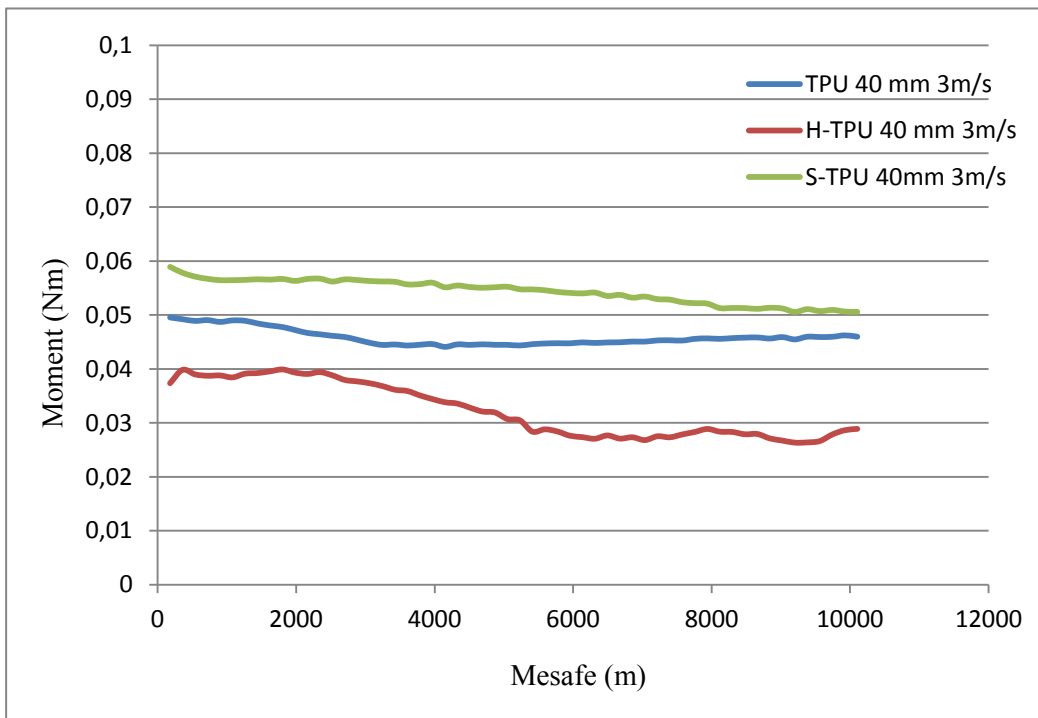


Şekil A.23 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

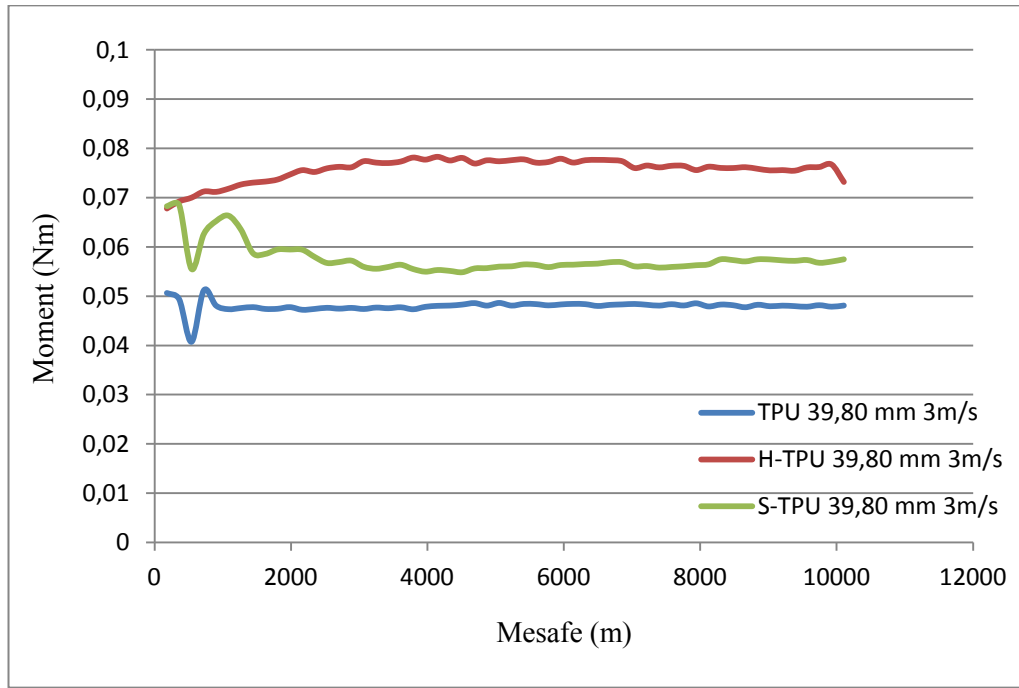


Şekil A.24 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 1m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

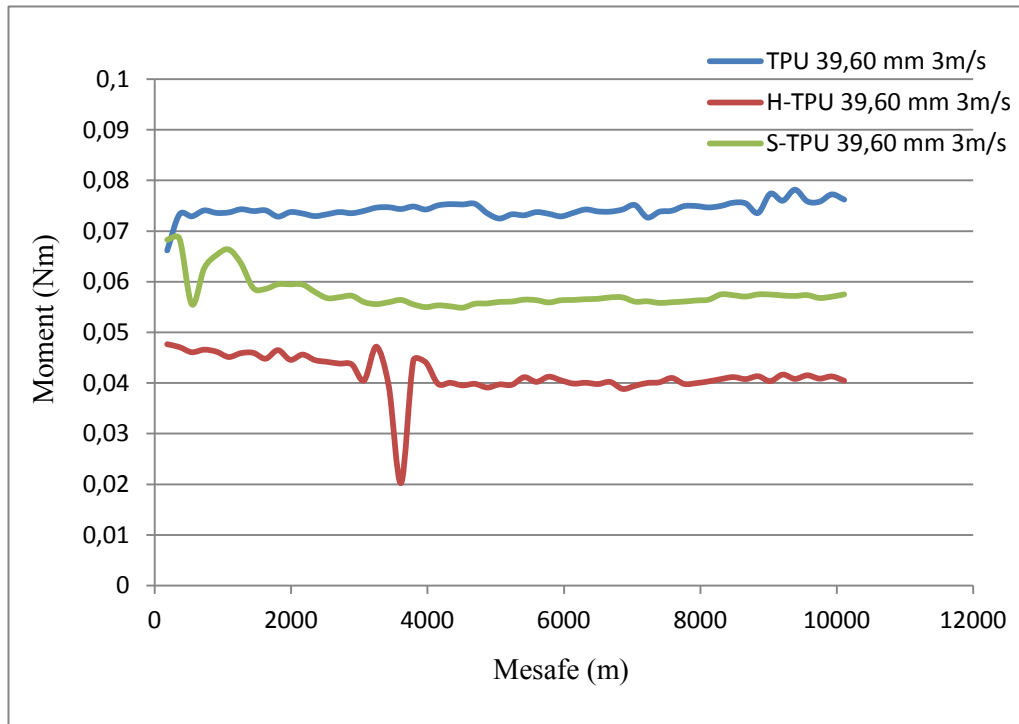


Şekil A.25 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

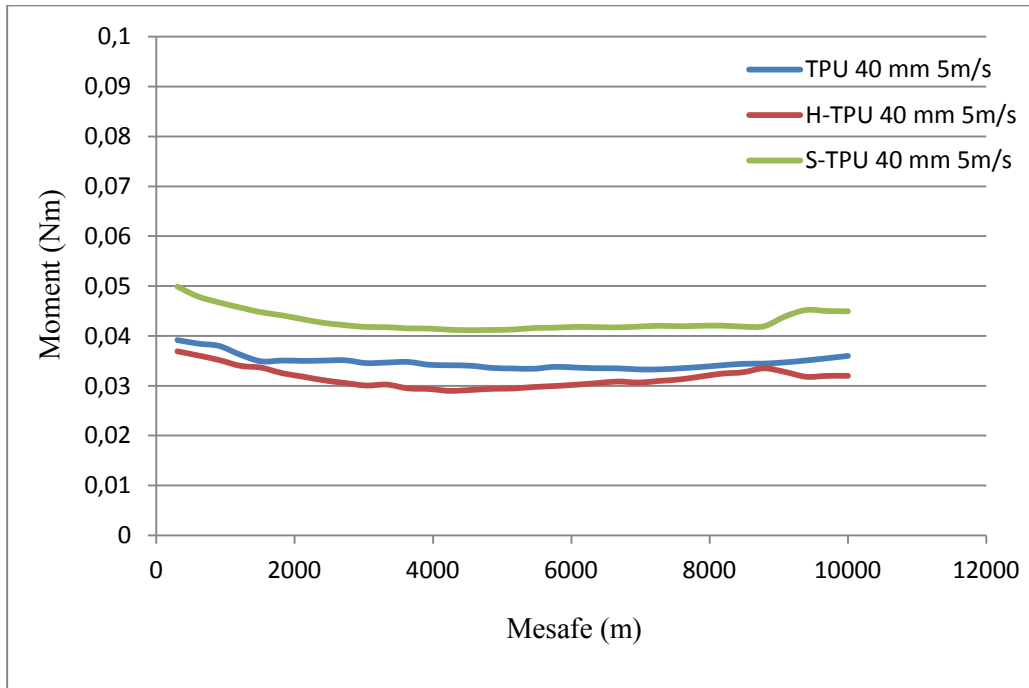


Şekil A.26 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

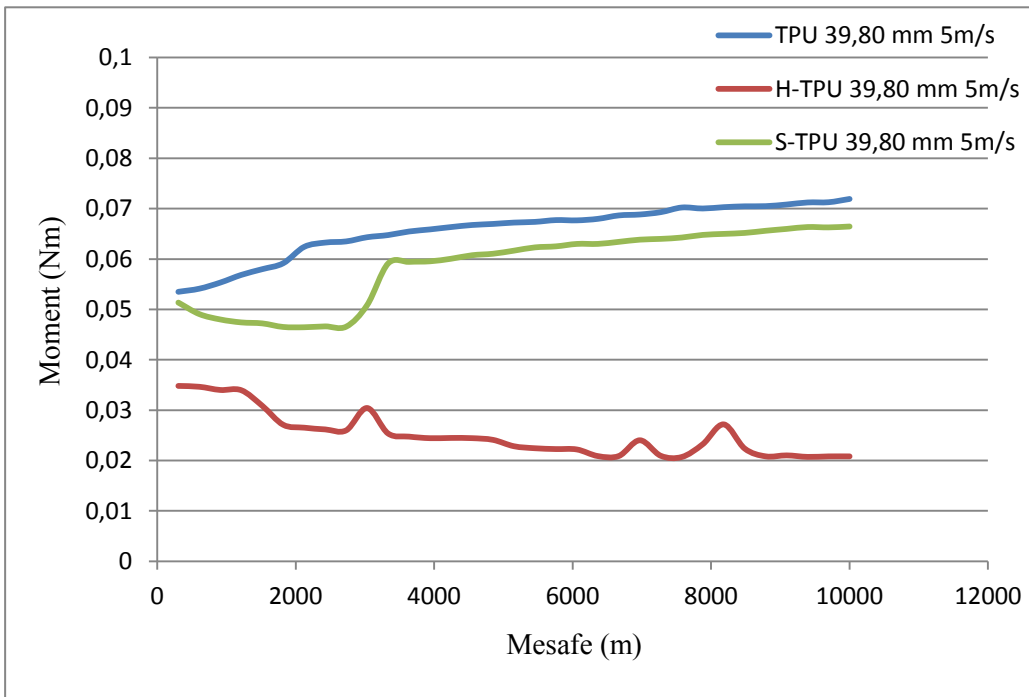


Şekil A.27 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 3m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A

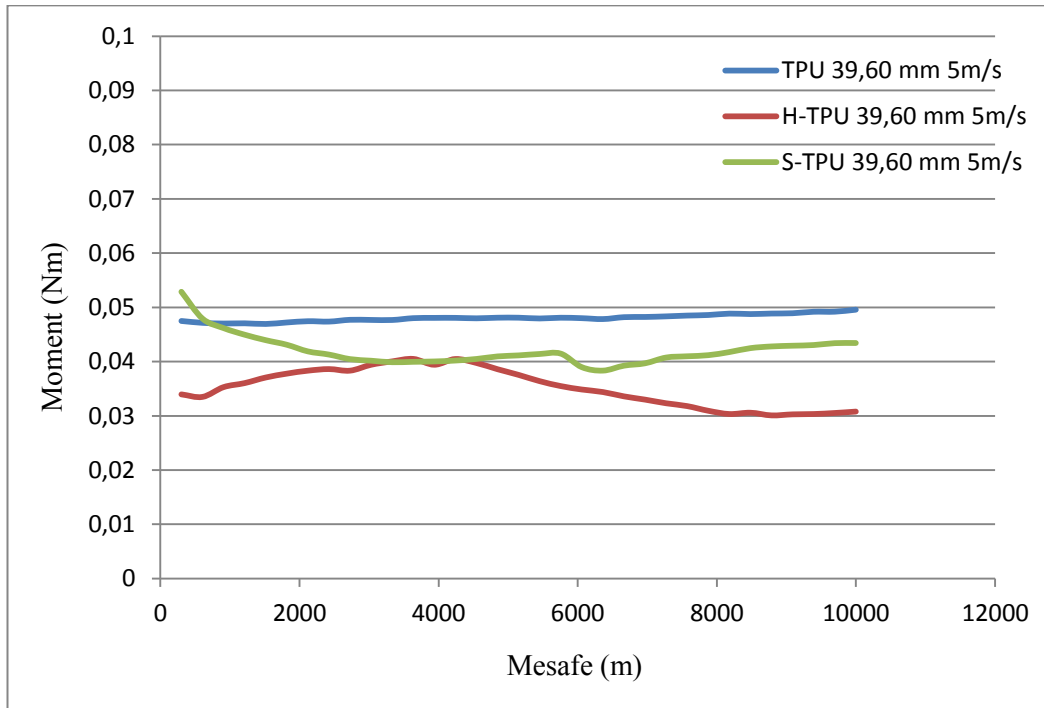


Şekil A.28 : 0,3 bar altında 40 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.



Şekil A.29 : 0,3 bar altında 39,80 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

EK A



Şekil A.30 : 0,3 bar altında 39,60 mm iç çaplı TPU, H-TPU ve S-TPU keçelerin 5m/s için yola bağlı olarak sürtünme momenti değerlerinin değişimi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Dilek BULUT

Doğum Yeri ve Tarihi: 1989, İstanbul

Lisans: İstanbul Üniversitesi, Makine Mühendisliği (2008-2012)