

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELEMANLARINDA
SÜRTÜNME MOMENTİNİN DENEYSEL TAYİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hacer ÖZPERK**

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELEMANLARINDA
SÜRTÜNME MOMENTİNİN DENEYSEL TAYİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hacer ÖZPERK
(503061214)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Kasım 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Yard.Doç. Dr. Vedat TEMİZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cemal BAYKARA (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Cüneyt FETVACI (İÜ)**

OCAK 2010

Annem ve babama,

ÖNSÖZ

Dönel dudaklı sızdırmalık elemanlarının performans karakteristiklerinin mil pürüzü keçe çapı ve keçe tipine bağlı olarak değişiminin sürtünme momenti takibi ile deneysel olarak belirlenmesi üzerine yapılan bu yüksek lisans çalışması esnasında bana yol gösteren sayın hocam Y. Doç.Dr. Vedat TEMİZ'e, değerli önerileri ile çalışmama katkıda bulunan Öğr. Gör Dr. Zeynep PARLAR'a, labaratuvar çalışmalarında teknik desteğini hiç esirgemeyen Orhan KAMBUROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana her konuda destek olan çok sevdiğim meslaktaşım Cihat Gül'e teşekkür etmeyi borç bilirim.

Bana hayatımın her aşamasında destek olan ve sevmekten asla vazgeçmeyen, kısaca herşeyin sebebi annem, babam ve kızkardeşlerime...

Ocak 2009

Hacer Özperk
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
2. SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI.....	5
2.1 Tanım	5
2.2 Dönel Sızdırmazlık Elemanları	10
2.3 Dönel Sızdırmazlık Elemanlarının Bölümleri.....	12
2.3.1 Metal bilezik	14
2.3.2 Kauçuk/elastomer kısım.....	15
2.3.3 Garter yayı.....	17
3. SIZDIRMAZLIK MEKANİZMASI	19
3.1 Mikro-Sızdırmazlık Mekanizması.....	19
3.1.1 Sızdırmazlık elemanının yüzeyi.....	21
3.1.2 Mil yüzeyi	23
3.1.3 Çapsal yük.....	25
3.1.4 α , β açıları, basınç farkı.....	26
3.2 Makro-Sızdırmazlık Mekanizması	27
3.3 Dönel Sızdırmazlık Elemanlarının Performansına Etki Eden Parametreler	28
3.3.1 Mil tasarımı	28
3.3.2 Keçe yuvası tasarımı	28
3.3.3 Yağ sıcaklığı	29
3.3.4 Mil-yuva kaçıklığı (Statik eksantriklik)	29
3.3.5 Dinamik eksantriklik.....	29
3.3.6 Açısal kaçıklık.....	31
3.3.7 Yağlayıcı	31
3.3.8 Yağ seviyesi	31
3.3.9 Titreşim	32
3.3.10 Basınç.....	32
3.3.11 Çevreden gelen kirletici maddeler ve toz dudağı.....	32
3.3.12 Garter yayı kuvveti ve R değeri	33
4. DENEY TESİSATI VE DENEYİN YAPILIŞI	35
4.1 Deney Tesisatı	35
4.1.1 Mil.....	37
4.1.2 Keçe yuvası-kapak	38

4.2 Deney Şartları ve Deney Numuneleri.....	39
4.3 Deneyin Yapılışı.....	41
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	43
KAYNAKLAR.....	49
EKLER.....	51

KISALTMALAR

ACM	: Poliakrilik Kauçuk
AEM	: Etilen Akrilik Kauçuk
AUEU	: Poliüretan Kauçuk
BR	: Butadien Kauçuk
CR	: Klorobutadien Kauçuk
ECO	: Epikloridrin Kauçuk
EPDM	: Etilen Propilen Kauçuk
FFKM	: Perfluore Elastomer Kauçuk
FKM	: Flurokarbon Kauçuk
FVQM	: Fluorosilikon Kauçuk
HNBR	: Yüksek yoğunluklu Nitril Butadien Kauçuk
IIR	: Butil Kauçuk
NBR	: Nitril Butadien Kauçuk
NR	: Tabii Kauçuk
PNF	: Fosfonitril Fluoroelastomer Kauçuk
PNR	: Polinorbomen Kauçuk
PTFE	: Politetra Fluruoroetilen Kauçuk
Ra	: Mil Yüzey Pürüzlülüğü
SBR	: Sitren Butadien Kauçuk
T	: Polisülfid Kauçuk
VMQ	: Silikon Kauçuk
YBPO	: Polyester Elastomer

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Keçe bölümleri.	13
Çizelge 3.1 : Eksantriklik limitleri.....	31
Çizelge 4.1 : Yağın fiziksel özellikleri.	37
Çizelge 4.2 : Mil uçları için yüzey pürüzlülüğü değerleri.	38
Çizelge 4.3 : Deney matrisleri.	40
Çizelge 4.4 : Keçelerin özellikleri.	40
Çizelge A.1 : A Profili- $\Phi 40$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.....	52
Çizelge A.2 : A Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.....	53
Çizelge A.3 : A Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.....	55
Çizelge A.4 : B Profili- $\Phi 40$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.....	54
Çizelge A.5 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.....	58
Çizelge A.6 : B Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.....	59

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sızdırmazlık elemanlarının sınıflandırılması	5
Şekil 2.2 : Statik durumlarda kullanılan keçeler.....	6
Şekil 2.3 : Doğrusal hareket yapan millerde sızdırmazlık.....	7
Şekil 2.4 : Dönen millerde temassız sızdırmazlık.	8
Şekil 2.5 : Döner millerde temaslı sızdırmazlık.	9
Şekil 2.6 : Yaysız keçeler.	10
Şekil 2.7 : Yaylı keçeler.....	11
Şekil 2.8 : Ekstrem durumlarda kullanılan keçeler.....	11
Şekil 2.9 : Keçe üniteleri.	12
Şekil 2.10 : Keçe kesit görünüşü	12
Şekil 2.11 : Keçe kesit şematik görünüşü.	13
Şekil 2.12 : Keçe yuva teması.....	14
Şekil 2.13 : Keçe dış çapı tasarımları.	14
Şekil 2.14 : Keçe malzemelerinin çalışma sıcaklıkları.	16
Şekil 2.15 : Garter yayı.	18
Şekil 3.1 : Dudak kesitinde oluşan kaviteasyon bölgeleri.....	20
Şekil 3.2 : Mikrodalgalanma ve Mikropürüz.....	21
Şekil 3.3 : Radyal temas basıncı ve teğetsel sürtünme profili	22
Şekil 3.4 : Mikropürüzlerin kayma gerilmesi etkisi altındaki görüntüsü	23
Şekil 3.5 : Kamüller deneyi	26
Şekil 3.6 : Makro-sızdırmazlık mekanizması.....	27
Şekil 3.7 : Statik eksantriklik.....	29
Şekil 3.8 : Dinamik eksantriklik	30
Şekil 4.1 : Deney tesisatının şematik görünüşü	35
Şekil 4.2 : Deney tesisatının prensip şeması.....	36
Şekil 4.3 : Deney tesisatının genel görünüşü.....	36
Şekil 4.4 : Kapağın kesit görünüşü	38
Şekil 4.5 : Keçe profilleri.	39
Şekil 4.6 : Veri toplama.	41
Şekil 4.7 : Kalibrasyon eğrisi.	42
Şekil A.1 : A Profili-Φ40 mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	52
Şekil A.2 : A Profili-Φ40 mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	53
Şekil A.3 : A Profili-Φ35 mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	54
Şekil A.4 : A Profili-Φ35 mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	54
Şekil A.5 : A Profili-Φ30mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	55
Şekil A.6 : A Profili-Φ30mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	56

Şekil A.7 : B Profili- $\Phi 40$ mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	57
Şekil A.8 : B Profili- $\Phi 40$ mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	57
Şekil A.9 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	58
Şekil A.10 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı u keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	59
Şekil A.11 : B Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri	60
Şekil A.12 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.....	60
Şekil A.13 : 40 mm çap, 0,2 μ m pürüz, 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	61
Şekil A.14 : 40 mm çap, 0,2 μ m pürüz, 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	161
Şekil A.15 : 40 mm çap, 0,9 μ m pürüz, 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	62
Şekil A.16 : 40 mm çap, 0,9 μ m pürüz, 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	620
Şekil A.17 : 40 mm çap, 1,5 μ m pürüz 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	63
Şekil A.18 : 40 mm çap, 1,5 μ m pürüz 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	63
Şekil A.19 : 35 mm çap 0,03 μ m pürüz 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	64
Şekil A.20 : 35 mm çap 0,03 μ m pürüz 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	264
Şekil A.21 : 35 mm çap 1,065 μ m pürüz, 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	65
Şekil A.22 : 35 mm çap 1,065 μ m pürüz, 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	65
Şekil A.23 : 35 mm çap 2 μ m pürüz, 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	66
Şekil A.24 : 35 mm çap 2 μ m pürüz, 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	66
Şekil A.25 : 30 mm çap 0,04 μ m pürüz 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	67
Şekil A.26 : 30 mm çap 0,04 μ m pürüz 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	67
Şekil A.27 : 30 mm çap 0,719 μ m pürüz 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	68
Şekil A.28 : 30 mm çap 0,719 μ m pürüz 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	68
Şekil A.29 : 30 mm çap 1,15 μ m pürüz, 0 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	69
Şekil A.30 : 30 mm çap 1,15 μ m pürüz 0,5 bar basınç için profilerin sürtünme momentleri.....	69
Şekil A.31 : 0,2 μ m pürüz 0bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri	70
Şekil A.32 : 0,2 μ m pürüz 0,5 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri	70

Şekil A.33 : 0,9 µm pürüz, 0 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri	71
Şekil A.34 : 0,9 µm pürüz, 0,5 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri ...	71
Şekil A.35 : 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri	72
Şekil A.36 : 1,5 µm pürüz 0,5 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri	72
Şekil A.37 : 0,2 µm pürüz 0 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri	73
Şekil A.38 : 0,2 µm pürüz 0,5 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri	73
Şekil A.39 : 0,9 µm pürüz 0 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri	74
Şekil A.40 : 0,9 µm pürüz 0,5 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri	74
Şekil A.41 : 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri	75
Şekil B.1 : 40 mm çap, 0,039 µm pürüz değeri için yüzey profili	77
Şekil B.2 : 40 mm çap, 0,981 µm pürüz değeri için yüzey profili	77
Şekil B.3 : 40 mm çap, 1,550 µm pürüz değeri için yüzey profili	77
Şekil B.4 : 35 mm çap, 0,030 µm pürüz değeri için yüzey profili	77
Şekil B.5 : 35 mm çap, 1,065 µm pürüz değeri için yüzey profili	78
Şekil B.6 : 35 mm çap, 2,000 µm pürüz değeri için yüzey profili	78
Şekil B.7 : 30 mm çap, 0,040 µm pürüz değeri için yüzey profili	78
Şekil B.8 : 30 mm çap, 0,719 µm pürüz değeri için yüzey profili	78
Şekil B.9 : 30 mm çap, 1,150 µm pürüz değeri için yüzey profili	79

DÖNEL SIZDIRMAZLIK ELEMANLARINDA SÜRTÜNME MOMENTİNİN DENEYSEL TAYİNİ

ÖZET

Sızdırmazlık elemanları mekanik sistemlerin problemsiz çalışmasında önemli payı olan makina elemanlarıdır. Bu elemanların sızdırmazlık mekanizmaları uzun yıllardan beri çalışılmakta olmasına rağmen konu tam olarak netleşmiş değildir.

Çalışmada önce sızdırmazlık tanımlanmış, ardından sızdırmazlık elemanları hakkında bilgiler verilmiştir, dönel sızdırmazlık elemanları hakkında detaylı bilginin sunulmasının ardından sızdırmazlık mekanizmasının çalışma prensibi incelenmiştir. Mikropompalamaya değinildikten sonra sızdırmazlığa etki eden faktörler sıralanmıştır.

Bu çalışmada dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının performansına etkiyen parametreler araştırılmıştır. Çalışma kapsamındaki parametreler keçe profili, keçe çapı ve keçenin üzerinde çalıştığı milin pürüz yüksekliğidir. Bu amaçla sızdırmazlığı sağlanan silindir bloğu dört adet yük hücresi üzerine yerleştirerek keçenin çalışması esnasında oluşan sürtünme momenti takip edilmiştir. Deneylere başlamadan önce keçelerin gruplanmasında öncelikle dudak profili esas alınmış, iki adet keçe profili tayin edilmiştir. Her iki profil grubu için 40-35-30 mm çaplarında keçeler seçilmiştir. Mil yüzeyi pürüzleri belirlenirken biri literatürde önerilen değer olacak şekilde biri bu değerın altında diğeri de üstünde olmak üzere 3 pürüz değeri seçilmiştir. Böylece her bir çap için 3 adet mil yüzey pürüzü denenmiş olacaktır. Ancak imalat sırasında bu değerler tam olarak elde edilemeyeceğı için değerlere en yakın pürüz değerleri kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler ile 3 tip çapraz karşılaştırma yapılmıştır. İlk karşılaştırmada mil yüzey pürüzlülüğünün sürtünme momenti ile ilişkisi, ikinci karşılaştırmada aynı çap ve pürüz değerlerinde farklı profillerin momentlerinin karşılaştırılması, üçüncü grup karşılaştırmada ise aynı pürüz değeri ve profil grubu içinde yer alan keçelerin meydana getirdiğı momentlerin keçe çapına göre karşılaştırılması yapılmıştır.

Sonuç olarak ikinci profil grubunda ölçülen moment değerinin daha yüksek olduğı, literatürde önerilen pürüz değeri aralığında seçilen pürüzlerin ölçülen moment değerlerinin genel olarak diğelerinden daha düşük olduğı ve çap arttıkça okunan moment değerinin arttığı görülmüştür.

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTIONAL MOMENT OF ROTARY LIP SEALS

SUMMARY

Leakage components play a crucial role in proper functioning of machines. Although the sealing mechanism is studied for many years, the subject is still an unsolved problem.

In this thesis, sealing is defined, and leakage components are introduced. Rotary lip seals are mentioned widely and sealing mechanism, especially micropumping is explained. After all parameters that effect seal performance are referred, experimental set up is introduced.

The purpose of this study is to investigate how rotary lip seal's performance is related with shaft surface roughness, shaft speed and diameter, lip profile. For this reason a cylinder is placed on four load cells to monitor the moment generated between seal and counterface. While grouping the seals for experiments, profile is the prior criteria. Two different profiles and three different inner diameters (30-35-40 mm) are selected. For the shaft surface roughness values, one value is between the limits that are mentioned in standarts, and two others are greater or less than that limits, which means three shaft roughness values for each diameter are tested. At the end of the experiments three comparisons are made. Relationship between moment and shaft surface roughness, between lip profile and moment and relationship between shaft diameter and moment are investigated.

As a result moment monitored for the second lip profile group is observed to be greater. Shaft surface roughness value which is selected according to standarts seemed to generate less moment than others, and as the shaft diameter increases moment increases.

1. GİRİŞ

Ortak bir sınırı paylaşan iki ortam arasında boşluk olduğu sürece madde geçişi molekül boyutunda dahi olsa engellenemez. Sızdırmazlığın amacı bu madde geçişini kontrol altına almaktır. Uygulamada ise sızdırmazlık elemanı, yağlayıcının ya da basınçlı akışkanın sistem içerisinden sızmasına engel olacak ya da bunu kontrol altına alacak elemandır

Çalışmanın konusu dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarıdır. Dönel sızdırmazlık elemanları mil ya da yuvadan birinin hareketli olduğu durumlarda kullanılırlar. Bahsi geçen dinamik durum için lineer harekette V-keçeler, dönel harekette ise dudaklı radyal keçeler kullanılır. Keçenin dudak kısmı toz, kir ve yabancı partiküllerin sızdırmazlıkta mikropompalamada aktif rol oynayan dudak kısmının zedelenerek zarar görmesine, yağlayıcı sisteme girmesine mani olur.

Mikropompalama sızdırmazlıkta aktif rol oynayan yüzeydeki pürüzlerin kayma gerilmesi sebebiyle deforme olması ve birer pompa gibi davranarak dudağın iki yanındaki yaklaşma açıları arasındaki fark sebebiyle hava tarafından yağ tarafına yağ pompalamasıdır. Mikropompalama mekanizmasında dudak yüzeyindeki pürüzler kadar olmasa da mil yüzeyindeki pürüzler de etkindir. Mil yüzeyindeki pürüzler alışma süresinde keçe yüzeyindeki pürüzlerin oluşumunda etkin rol oynarlar. Çalışma esnasında da yağı depolayıp mikropompalamaya katkıda bulunurlar. Mil yüzeyi pürüz değerinin beklenenden fazla olmasının dudakta yırtılmaya pompalamaya uygun olmayan pürüzlenmeye sebebiyet verdiği görülmüştür. Aynı şekilde pürüz değerinin düşük olması da mikropompalamaya aksi yönde etki eder. Dolayısıyla mil yüzeyi pürüzü keçe performansına etki eder. Yapılan deneylerde keçenin çalışması süresince sürtünme momenti ölçülmüş, mil yüzey pürüzünün keçe performansına etkisi araştırılmıştır

Tezin amacı mil yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra mil çapı ve profil geometrisinin keçe performansına etkilerini araştırmaktır.

1.1 Literatür Özeti

Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının sızdırmazlık mekanizmasının nasıl işlediğinin anlaşılması için büyük bir kısmı numerik bir kısmı da deneysel olmak üzere bir çok çalışma yapılmıştır.

Richard Salant ve George W. Woodruff 2002 yılında yaptıkları çalışmada [1] mil yüzeyi pürüzünün keçe performansına hidrodinamik etkilerini araştırmışlardır. Ra_{mil} / Ra_{dudak} oranının değişik değerleri (0,05, 0,10, 0,15) için matematiksel olarak hesaplanan mikropompalama debilerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek mikropompalama debisi Ra_{mil} / Ra_{dudak} değerinin en yüksek olduğu 0,15 oranında gözlenmiştir.

M. Silvestri, E. Prati ve A. Tasora çalışmalarında [2] sürtünme momentinin deneysel ve nümerik tesbiti üzerine çalışmışlar, yapılan FEA analizleri ile de çalışmalarını desteklemişlerdir. Aktif dudak bölgesinde gözlenen moment değerleri farklı mil hızları için incelenmiştir.

Philip C. Hadinata and Lyndon Scott Stephens çalışmalarında [3] mil yüzeyleri için çeşitli mikropürüz formları (üçgen, kare, altıgen, dairesel) seçip bunları $100 \times 100 \mu m^2$ alan içerisinde yerleştirerek yük kapasitesi ve sürtünme katsayısının hesabı için pürüz yüksekliği de bir faktör olduğundan çeşitli pürüz yüksekliklerinde analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Reynolds denklemleriyle yapılan hesaplamalar sonucunda dudak pürüzsüz varsayıldığı halde mildeki pürüzlerden üçgen formda olan mikropompalamada etkin sonuçlar göstermiştir. Normal yüzeylerde görülen yaklaşık 2,6 katı kadar yüksek bir pompalama debisi görülmüştür. Mile eklenen bu pürüzler, dudağın yağlama özelliklerini iyileştirmiş, sürtünme katsayısını düşürmüş ve mikropompalama debisini arttırmıştır.

Fanghui Shi ve Richard F. Salant 2001 yılında yaptıkları çalışmalarında [4] benzerlerinden farklı olarak pürüzlerin düzenli yerleşimli olarak modellemek yerine neredeyse rasgele bir yüzey tanımı yapılmıştır. Sürtünme katsayısı, tersine pompalama debisi, temas bandı profili, temas ve kavitasyon alanı gözlenmiştir.

Gawlinsky ve Kasprzyk 2003 yılında yaptıkları deneysel çalışmada [5] çeşitli mili pürüzleri için ölçülen moment değerlerine ve değişken mil hızlarına göre yapılan karşılaştırmalardan mil ve keçe tasarımı ile ilgili sonuçlara ulaşmışlardır.

Thomas Kuntsfeld ve Werner Haas dönel keçeler için belirtilen pahalı bir yöntem olan taşlama yerine daha ekonomik bir metod torna tezgahında imal edilmiş millerin pompalama debilerini incelemişlerdir [6]. Torna tezgahında imal edilmiş millerde çalışan keçelerle taşlama ile imal edilen millerde çalışan keçelerde performans açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir.

Richard F. Salant ve Dawei Shen, radyal dudaklı keçelerin davranışına mil yüzey pürüzlülüğünün hidrodinamik etkilerini araştırmışlardır [7]. Yapılan teorik hidrodinamik ve elastohidrodinamik analizler sonucunda, dudaklı keçelerin performansına yüzey pürüzlülüğünün etkilediği görülmüştür. Çalışmanın sonucunda mil yüzey pürüzlülüğünün yük taşıma kabiliyetine, pompalama debisine, film kalınlığına etkileri gözlenmiştir.

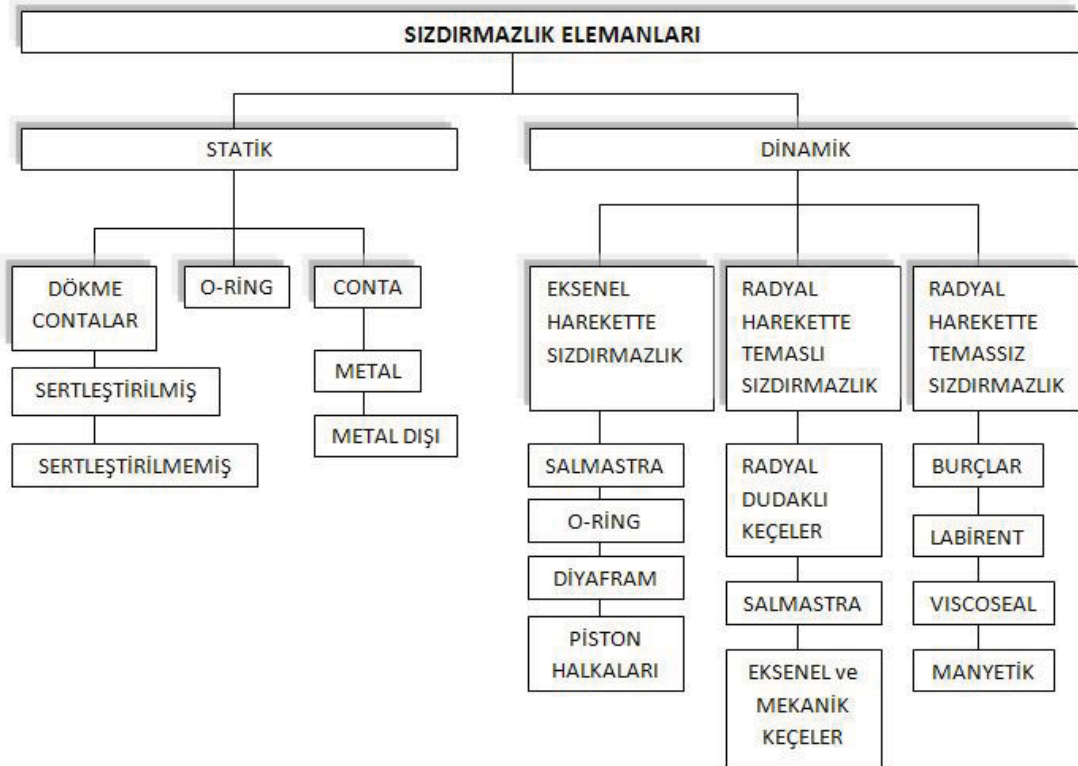
Sunulan bu çalışmada mil yüzey pürüzlülüğünün dudaklı keçenin performansına etkileri araştırılmıştır. Keçeler 0,02 ile 2 μ m arasındaki pürüzlülüğe sahip mil uçları üzerinde 0 bar ve 0,5 bar basınçlarda, 0,5, 1, 3 ve 5 m/s çevresel hızlarda çalıştırılmış, çok sayıda ölçüm alınmıştır. Farklı çap ve farklı dudak profillerinde seçilen keçelerin sürtünme momenti değerleri incelenerek keçe ve mil çapı ve keçe profil geometrisinden keçe performansının nasıl etkilendiği gözlenmiştir.

2. SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI

2.1 Tanım

Sızdırmazlık, ortak bir sınırı paylaşan iki ortam arasında madde geçişinin kontrol altına alınmasıdır, zira iki ortam arasındaki madde geçişi fonksiyonel boşluk olduğu sürece engellenemez, geçiş molekül bazında dahi olsa gerçekleşir.

Endüstriyel uygulamalarda yağlayıcı akışkanın veya sistemde mevcut basınçlı akışkanın çalışma sırasında sistemden dışarı sızmasını önleyebilmek veya kaçağı kontrol altına alabilmek amacıyla kullanılan elemanlara sızdırmazlık elemanları denir. Yataklarda kullanılan sızdırmazlık elemanları, yağlayıcı maddenin yatak dışına çıkmasına ve yatağa toz, nem ve yabancı partiküllerin girmesine engel olur.



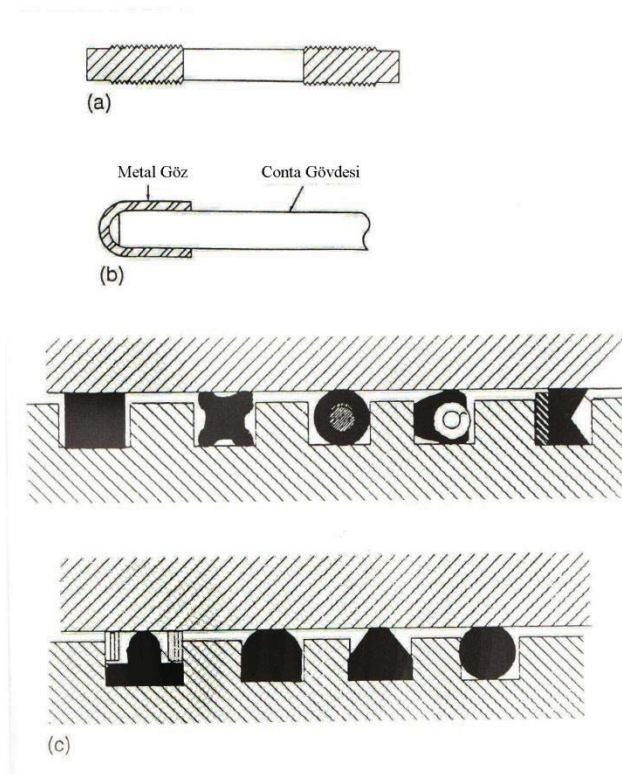
Şekil 2.1 : Sızdırmazlık elemanlarının sınıflandırılması

Sızdırmazlık elemanları dinamik ve statik olmak üzere ikiye ayrılır. Statik sızdırmazlık elemanları iki hareketsiz yüzey arasındaki akışkan geçişini kontrol ederken, dinamik sızdırmazlık elemanları ise birbirine göre izafi hareket eden iki yüzey arasındaki akışkan geçişini kontrol etmektedir. Şekil 2.1’de sızdırmazlık elemanlarının sınıflandırılması görülmektedir.

Dinamik ve statik sınıflandırmanın ardından sızdırmazlık elemanları temaslı ve temassız sızdırmazlık elemanları olarak da sınıflandırılabilir. Temaslı sızdırmazlık sistemlerinde birlikte çalışan elemanların arasına her ikisi ile temas halinde bulunan bir eleman kullanılmaktadır. Temassız sistemlerde ise çok dar kanalların yağ akışına karşı oluşturdukları dirençten faydalanılır. Temassız sızdırmazlık elemanlarında sürtünme, aşınma olmadığı için teorik olarak sonsuz ömre sahip olabilmektedirler.

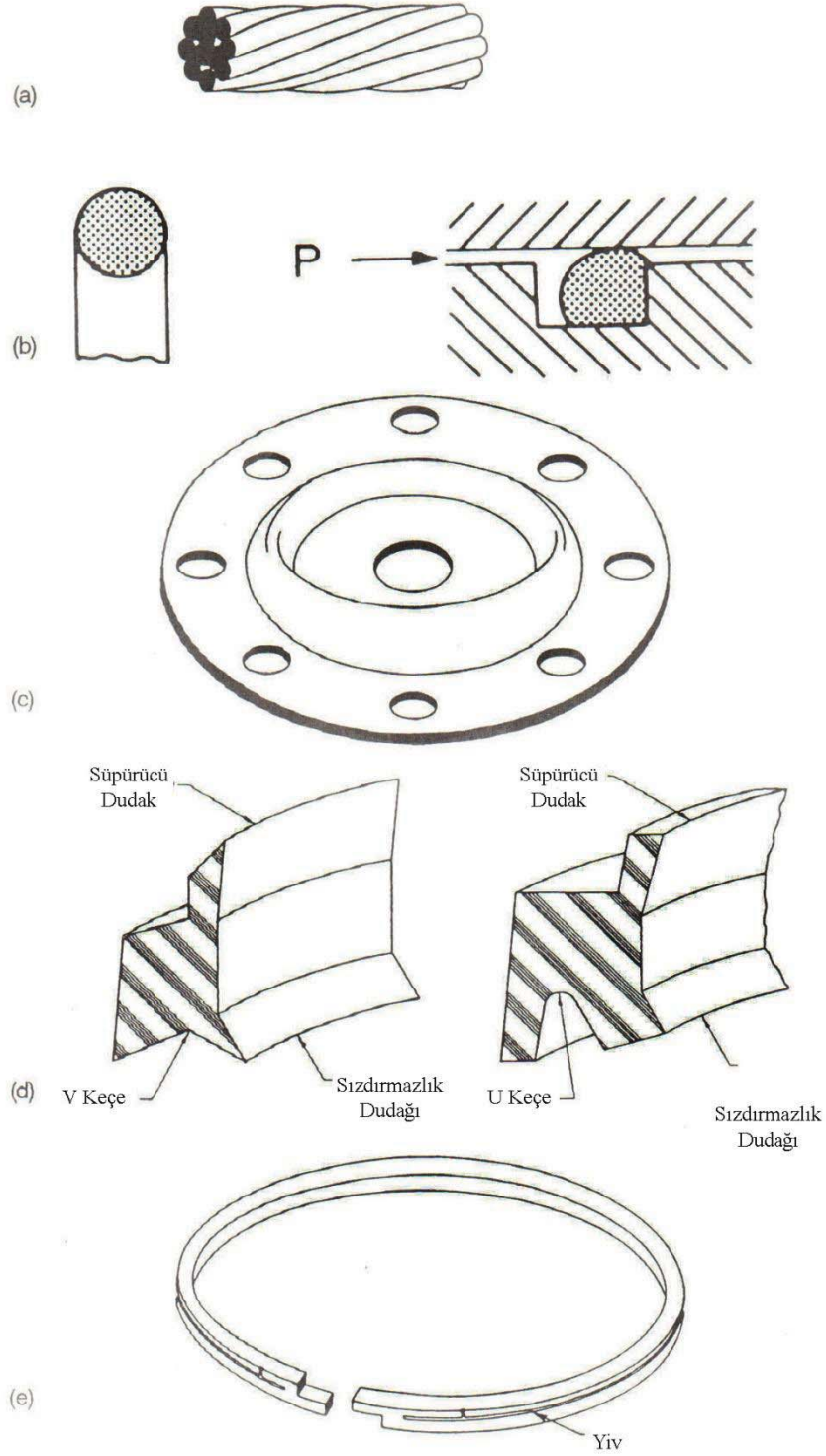
Çalışmanın bu kısmında verilecek bilgiler için [8] numaralı kaynaktan yararlanılmıştır.

Şekil 2.2’de statik durumlarda kullanılan keçeler görülmektedir. Statik durumlar için metal conta (a), metal olmayan contalar(b), ve çeşitli şekillerdeki o-ringler (c) kullanılmaktadır.



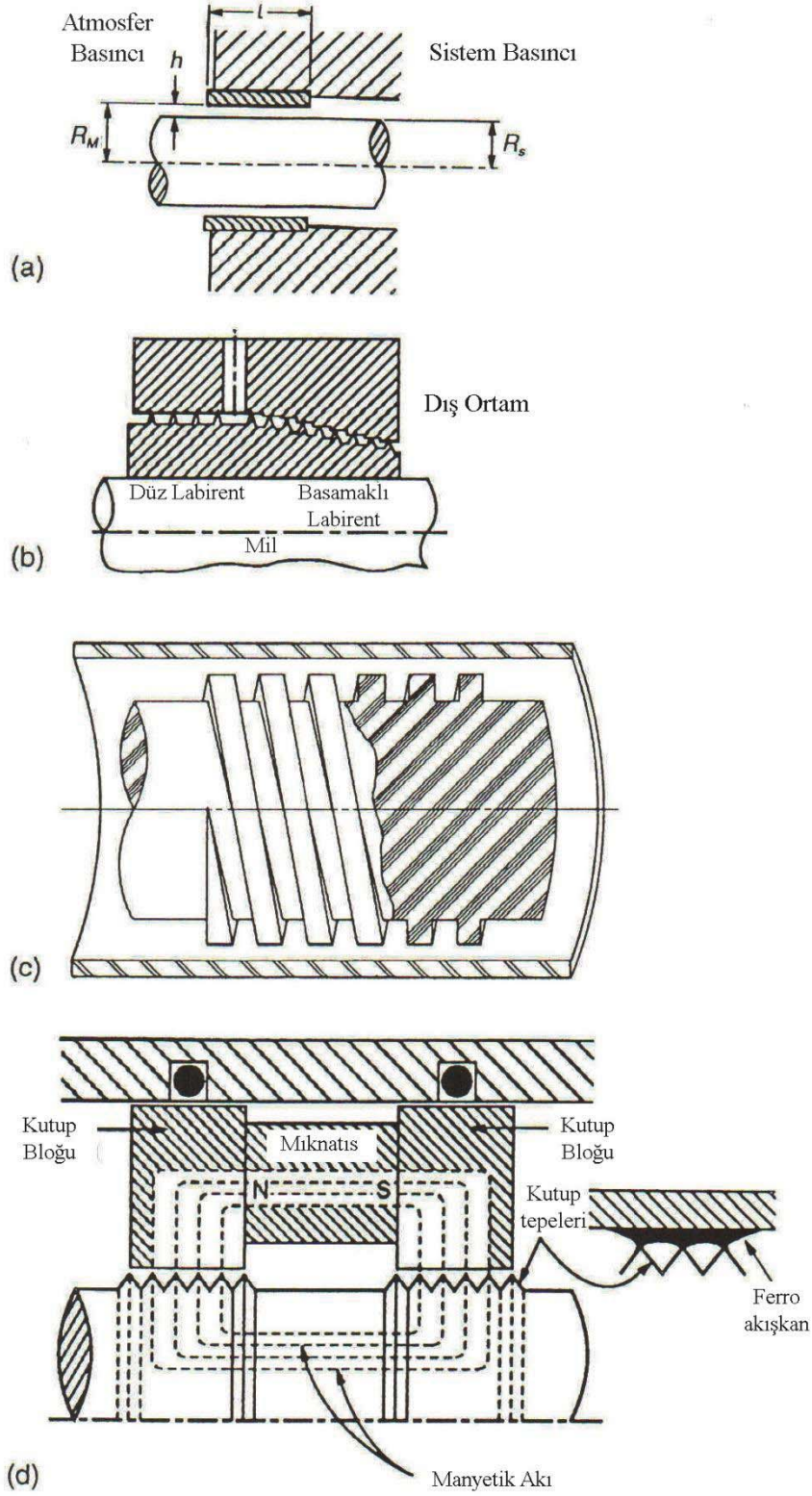
Şekil 2.2 : Statik durumlarda kullanılan keçeler.

Şekil 2.3’de doğrusal hareket yapan miller için sızdırmazlık elemanları ile ilgili örnekler bulunmaktadır. Salmastra (a), O-ring (b), diyafram (c), dudaklı keçe (d) ve piston halkaları (e) bu grubun içinde yer alırlar.



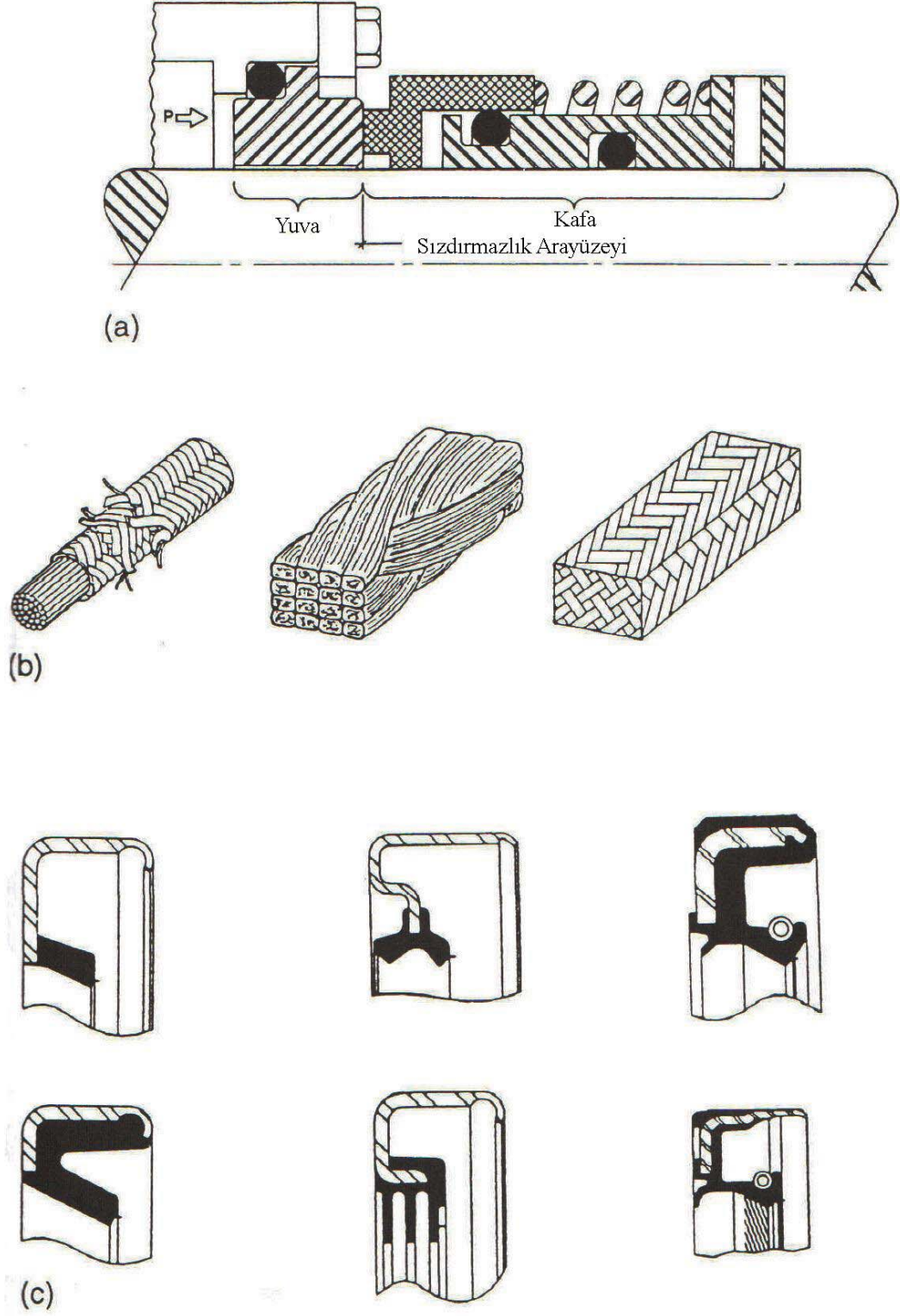
Şekil 2.3 : Doğrusal hareket yapan millerde sızdırmazlık

Dönen millerde temassız sızdırmazlık ise Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere burç(a), labirent (b) sistemleri ile sağlanabildiği gibi visko/hidrodinamik (c) ve manyetik (d) sızdırmazlık ile de sağlanabilir.



Şekil 2.4 : Dönen millerde temassız sızdırmazlık.

Şekil 2.5'te dönen millerde temaslı sızdırmazlık sağlayan elemanlar görülmektedir. Eksenel ve meknik keçeler (a) , salmastra (b) ve dudaklı keçeler (c) bu grubun örnekleridir.



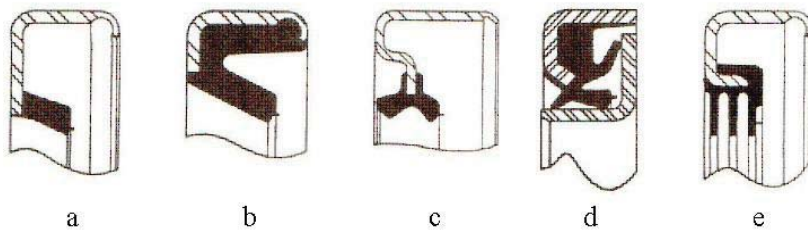
Şekil 2.5 : Döner millerde temaslı sızdırmazlık.

2.2 Dönel Sızdırmazlık Elemanları

Radyal dudaklı keçeler, rulmanlı yataklar ve dişlilerde kullanılmakla beraber, otomotiv endüstrisi (krank milinde, transmisyonda, tekerleklerde, aks pinyonlarında) ve beyaz eşya endüstrisi en yaygın kullanım alanlarıdır. Kullanım alanının genişliğinden ötürü, yanlış tasarımların sonucu ortaya çıkacak çevresel ve ekonomik zararın boyutları da büyük olur. Dolayısıyla sızdırmazlık mekanizmasının ve sızdırmazlığa etki eden parametrelerinin iyice anlaşılması, tasarımların tecrübeden çok deneysel ve matematiksel çalışmalara dayanması gerekmektedir.

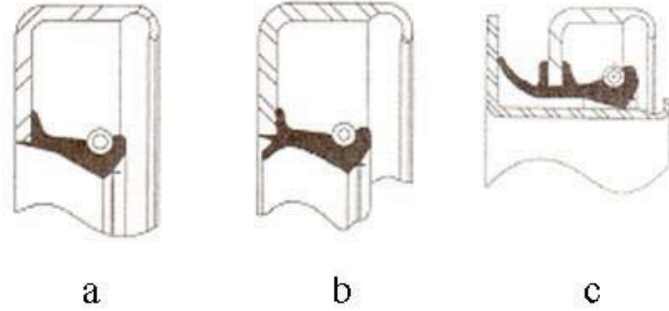
Bu bölümde dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının genel sınıflandırılmasının ardından bu elemanların genel yapısı bileşen bazında incelenecek, malzeme özelliklerine değinilecektir. Sızdırmazlık elemanının iyice anlaşılmasından sonra sızdırmazlık mekanizması anlatılacaktır.

Yaysız keçeler düşük hız ve sıcaklıklarda kullanılırlar, maliyetleri yaylı keçelere nispeten daha azdır. Şekil 2.6. a'da görülen keçe yaklaşık 10m/s çevresel hız ve 100 °C çalışma sıcaklığına kadar kullanılabilir. Şekil 2.6.b'de görünen keçe ise dış ortamın korosif olduğu durumlarda metal bileziğin dış ortamdan etkilenmemesi için, bileziğin yüzeyini kaplayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durum için paslanmaz çelik de kullanılabilir, fakat bu mazleme keçenin maliyetini artırır. Çift dudaklı keçelerde ise bir dudakla sızdırmazlığı sağlarken diğeri ile dışarıdan gelecek toz kir ve partiküllere mani olur(c) Bu tip keçeler daha çok otomobiller, konveyörler, dişli kutularında ve yağlamanın yapıldığı diğeri bir çok uygulamada kullanılır. Bazı keçelerde aksel toz dudakları görülebilir(d). Tarım makineleri gibi ağır ve kirli koşullarda çalışan çevresel hızı 2,5 m/s geçmeyen uygulamalarda kullanılan keçe de (e) aşağıda görülmektedir.



Şekil 2.6 : Yaysız keçeler.

Yaylı keçeler gresden daha düşük viskoziteye sahip yağlar söz konusu olduğu zaman kullanılır. Düzgün çapsal yükleme ve elastomerin sıcaklık ve zamanla değişen özelliklerini kompanse etmek için kullanılır. Yaylı keçelerde en yüksek çevresel hızlar 25 m/s civarındadır. Bu hız seçilen elastomer malzemenin de özelliklerine de bağlıdır. Özel malzeme ve tasarımlarla bu limit 50 m/s'ye kadar çıkarılabilir. Aşağıda Şekil 2.7'de tek dudaklı (a), çift dudaklı yani radyal toz dudaklı (b) ve eksenel toz dudaklı(c) keçeler görülmektedir.



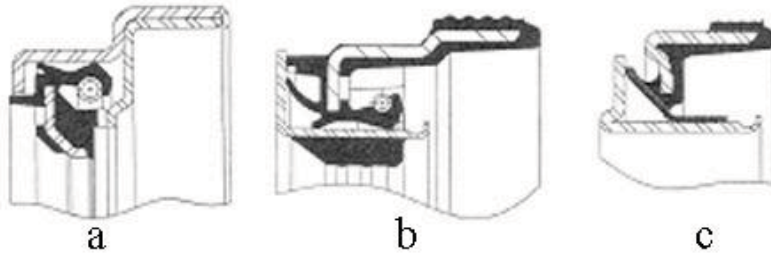
Şekil 2.7 : Yaylı keçeler.

Sıradan keçe tasarımlarının yetersiz kaldığı kimyasal reaksiyon, aşırı sıcaklıklar veya zor yağlama koşulları gibi çeşitli özel durumlar için geliştirilen keçeler de mevcuttur. Aşağıda Şekil 2.8'de metale zor yapışan keçe(a), destekli yüksek basınç keçesi (b), titreşim etkisini azaltmak için sarmal dudaklı keçeler(c), yağ tarafında filtre hava tarafında dudak bulunan keçe(d), son olarak da conta, dudaklı keçe ve sıyırıcıyı bir arada sunan keçe tipi (e) görülmektedir.



Şekil 2.8 : Ekstrem durumlarda kullanılan keçeler.

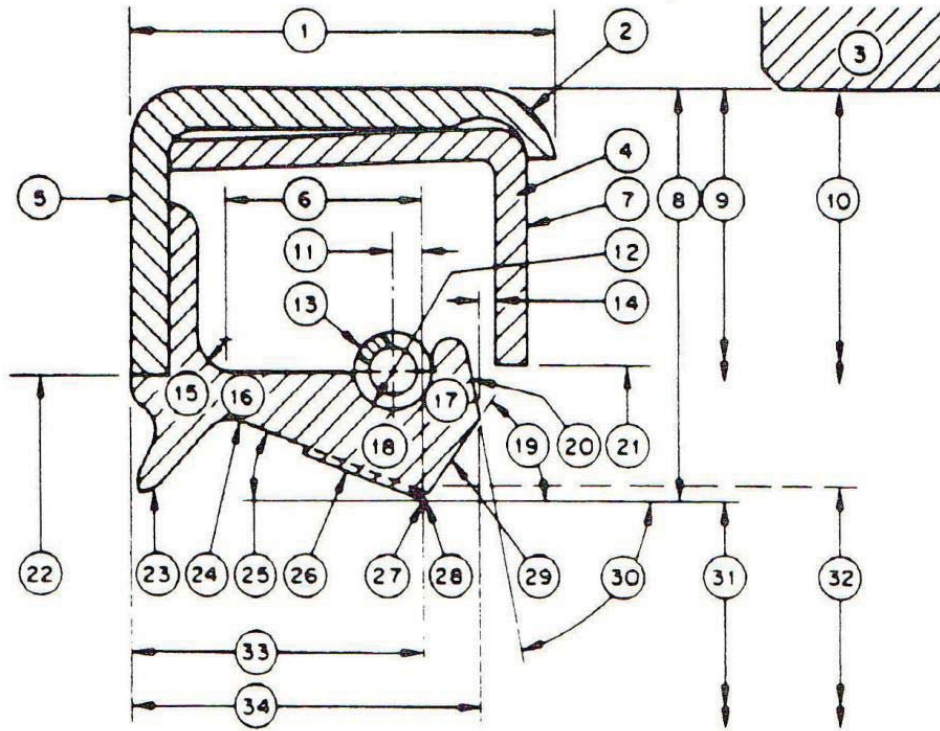
Aşağıda Şekil 2.9'da keçe üniteleri olarak geçen dönen göbeklerde kullanılan eksenel toz dudaklı keçe(a), hem iç hem de dış çapta sızdırmazlığı sağlayacak eksenel toz dudaklı keçe (b) ve PTFE kompoziti eksenel toz dudaklı keçe (c) görülmektedir.



Şekil 2.9 : Keçe üniteleri.

2.3 Dönel Sızdırmazlık Elemanlarının Bölümleri

Şekil 2.10' da garter yayı ile çapsal olarak yüklenmiş dönel dudaklı sızdırmazlık elemanının kesit görünüşü görülmektedir [19]. Bu kısımda sızdırmazlık elemanının 3 ana kısmı detaylı olarak anlatılacak ve bu parçaların sızdırmazlık mekanizmasına etkilerine giriş yapılacaktır.

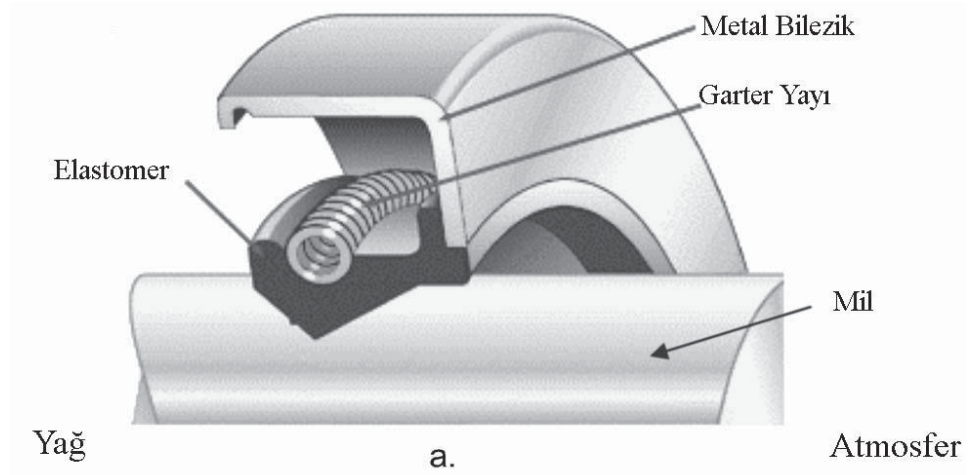


Şekil 2.10 : Keçe kesit görünüşü.

Çizelge 2.1 : Keçe bölümleri.

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

Çalışmanın bu kısmında Şekil 2.11’de görüldüğü gibi dudaklı sızdırmazlık elemanının 3 temel bölümü incelenecektir.

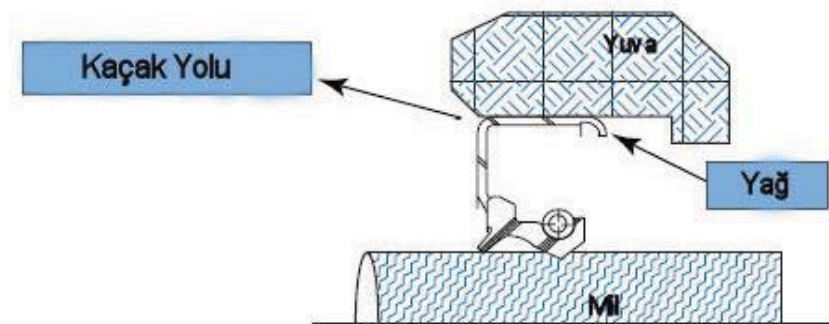


Şekil 2.11 : Keçe kesit şematik görünüşü[3].

2.3.1 Metal bilezik

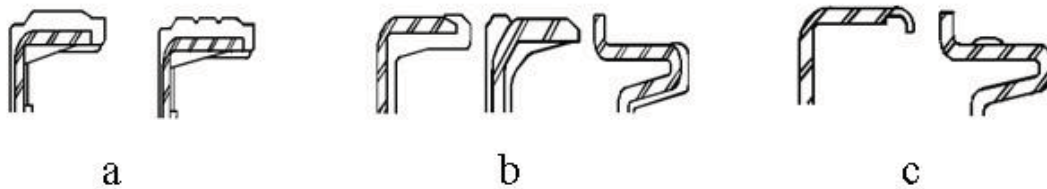
Dudaklı sızdırmazlık elemanında elastomer kısım daha rijit olan genellikle çelikten(1005,1020 soğuk haddelenmiş çelik) imal edilmiş bileziğe bağlanır. Bileziğin dış çapı yuvadan daha büyük imal edilir ve pres geçme ile yağ kaçağı engellenir.[8]

Dönel sızdırmazlık elemanının dış yüzeyi yuva içinde dönmeyecek ya da yuvadan çıkmayacak, yuva malzemesiyle uyumlu, kolay monte edilebilir, yuvadaki kusurları kompanse edebilecek şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 2.12 : Keçe-yuva teması.

Dudak ile mil arasında sızdırmazlığın sağlanması durumunda potansiyel kaçak bölgesi Şekil2.12’de görüldüğü gibi yuva ve keçenin temas bölgesi olmaktadır [10]. Buna engel olmak adına firmalar çeşitli konstrüksiyonlar geliştirmişlerdir. Dış çapın elastomer ile tamamen kaplanması, elastomer ve metalin beraber kullanılması, sadece metalin kullanılması durumları söz konusudur. Şekil 2.13’de de bu konstrüksiyonlara ait örnekler görülebilir.



Şekil 2.13 : Keçe dış çapı tasarımı.

2.3.2 Kauçuk/elastomer kısım

Sızdırmazlık elemanlarının en önemli kısmı mil ile temas halinde olan elastomerik kısımıdır. Baz polimer ve performansı etkileyen katkılardan oluşan bu kısımda baz polimerin sınırlarının ve özelliklerinin bilinmesi, çalışma şartlarında sıcaklık ve aşınma gibi etkenlerin hesaba katılması gerekmektedir. Elastomer malzemeler boyutta meydana gelebilecek örneğin sıcaklık etkisiyle değişiklikleri telafi edebilme özelliğine sahip olup, geniş toleranslarla çalışmaya imkân vermektedirler[8].

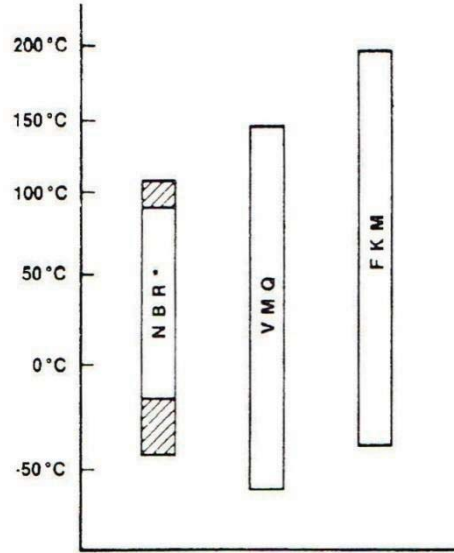
Metaller bir yüke maruz kaldığında Hooke kanuna göre hareket ederler, yani bir değere kadar elastik davranırken sınır değer aşıldığında plastik şekil değişimi gösterirler. Termoplastik ve elastomer malzemeler ise yük karşısında hem elastik bir katı gibi (enerji depolama) hareket ederken hem de viskoz sıvı maddelerin özelliklerini (enerji yutma) gösterirler. Viskoelastik özellikler zaman, sıcaklık, şekil değişimi hızından etkilenirler. Elastomer malzemeler sabit gerilme altında kaldıklarında deforme olurlar(sürünme). Elastomerlerin bir diğer özelliği ise verilmiş belirli bir birim uzamanın sabit kalabilmesi için gerekli olan gerilme değerinin zamana bağlı olarak azalmasıdır (gevşeme). Bahsedilen sebeplerden ötürü bazı durumlarda ön gerilmenin korunması için garter yayının kullanılması gerekmektedir. Keçelerin malzeme seçiminde diğer bir önemli etken ise sertliktir. Sızdırmazlık elemanlarında kullanılan elastomer malzemelerin sertlik dereceleri 40-45 Shore A değeri ile 90-95 Shore A değerleri arasında olabilir. Shore sertliğinde geçen sayı büyüdükçe sertlik derecesinin artışı söz konusudur. Çalışma esnasında sıcaklık artışı ise elastomer malzemenin sertlik değerini düşürür, radyal yükün bu sebeple azalması kaçaklara sebebiyet verebilir.

Radyal dudaklı keçelerde kullanılan elastomer maddeler aşağıdaki gibidir.

1. Tabii Kauçuk (NR)
2. Butadien Kauçuk (BR)
3. Sitren Butadien Kauçuk (SBR)
4. Nitril Butadien Kauçuk (NBR)
5. Klorobutadien Kauçuk (CR)
6. Butil Kauçuk (IIR)
7. Etilen Propilen Kauçuk (EPDM)
8. Polisülfid Kauçuk (T)
9. Poliakrilik Kauçuk (ACM)
10. Silikon (VMQ)
11. Flurokarbon (FKM)
12. Polinorbornen Kauçuk (PNR)

13. Fosfonitril Fluoroelastomer (PNF)
14. Fluorosilikon (FVMQ)
15. Perfluore Elastomer (FFKM)
16. Poliüretan (AU,EU)
17. Etilen Akrilik (AEM)
18. Epikloridrin Kauçuk (ECO)
19. Deri
20. Politetra Fluoroetilen (PTFE)
21. Polyester Elastomer (YBPO)
22. Yüksek Yoğunluklu Nitril Butadien Kauçuk (HNBR)

Bahsi geçen kauçuk elastomerler içerisinde piyasada en çok nitril butadien kauçuk (NBR), Flurokarbon (FKM) kauçuk ve silikon kauçuklara raslanır. Şekil 2.14'te bu üç elastomerin çalışma sıcaklıkları görülebilmektedir. Taranmış bölgelerdeki performans polimer tipine bağlıdır.



Şekil 2.14 : Keçe malzemelerinin çalışma sıcaklıkları[19].

Çalışma kapsamında incelenecek keçe malzemesi NBR'dir. Bu malzemenin bazı özellikleri aşağıdaki gibidir.

Yağa direnci fazla olduğu için genel amaçlı olarak en fazla kullanılan sızdırmazlık elemanı malzemesidir. Nitril oranı özelliklerini önemli oranda etkiler. Nitril oranı arttıkça yağ, çözücü ve sıcaklık direnci, sertlik, modül, sürekli kalıcılık artar, soğuk ortamda çalışma özellikleri ise kötüleşir [11].

Nitril butadien kauçuğun yağa direncinin yüksek olması, katkı maddeleri ile açık hava ve ozona direncinin artırılabilir olması ve ucuz olması gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra bazı kimyasallar ile reaksiyona girmesi, yüksek sıcaklıklarda

ve soğuk şartlarda çalışmaya uygun olmaması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. -40 ile 110°C arasında çalışır. Geliştirilmiş nitril polimeri HNBR ise sıcaklık üst limitini 135 dereceye kadar çıkarmıştır, fakat maliyetinin NBR'den oldukça fazla olması ve imalat zorlukları sebebiyle kullanımı NBR kadar yaygın değildir.

2.3.3 Garter yayı

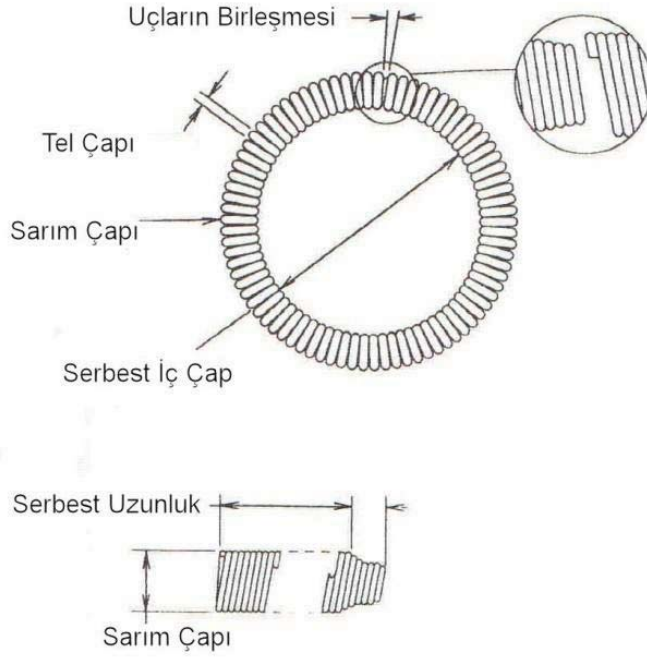
Garter yayı dudaklı keçelerde elastomer dudak ile mil arasında sızdırmazlıkta gerekli çapsal yükün oluşturulması için kullanılırlar. Elastomer maddelerin metallerin tersine ısı genleşme katsayıları oldukça yüksektir. Bu sebeple elastomer eleman ilk çalışma anındaki ani sıcaklık yükselişi sebebiyle elastik şekil değişimine uğrar. Ancak uzun çalışma süreleri göz önüne alındığında sıcaklık ve zaman etkisiyle dudakta plastik şekil değişimi de görülür. Ayrıca belirli sıcaklıklara gelindiğinde elastomerler yağı emer ve dudak yumuşar, uzamaya başlar. Tüm bu etkiler dudak çapının artmasına dudak temas bölgesinin ve çapsal yükün azalmasına sebebiyet verirler[8]. Nitril Butadien kauçukta %-2 ile %5, silikonda %15-20 hacim değişimi gözlenir. Flurokarbon kauçukta teorik olarak hacim değişmesi görülmez. Fakat gevşeme (relaxation) sonucu silikon dışında diğer tüm kauçuklarda oda sıcaklığında garter yayından kaynaklanan basınç hariç dudak basıncı ilk bir saatlik çalışma sonucunda %15-35 ikinci saatte %25-40 azalır. Nitril butadien kauçukta 100 °C'de %80 azalma görülür [11]. Uzun süre kullanılan keçelerde çapsal yükün sadece garter yayı ile sağlandığı gözlenmiştir. Uç örneklerde dudak teması tamamen yitirebilir ve büyük kaçaklar meydana gelir. Bunu kompanse etmek için garter yayı kullanılır. Yay etkisi olmadığında keçe dönebilir, teması kaybedebilir ve kaçağa sebep olabilir. Bunların yanı sıra garter yayı çapsal rijitliği arttırarak dudağa milin salgısını takip edebilme yeteneği kazandırır.

Garter yayı Şekil 2.15'de görüldüğü gibi kapalı sarımlıdır[8]. Bir başka deyişle yayın iki ucunun birleştirilmesi ile oluşturulur. Yay teli çapı garter yayının istenen basıncı sağlaması için yapılacak tasarımda yola çıkış noktasıdır. Sarım çapının yay teli çapı oranının 5,3:1 oranını geçmemesi önerilir. Aksi halde yay fazla zorlanır.

Yay uçları birleştiğinde yeni bir ölçü ortaya çıkar. Bu ölçü yay yuvasına oturduğuna dudağın iç çapını tayin eder. Montaj sonrası iç çap adı verilen ölçü şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Montaj sonrası iç çap} = \frac{\text{Serbest Uzunluk}}{\pi} - \text{Tel Çapı}$$

Garter yayları genellikle karbon çeliklerinden (AISI 1050-1095) imal edilir. Aşındırıcı ortamlarda ve yüksek sıcaklıklarda ise paslanmaz elik (AISI 302-304) kullanılır.



Şekil 2.15 : Garter yayı.

3. SIZDIRMAZLIK MEKANİZMASI

3.1 Mikro-Sızdırmazlık Mekanizması

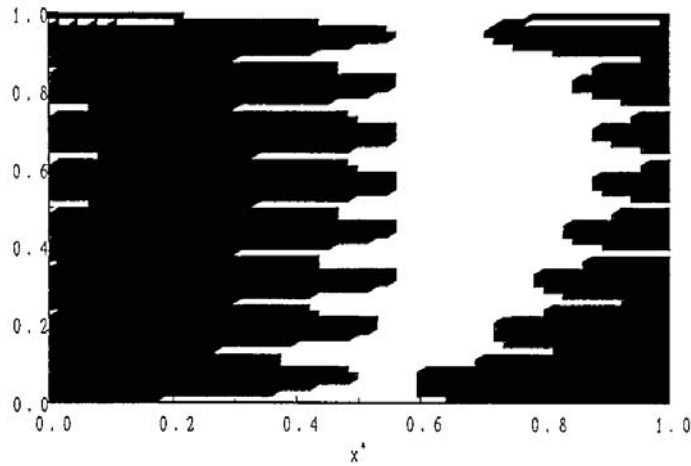
Sızdırmazlık mekanizması 1960'lı yıllardan beri çalışıldığı halde henüz tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Fakat konu üzerinde yapılan deneysel çalışmalar esnasında sızdırmazlık elemanının hava tarafına bir miktar yağ konulduğunda bir zaman sonra kaybolarak yağ tarafına geçtiği görülmüştür. Daha da ileri gidilerek 80 mm çapındaki bir milin yaklaşık 0,03 ml hacminde 1 damla yağı 1000 devirde yağ tarafına pompaladığı gözlenmiştir. Çalışmanın bir sonraki adımında ise dudak geometrisini belirleyen α ve β açılarının birbirine eşit olduğu durum incelenmiş, deney hacminde yağ tarafına doğru herhangi bir hareket gözlenmemiştir. Sonuç olarak sızdırmazlık mekanizmasının çalışması için bu açıların belirli aralıklar içerisinde seçilmesi gerektiği görülmüştür [12].

Reynolds denklemlerine göre birbirine paralel çalışan iki yüzey arasında sürekli bir yağ filmi oluşumu gözlenmemesi gerekir. Fakat dönel sızdırmazlık elemanlarında bunun aksine, dudakla mil arasında alıştırma evresindeki kuru sürtünme sonrasında mikron mertebesinde film oluşumu gözlenir. Bu yağ filmi dudaktaki aşırı sürtünme sebebiyle açığa çıkacak ısıyı ve dudak ile milin temas bölgesindeki gerilmelerin limitleri aşmasını engeller. Yağ filmi beraberinde iki soruyu da ortaya çıkarmaktadır. Dudağı çapsal yüke rağmen milden ayırarak yağ filmini oluşturan yük kaldırma mekanizmasının nasıl oluştuğu ve klasik hidrodinamik ve yatak teorisine göre yağ filminin oluştuğu durumlarda eksenel yönde yağ kaçağının görülmesi beklenirken, sızdırmazlığın nasıl sağlandığı, bu yağ filminden nasıl yağ kaçağının olmadığı soruları cevaplanmaya çalışılacaktır.

Yapılan deneyler ve analizler yük kaldırma mekanizmasıyla sızdırmazlık mekanizmasının dudak yüzeyindeki pürüzler ile yakından ilgili olduğunu göstermiştir [13]. Kullanılmamış bir dönel sızdırmazlık elemanının yüzeyi oldukça pürüzsüz olmasına rağmen alıştırma süresinin sonunda dudak ve mil arasındaki temas bölgesinde yeterli sayıda pürüz oluşur [14]. Dudak yüzeyindeki bu pürüzler hava

tarafından yağ tarafına tersine pompalama yaparak, yağın sızdırmazlık elemanının yağ tarafından hava tarafına geçmesine mani olur [15]. Dinamik şartlar altında elastomer dudak yüzeyindeki pürüzler çapsal yük sebebiyle yüzeyde oluşan kayma gerilmesinden dolayı çevresel yönde uzar. Milin dönmesiyle yağ bu pürüzlere dolar, akış eksenel yönde gerçekleşir [16]. Eğer temas yüzeyindeki maksimum kayma gerilmesinin görüldüğü nokta bir başka değişle basınç dağılımını gösteren eğrinin tepe noktası yağ tarafına daha yakınsa sızdırmazlık elemanı işlevini yerine getirebilir. Hava tarafındaki basınç daha fazla olacağı için hava tarafından yağ tarafına tersine pompalama görülür ve kaçak önlenir.

Yağ filmini oluşturan etkenlerden biri yukarıda bahsi geçen kayma gerilmesi ve sebep olduğu mikropompalama iken diğer etken ise yakın zamanda [17] ortaya atılan pürüz arası kavitasyondur. Ortalama film kalınlığında az miktarda dahi olsa değişim gözlenmesi durumunda basınçta gradyen oluşur. Bu da mikropompalama mekanizmasını olumlu yönde etkiler. Salantın çalışmasında [18] aşağıda Şekil 3.1’de belirli çalışma koşullarında sızdırmazlık mekanizmasının çalıştığı dudak kesitinde oluşan kavitasyon bölgelerini gösteren grafik görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere kavitasyon etkin sızdırmazlık yüzeyinin yaklaşık %50 sinde görülmektedir.



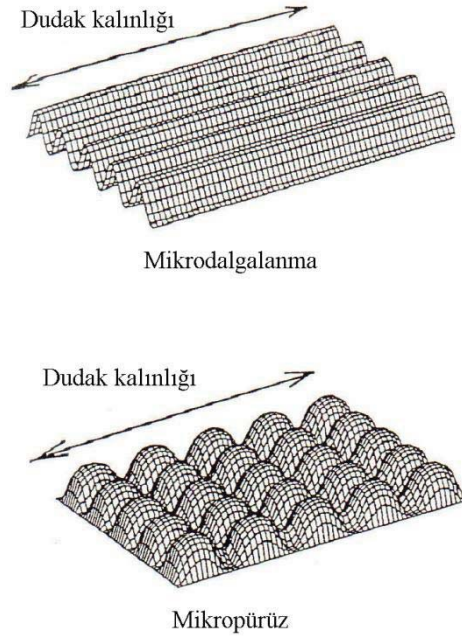
Şekil 3.1 : Dudak kesitinde oluşan kavitasyon bölgeleri.

Kayma gerilmesi sebebiyle mikropürüzlerin pompa gibi davranmasıyla meydana gelen mikropompalama toplam mikro pompalamanın yaklaşık üçte ikisi kadardır. Kavitasyon sebebiyle oluşan mikropompalama da toplam pompalamanın üçte biri kadar olur [18].

Çalışmanın bu kısmında mikro sızdırmazlık mekanizmalarında etkili olan tasarım parametrelerine, her bir parametrenin sızdırmazlığa ne çeşit bir katkı sağladığına ve mekanizmanın prensiplerine değinilecektir.

3.1.1 Sızdırmazlık elemanının yüzeyi

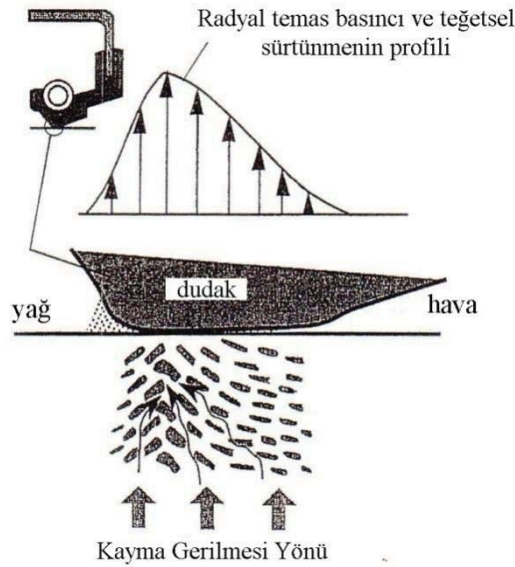
Uygun elastomer seçimi ile imal edilmiş dudaklı sızdırmazlık elemanının yüzeyinde yuvaya monte edildikten sonra milin ilk birkaç dönüşünde karakteristik aşınma dokusu (characteristic wear pattern) oluşur [12]. Diğer bir deyişle imalatta kalıptan pürüzsüz yüzeyle çıkan elastomer yüzeyinde alışma süresinde birkaç mikrometre derinliğinde mikroskopta da görülebilen mikrodalgalanma ve mikropürüz oluşumu gözlenir. Şekil 3.2’de mikrodalgalanma ve mikropürüzler şematik olarak görülmektedirler. Mikro dalgalanma mikropompalama mekanizmasında etkili olsa da dudaklı keçelerin az bir kısmında görülen bir özelliktir. Mikropompalamanın esas kaynağı mikropürüzler olarak tanımlanabilir [9]. Bu mikropürüzler daha fazla aşınmaya sebep olmayacak şekilde yağ cepleri oluştururlar. Mil döndükçe, yağ bu cepleri teğetsel yönde kayma gerilmesine maruz bırakır.



Şekil 3.2 : Mikrodalgalanma ve mikropürüz.

Birim genişlikte yaklaşık 8-10 adet mükropürüze raslanır[4]. Dudak temas genişliği hiç kullanılmamış keçeler için 0,1-0,15 mm, 500-1000 saat çalışmış keçeler için 0,2-0,3 mm, abrasif ortamda ise 0,5-0,7 mm arasında olur [12].

Keçe montajı yapıldıktan sonra çapsal yük sebebiyle dudak mil ile temasa geçer ve temas çizgisinde bir basınç oluşumu gözlenir. Dudak profilinde yağ tarafındaki yaklaşma açısı hava tarafındakinden büyük olduğu için ($\alpha > \beta$), oluşan temas basıncı profili asimetrik olur. Aşağıda Şekil 3.3'ten de görüleceği gibi oluşan radyal temas basıncı profilinin maksimum noktası temas bölgesinin yağ tarafına daha yakındır. Milin dönmesi ile temas bölgesinde sürtünme kaynaklı kayma gerilmesi oluşur. Bu kayma gerilmesi de elastomer yüzeyini maksimum teğetsel şekil değişimi ile maksimum radyal temas basıncı çakışacak şekilde deforme eder. Bir başka deyişle teğetsel şekil değişimi dağılımı temas basıncı dağılımını yansıtır.

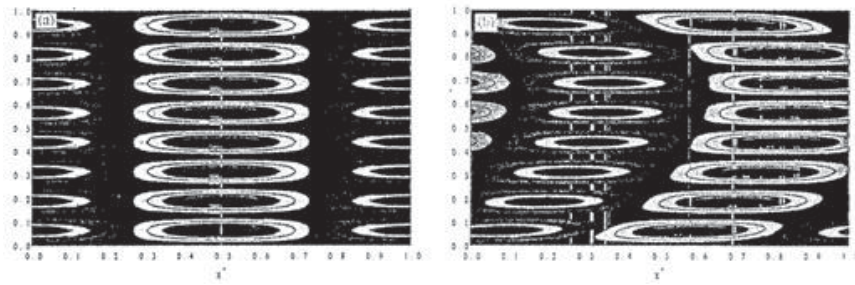


Şekil 3.3 : Radyal temas basıncı ve teğetsel sürtünme profili [12].

Mikroskopik seviyede incelendiğinde Şekil 3.3'te de görüleceği üzere kayma gerilmesi etkisi altında pürüzler maksimum temas basıncının iki tarafında birbirine ters yönlerde deforme olurlar. İçleri yağ dolu olan, birbirlerine göre ters yönlenmiş pürüzler, yağı temas basıncının maksimum olduğu noktaya doğru pompalarlar. Bu yön değiştirici durum karşısında daha sonra da değinilecek olan dudak geometrisi sebebiyle hava tarafında yağ tarafında olduğundan daha fazla deforme olmuş pürüz bulunur. Pompalama kapasitesi de buna bağlı olarak temas çizgisinin iki yanında farklıdır. Böylece kapiler etki ile temas bölgesindeki pürüzlere nüfuz etmiş olan yağ

mikropompalama ile hava tarafından yağ tarafına pompalanır. Böylece klasik hidrodinamik ve yatak teorisine göre yağ filminin oluştuğu durumlarda eksenel yönde yağ kaçağının görülmesi beklenirken, sızdırmazlık mikropompalama ile sağlanmış olur.

Şekil 3.4’de deforme olmamış ve kayma gerilmesi etkisi altında deforme olmuş mikropürüzler görülmektedir [18]. Y-ekseni temas bölgesinin kalınlığını ifade etmektedir Kayma gerilmesi etkisi altındaki mikropürüzler alfa-beta açıları ve garter yayının pozisyonu sebebiyle oluşan asimetrik basınç dağılımının etkisiyle görüldüğü gibi şekil değiştirmektedirler



Şekil 3.4 : Mikropürüzlerin kayma gerilmesi etkisi altındaki görüntüsü.

Pürüz oluşumunun görülmediği dudaklarda mikropompalama görülmeyeceği için yağ kaçağı kaçınılmazdır. Pürüzlerin sızdırmazlığa etkisinin öneminin anlaşılmasından sonraki konu bu pürüzlerin kontrol altında olmayan aşınma ile nasıl daha sistematik bir şekilde elde edileceği olmuştur. Bu, milin üzerine sarılan ince zımpara kağıdı üzerinde dudağın kayması ve pürüzlendirilmesi ile sağlanabilmektedir. Bahsi geçen uygulamada üstün mikropompalama özellikleri saptanabilmektedir[12].

Çeşitli araştırmacılar bu mikropürüzlerin düzgün dağılmış sinüsoidler olarak kabul ederek matematik modellerini Reynolds denklemlerinde sonlu farklar metodu ile çözmüş, yağ filmindeki basınç dağılımını elde etmişlerdir [4]. Çeşitli analizler yardımıyla yağ filmi kalınlığı, sürtünme momenti, yük kaldırma mekanizması ile ilgili hesaplamalar yapmışlardır[3].

3.1.2 Mil yüzeyi

Mil yüzeyi hem dudağın aşırı aşınmasını engelleyecek kadar pürüzsüz/düzgün, hem de dudakta mikro pompalama mekanizmasını çalıştıracak pürüzleri oluşturacak kadar pürüzlü olmalıdır. Bu durum için Daldırma tipi taşlama tavsiye edilir [12]. Çünkü

daldırma tipi taşlama talaş kaldırma izlerinin mil yüzeyinde sebep olduğu ve dönme yönüne bağlı olarak pompalama yaparak kaçığa sebep olan mikroskopik vida dişlerinin oluşumuna engel olmaktadır [8].

Yönlenmiş mil yüzeyi milin bir vidalı pompa gibi davranmasına sebep olur. Yani yağı, dönüş yönüne göre hava tarafına ya da yağ tarafına doğru pompalar. Bazı durumlarda milin yaptığı pompalamanın debisi tersine pompalamanın etkisini yok edecek boyutlara ulaşabilmektedir. Uç açısı arttıkça milin yapacağı pompalama da artmaktadır; öyle ki bu açı 0.1° 'yi geçtiği takdirde milin pompalama etkisinden ötürü kaçık görüldüğü gözlenmektedir. Bu sebeple Rubber Manufacturers Association 1999 yılında uygun uç açısının yaklaşık 0.05° olduğu açıklamıştır [19].

Mil yüzey pürüzlülüğü (Ra) için önerilen en uygun değer $0,2-0,6 \mu\text{m}$ 'dir (Ra'nin tanımı için ISO 4287/1 e bakılabilir). Milin sertliğinin de C30 ile C45 arasında değişmesi bazı durumlarda ise C55 Rockwell sertliğine gelmesi tavsiye edilir. Mil pürüzleri statik durumdayken yağ depolayarak çalışma başlangıcında (start up) yağ filmi oluşumuna etki eder. Aışma sırasında dudakta mikropürüz oluşumunu sağlar. Yağ filminin hidrodinamik ve elastohidrodinamik özellikleri sebebiyle yük kaldırma mekanizması ve sızdırmazlık mekanizmasında etkili olur [20].

Yağ filmi hem pompalama mekanizmasının çalışmasını sağlar hem de sürtünme ısını ve aşınmayı azaltır. Yağ filminin kırılmaması keçenin sağlıklı çalışması için gereklidir. Milin yüzey kalitesi yağ filminin sürekliliği sebebiyle önem kazanmaktadır. Mil yüzeyindeki çizikler ya da yüzey hataları yerel olarak yağ filminin kalınlaşmasına kırılmasına ve sonuç olarak da yağ kaçığına sebep olurlar. Yüzey pürüzlülüğü değerinin yüksek olması mil yüzeyindeki tepe noktalarının yağ filmini yırtarak dudak ile kuru temas yapmasına sonuç olarak da ısınma ve aşınmaya yol açar. İstenen değerlerden daha iyi yüzey kalitesi yani yüzey pürüzü değerinin istenenden düşük olması halinde ise yağ filminin tutunması için gözenek bırakmayacağından sızdırmazlığa olumsuz etki eder. Taşlama ile bitirilmiş yüzey tercih edilmelidir [11].

Yapılan birçok çalışma sonucunda görülmüştür ki mil yüzeyinin işlenmesi dudaklı keçenin performansını hidrodinamik sebeplerle etkilemektedir. Reynolds denkleminin nonlineer olması sebebiyle mil yüzeyindeki ufak dalgalanmalar yağ filmindeki basınç dağılımında, kavitasyon bölgelerinde ve yük mekanizmasında

büyük dalgalanmalara sebep olurlar. Bu dalgalanmalar mil yüzeyi profiline, milin yüzey pürüzlülüğüne (R_a) ve mil hızına bağlıdır. Bunların yanı sıra tersine pompalama aynı zamanda pürüz yönleneme açısına da bağlıdır. Bu çalışma kapsamında milin pürüzlülük değeri (R_a) ve devir sayısının sürtünme momentinin ölçülmesi aracılığıyla keçe performansına etkisi incelenecektir. Çalışma esnasında veriler farklı tip keçeler üzerinden alınacak, belirlenen çalışma gruplarında kıyaslamalar yapılarak farklı keçe makrogeometrilерinin ve çaplarının aynı çalışma koşullarında karşılaştırılması yapılacaktır.

3.1.3 Çapsal yük

Çapsal yük garter yayının meydana getirdiğı yük ile keçe dudağının milin çapından küçük olmasından kaynaklanan sıkı geçmenin meydana getirdiğı yükün toplamına eşittir.

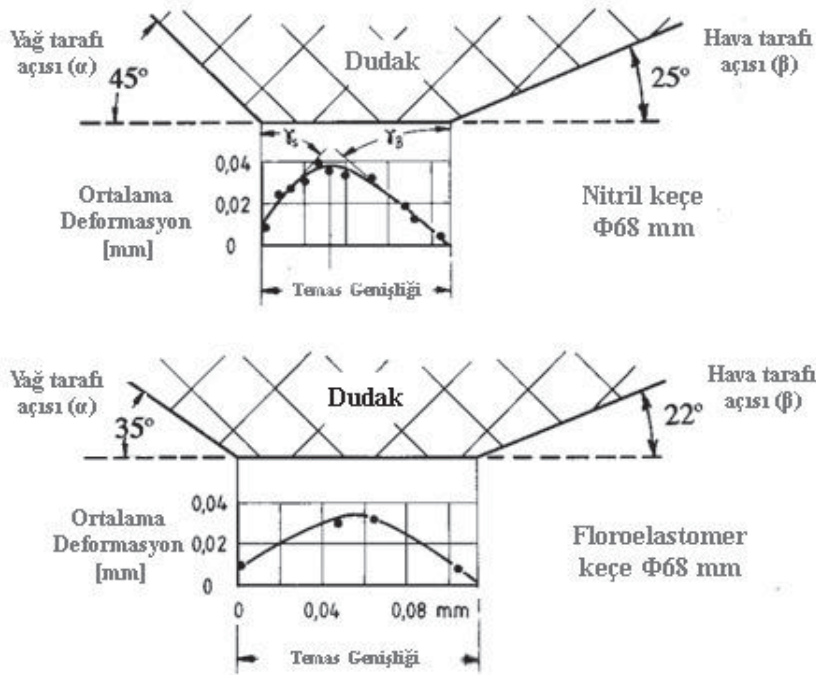
Basit bir dudak sızdırmazlık için yeterli olabilse de, sızdırmazlık keçe ile mil arasında uygun miktarda birim yükün sağlanmasına bağlıdır. Bu yük ön yükleme ve mekanik yay basıncı ile sağlanır[11].

Önceleri mille dudak arasında sızdırmazlığın yüksek radyal temas yükü ile sağlandığı düşünülüyordu. Başka bir deyişle milin çapının dudak çapından büyük olması ve garter yayının dudağı mile iyice bastırması beklenirdi. Ancak yüksek kayma hızlarında aşırı aşınma ve yüksek çalışma sıcaklıklarının görülmesi nedeniyle tasarımın amacı; sızdırmazlığı ve montajda meydana gelebilecek hataların karşılanmasını en az miktardaki çapsal yük ile sağlamaktır. Çapsal yük arttıkça sürtünme dolayısı ile ortaya çıkan ısınma, dudakta sürekli kalıcılık ve yaşlanma artmakta, yay sıcakta genleşen kauçuk ile daha fazla zorlanarak mekanik olarak etkilenmektedir[12]. Elastomer maddelerin çalışma koşulları göz önüne alındığında sıcaklık ve zaman ve yağ cinsinin etkisiyle dudakta plastik şekil değişimi, hacim değişmesi, elastik modülün azalması gibi, dudak çapını arttıran ve çapsal temas yükünü azaltan olaylar gözlenir. Bunu kompanse etmek için garter yayı kullanılır[11]. Çapsal yükün fazla olduğu durumda aşırı ısınma ve aşınma gözlenirken bu değerin düşük olması durumunda ise zaman zaman yağ filminin kırıldığı gözlenir. Sonuç olarak bu çapsal temas yükü, yukarıda da belirtildiğı gibi yağ kaçağı, aşınma, sızdırmazlık ve enerji tüketimi arasında tatmin edici bir dengeyi sağlamalıdır. Uygulamada genel olarak dudağın başlangıçtaki yükünün yarısını

muhafaza etmesi beklenir, bu da ortalama 1 N/mm^2 radyal temas basıncına tekabül eder. Bu da $0,2\text{ N/mm}$ çapsal yüke denk gelir. Yeni keçelerde $0,1-0,15\text{ N/mm}$ kabul edilebilir bir aralıktır. Bu şartlarda 80 mm çapındaki bir keçe mile ortalama $25-40\text{ N}$ civarında bir yük uygular [12].

3.1.4 α, β açıları, basınç farkı

Sızdırmazlık elemanının çalışma esnasında hava tarafına bir miktar yağ bırakıldığında, bir süre sonra bu yağın kaybolarak yağ tarafına geçtiğinin gözlemlendiğine daha önce değinilmişti. Ancak $\alpha=\beta$ durumunda yani dudakın simetrik olduğu durumda herhangi bir pompalama gözlenmez[12]. Buna göre dudakta pompalamaya sebep olan bu geometrik asimetriklik ve bunun sebep olduğu mekanizmalar aşağıda açıklanacaktır.



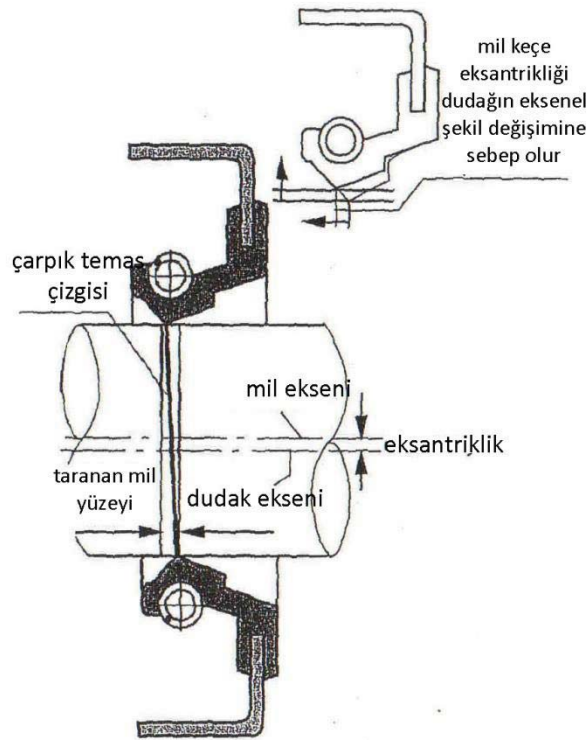
Şekil 3.5 : Kamüller deneyi [21].

Kamüllerin 1986'da yaptığı çalışmasında 68 mm çapında nitril ve florokarbon keçelerin, tam rejim koşullarında 20 dak^{-1} mil hızında yaptığı dört ölçümden ikisi Şekil 3.5'te görülmektedir. Temas bölgesinde teğetsel şekil değişimleri farklı malzemeler ve farklı dudak açıları için şekildeki gibi olmuş, yapılan gözlemlerde ise ilk keçenin tersine pompalama yaparak yağ kaçağını engellediği, ikinci keçenin ise etkin olmadığı, kaçağın gözlemlendiği görülmüştür. Burada deformasyona etki eden değişken parametreler α, β dudak açılarıdır. Deformasyon eğrisinin dolayısıyla

basınç dağılımının tepe noktasının yağ tarafında olması, hava tarafındaki mikropürüzlerin yaptığı pompalamanın basıncının yağ tarafındaki pürüzlerin yarattığı basınçtan daha büyük olmasına sebep olur. Dolayısıyla net pompalama yağ tarafına doğru olur.

3.2 Makro-Sızdırmazlık Mekanizması

Keçenin yuvaya tam oturmaması keçe imalat toleransları gibi sebeplerden ötürü sızdırmazlık elemanının bileziği ile dudağı arasında Şekil 3.6'da görüldüğü gibi açısal bir eksantrisite oluşabilir veya yuva ile milin ekseni paralel olmayabilir.



Şekil 3.6 : Makro-sızdırmazlık mekanizması.

Tüm bu etkilerin sonucu olarak, mil dönerken keçe dudağı mile göre küçük boyutta bir doğrusal hareket yapar. Milin dönme frekansı ile aynı frekansa sahip olan bu hareketin eksenel strok uzunluğu ise açısal eksantrisiteye bağlıdır. Bu durumda da dudak yaklaşma açısının büyük olduğu yöne doğru pompalama görülür. Deneylerde elde edilen verilere göre sızdırmazlık elemanının pompalama debisi keçenin çarpıklığı arttıkça artar. Başka bir deyişle çarpık dudak dönme esnasında daha fazla mil yüzey alanı tarar, bu da daha iyi yağlama ve soğutma ile sonuçlanır. Bu prensiple çalışan WaveSeal™ keçelerde ise dudak temas bölgesi dalga profiline sahiptir. Bu

şekilde oluşturulan çarpıklık etkisi ile hava tarafından yağ tarafına gerçekleşen pompalama ile sızdırmazlık sağlanmaktadır[12].

3.3 Dönel Sızdırmazlık Elemanlarının Performansına Etki Eden Parametreler

Keçelerin çalışma mekanizması yukarıda da değinildiği üzere bir çok parametreye bağlıdır. Mikropompalama için mil pürüzü ve keçede kullanılan elastomerin özellikleri, yağın viskozite, sıcaklık gibi özellikleri, keçenin yerleştirileceği yuvanın özellikleri, basınç, montaj esnasında yapılan hatalar (eksantriklik, keçe bükülmesi) dönel sızdırmazlık elemanının performansını yakından ilgilendirir. Bu bölümde bu parametrelere bağlı olarak sızdırmazlık elemanının performansının nasıl değişeceği incelenecek, keçe ömrünün, sıcaklık ve aşınmanın nasıl etkilendiğine değinilecektir. Bölüm boyunca genel olarak [8,11,12,22] kaynaklarından yararlanılmıştır.

3.3.1 Mil tasarımı

Mil malzemesi için makina yapımında kullanılan çelikler (SAE 1035-1045) uygundur. Ancak mile ısıtılma işlem ve nitrürleme uygulanmalıdır.

Mil yüzey sertliği keçe dudağının temas ettiği bölgede aşınma direnci göz önüne alınırsa Rockwell C30 yeterlidir. Ancak çalışma koşullarında yüzeyin zedelenmemesi için Rockwell C45 önerilen değerdir. Mil yüzey hızının 4m/s den fazla olduğu ya da tozlu veya kirli ortamlarda sertlik en az C55 olmalıdır.

Milin yüzey kalitesi keçe dudağının temas ettiği bölgede torna kalem, taşlama izi olmayacak şekilde olmalıdır. Bunun için nitrürlemeden sonra parlatma gereklidir. Milin üzerinde helis çizikler varsa yönü yağı içeri pompalayacak şekilde olmalıdır. Yüzey hızı arttıkça sızdırmazlık için gerekli yüzey kalitesi de artar.

$$Ra = 0,2 - 0,8 \mu m$$

$$Rt = 0,8 - 3,15 \mu m$$

Mil çapı ölçüsü h11 toleransına göre işlenmelidir [11].

3.3.2 Keçe yuvası tasarımı

Keçenin yuvaya montajı pres geçme ile olmalıdır. Keçe dış çapına uygun yuva ölçüleri DIN 3760'da görülebilir. Yuva için H8 toleransı kullanılır. Ayrıca yuva malzemesinin sıcaklık etkisi ile genişerek kaçığa sebebiyet vermemesi için malzeme seçimi dikkatle yapılmalıdır. Bu konuda dışı kauçuk olan keçeler dışı metal

olanlara nazaran sızdırmazlık açısından daha güvenlidir. Yuva üzerinde uzunlamasına çizgilerin olması kaçak sebebidir. Yuvanın temiz işlenmiş olması bu soruna mani olabilir. Yuva yüzeyi kalitesi ise aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$Ra = 6 - 12 \mu m$$

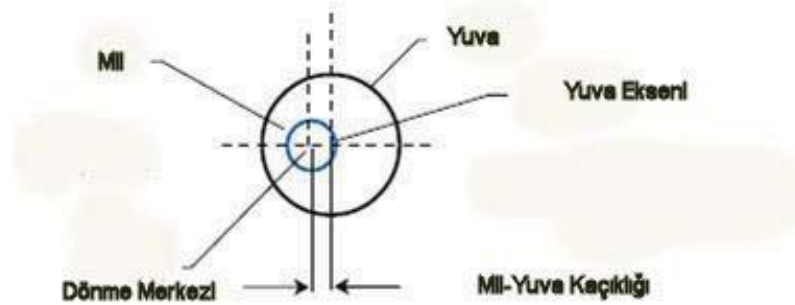
$$Rt = 1,5 - 3 \mu m$$

3.3.3 Yağ sıcaklığı

Dudak sıcaklığı, mil dönme hızı ve yağ sıcaklığı arttıkça artar, dolayısıyla yağ sıcaklığı arttıkça sızdırmazlık elemanının nitril malzemesinin esnek yapısı bozulur, ömrü kısalmır.

3.3.4 Mil-yuva kaçıklığı (Statik eksantriklik)

Mil- yuva kaçıklığı (Shaft to bore misalignment) keçe eksenini ile yuva ekseninin üst üste gelmemesinden kaynaklanan kaçıklıktır. Sebebi genellikle imalat ve montaj hatalarıdır. Bu değerin 0,25 mm veya daha az olması iyi performans için gereklidir.



Şekil 3.7 : Statik eksantriklik.

Mil ve yuva arasındaki eksen kaçıklığı temas basıncının düzgün olmayan dağılımına sebep olur. Buna göre sızdırmazlık elemanının bir yanında aşırı basınç oluşurken diğer yanında ise basıncın azaldığı kimi durumlarda ise yağ filminin koptuğu görülmektedir. Yukarıda Şekil 3.7’de mil yuva eksen kaçıklığı gösterilmektedir [10].

3.3.5 Dinamik eksantriklik

Dinamik kaçıklık (dynamic run out) milin sızdırmazlıkta etkin olan yüzeyinin mil ekseninde dönmemesi halidir. Montaj ve imalat kusurları, milin eğilmesi, milin dengelenmemiş olması gibi sebeplerle ortaya çıkar. Bir başka deyişle dinamik

Çizelge 3.1 : Eksantriklik limitleri[22]

Mil Hızı (d/d)	Maksimum Toplam Kaçıklık (mm) (Mil -Yuva Kaçıklığı + Dinamik Kaçıklık)
100	0,635
200	0,508
500	0,457
1000	0,381
1500	0,330
2000	0,254
2500	0,229
3000	0,203
4000	0,178

3.3.6 Açısal kaçıklık

Montaj sonrasında dönel sızdırmazlık elemanının arka yüzeyinin mil eksenine göre dik olmaması durumudur. Açısal kaçıklık (angular misalignment) ya da keçe bükülmesi (seal cocking) olarak adlandırılır. Daha önce makropompalama mekanizması konusunda bu duruma değinilmiştir. Bu açısal kaçıklık bir çevrimlik dalgalanma meydana getirerek sızdırmazlık elemanının pompalama özelliğini artırır. Açısal kaçıklığın bir değerden sonra keçede bozulma ve yağ kaçağına sebebiyet verdiği gözlenir.

3.3.7 Yağlayıcı

Kullanılan yeni yağlar performans iyileştirici katkı maddeleri içerirler. Ancak bu katkı maddeleri performans iyileştirici özelliklerinin yanı sıra keçenin elastik bölgesiyle etkileşime girerek disülfat katkılarda olduğu gibi elastomerin sertleşmesine sebep olabilmektedir. Buna göre sızdırmazlık elemanının seçimi kullanılacak yağlayıcı göz ardı edilerek yapılamaz. Yağ viskozitesinin azalmasıyla sürtünme azalır ve harcanan güç azalır.

3.3.8 Yağ seviyesi

Dudaklı sızdırmazlık elemanı hiçbir koşulda kuru sürtünmeye maruz bırakılmamalıdır. Aksi halde yüksek aşınma ya da tutma bırakma (stick-slip) gözlenir. Her iki durum da aşırı ısınmaya sebebiyet vererek dönel sızdırmazlık

elemanının işlevini yerine getiremeyecek bir hal almasına neden olur. Yağ aşınma ve sürtünme sebebiyle açığa çıkan ısıнын uzaklaştırılmasını sağlar. Buna bağlı olarak, yağ seviyesi azaldıkça keçe yeterince soğutulamadığından ömrü kısalmır. Milin içinde döndüğü yağ düzeyi ısıнын dağılılabılme koşulunu belirler. Mil en üst noktasına kadar yağ içindeyse oluşan ısı uzaklaşamaz ve ortam sıcaklığı yükselir. Isıнын en iyi şekilde dağıldığı ve belirli bir mil hızında en düşük sıcaklık milin %25'i yağ içinde iken gözlenmiştir [11].

3.3.9 Titreşim

Yüksek devirlerde ve ağır koşullar altında çalışan keçenin mildeki titreşimlere uyum gösterebilmesi için dudağın esnek olması gerekir.

3.3.10 Basınç

Standart keçeler ve keçe malzemeleri yüksek basınçlara ve hızlara uygun değildir. Yüksek basınç hava tarafındaki dudağı mile bastırır ve aşırı aşınma ve ısı üretimine sebep olur. Basınçtaki artış keçe ömrünü azaltır. Yüksek basınç uygulamaları için farklı tip tasarımlar ortaya konulmuştur[23]. Genel olarak basıncın 0.5 bar'dan yüksek olduğu ortamlarda basınç keçeleri kullanılır. Tasarımına bağlı olmakla beraber basınç keçeleri 5 bar'a kadar olan basınçlarda çalışabilirler.

3.3.11 Çevreden gelen kirlenici maddeler ve toz dudağı

Keçe ömrü su, toz, çamur gibi dışarıdan gelecek kirlenici maddelerden olumsuz etkilenir. Bunlar dudak üzerinde çatlak ya da aşınma izi oluşumu gibi etkiler yaratarak yağ filminde kopukluklar olmasına ya da ani basınç değişikliklerine sebep olabilirler. Bu aynı zamanda mikropompalama etkisini de olumsuz etkileyerek kaçak sebebi olabilmektedir. Bunun yanı sıra keçeden geçip soğutma yağına karışan tanecikler , yatak, dişli ve diğer makine bileşenlerine zarar verebilmektedir. Bu nedenle kirli çalışma ortamları için toz dudaklı keçeler kullanılmaktadır. Çift dudaklı keçelerde ana dudakta yüksek aşınma gözlenmemesine rağmen iki dudağın arasında biriken toz, mil üzerinde ağır aşınmaya sebep olmaktadır. Buna göre tek dudaklı keçelerin ömrü arada toz birikmesi görülmediği için çift dudaklılara göre daha fazla olur. Bu sebeple iki dudaklı keçelerde ikinci dudağın mile temas etmemesi (mil çapından 0.20-0.50 mm fazla) arada toz birikmesine mani olacağından çalışma durumunu iyileştirecektir.

3.3.12 Garter yayı kuvveti ve R değeri

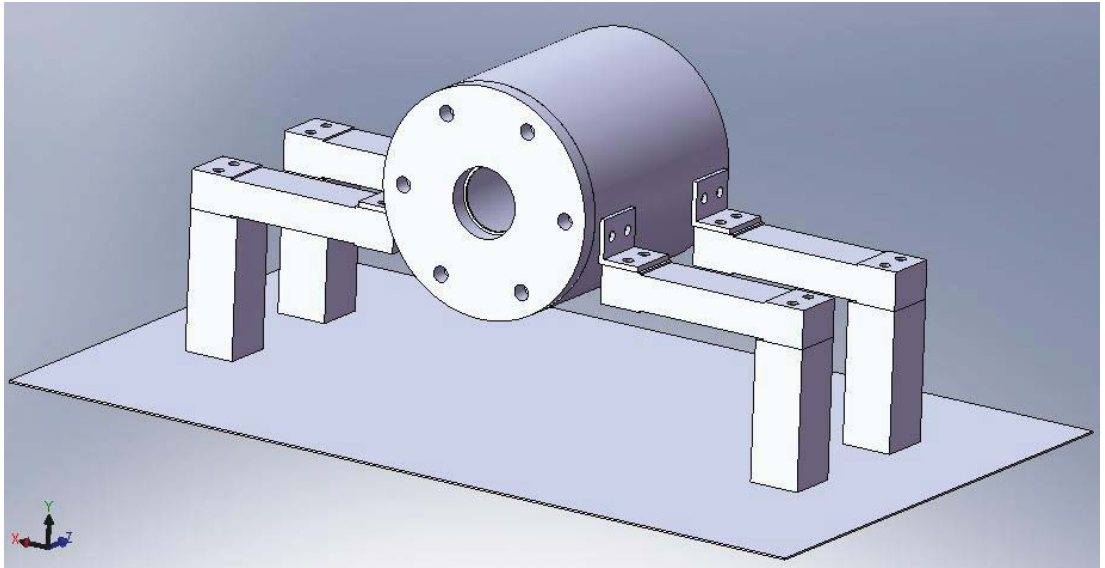
Garter yayı elastomer malzemede zaman ve sıcaklık etkisiyle ve kimyasal reaksiyonlarla meydana gelen gevşemeyi kompanse etmek için kullanılır. Keçe güvenilirliğini artırır ve ömrünü uzatır. Yay yükünün artmasıyla dudak gerilimi, sürtünme momenti artar, güç tüketimi artar. Yay kullanılmadan keçenin ömrü en az 500 saat civarındadır. En uygun yay kuvveti aşırı sürtünme momentine sebep olmayarak sızdırmazlığı sağlayacak kuvvettir. Bu değerden yüksek yay kuvveti fazla aşınma ve ısıya sebep olarak ömrü azaltır.

R değeri dudak temas noktası ile yay eksenindeki mesafedir. Yay eksen çizgisi hava tarafında ise R değeri pozitif, yağ tarafında ise negatiftir. R değeri pozitifse yay pozisyonu dudak sıcaklığına, sürtünme momentine, güç tüketimine etki etmez. R değerini 0 ile 0.75 mm arasında arttırmak keçe ömrünü uzatmaz. Ancak negatif olursa yağ kaçağı görülür.

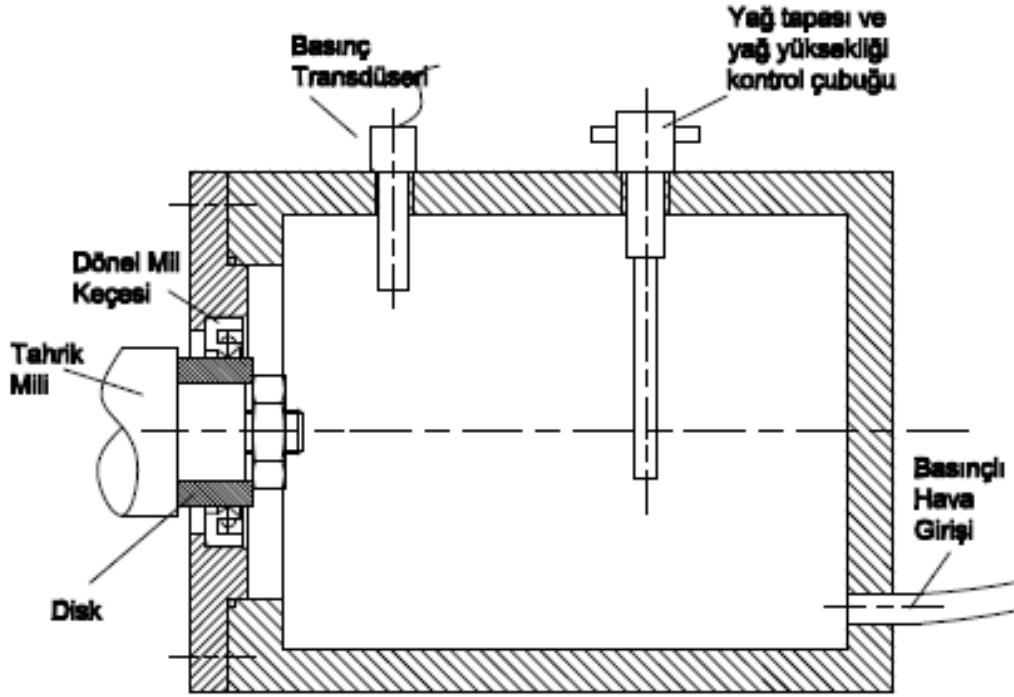
4. DENEY TESİSATI VE DENEYİN YAPILIŞI

4.1 Deney Tesisatı

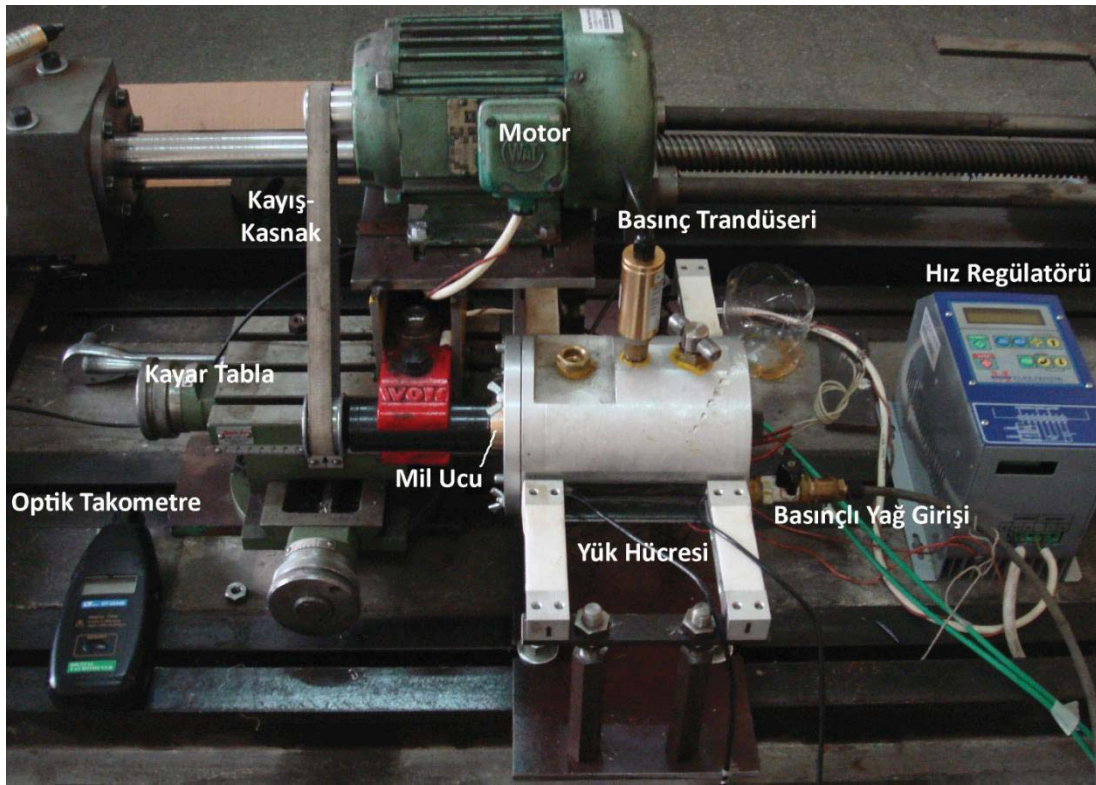
Dönel dudaklı sızdırmazlık elemanlarının performansına dudak geometrisi ve mil yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.1’de şematik resmi Şekil4.2’de prensip şeması Şekil 4.3’te ise genel görünüşü verilen deney düzeneği tasarlanmıştır. Tablaya bağlı mil ucu kapağın içindeki keçenin içine doğru itilerek montaj tamamlanır ve motor ile tahrik verilir.



Şekil 4.1 : Deney tesisatının şematik görünüşü.



Şekil 4.2 : Deney tesisatının prensip şeması.



Şekil 4.3 : Deney tesisatının genel görünüşü.

Deney düzeneği standart ömür testinden yola çıkılarak tasarlanmıştır. Dalma tipi yağlama esas alınmıştır. Düzenekte iç basınç 0,5 bardır. Sistemde, yüksek performanslı endüstriyel dişli yağı kullanılmıştır. Yağın viskozitesi ISO

standartlarına göre (ISO 12925-1) 150 cSt' dir. Tedarik edilen yağın fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. Tüm deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır.

Çizelge 4.1 : Yağın fiziksel özellikleri

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

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi silindir blok 4 adet yük hücresi monte edilerek keçenin çalışması esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti ölçülmüş, buradan da sürtünme momentine geçilmiştir. Yük hücrelerinden elde edilen veriler dört kanallı veri toplama cihazından bilgisayara aktarılmış veri işleme sürecinin ardından grafiklerde zamana bağlı moment değişimi elde edilmiştir.

Sistem, bir doğru akım motoru ile tahrik edilmektedir. Hızı 0...1500d/d arasında ayar edilebilmektedir. Motor mil kayış-kasnak mekanizması ile bağlanmıştır. Mil devir sayısı optik bir takometre ile ölçülmektedir. İçerisinde yağ ihtiva edecek silindir blok Şekil 4.2' de görüldüğü gibi bir gövde ve kapaktan oluşmaktadır. Kapaktaki yuvaya test edilecek radyal dudaklı keçeler monte edilmektedir. Kapak ile blok gövdesi arasına yağ kaçağı olmaması için bir O-ring yerleştirilmiştir. Gövde üzerine yerleştirilen % 2 hassasiyetinde ve 0 ile 2 bar arasında ölçüm yapabilen basınç transdüseri ile gövde içindeki basıncın değeri izlenebilmektedir.

4.1.1 Mil

Deneylerde kullanılan 30,35 ve 40 mm çaplarındaki mil uçları üç farklı yüzey pürüzlülüğünde taşlanarak hazırlanmışlardır. Seçilen yüzey pürüzlülükleri standartlarda [25] önerilen değerlerden (0,2-0,6 µm) ilki daha düşük ikincisi bu değerler aralığında sonuncusu ise bu değerlerden daha yüksek olacak şekilde seçilmiş, imalatla bu değerler tam tutturulamasa da bunlara en yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Son yüzey işlemleri yapılan disklerin yüzey pürüzlülük değeri ölçümleri Mahr marka cihazla gerçekleştirilmiştir. Disklere alın tarafından radyal dudaklı keçeler takılacağı için montaj sırasında keçenin sızdırmazlıkta aktif

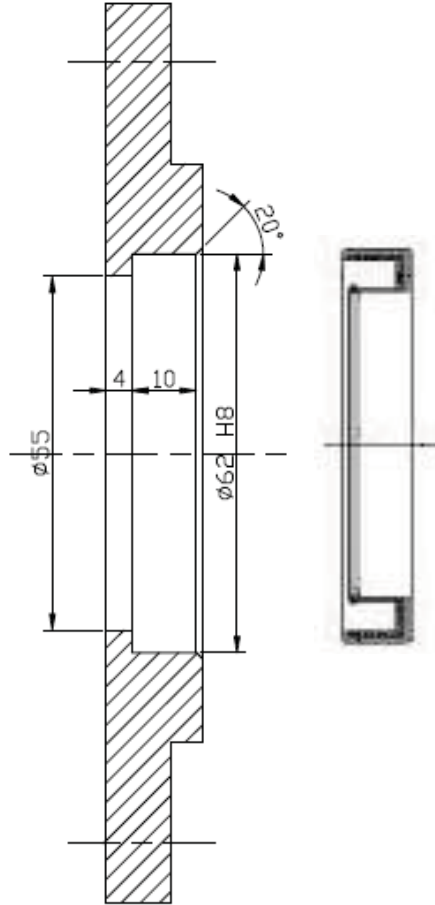
rol oynayacak temas bölgesinin zedelenmemesi için mil ucuna 0,6 mm radyüsler verilmiştir. Mil yüzeyi profilleri EK.B’de görülebilir.

Çizelge 4.2 : Mil uçları için yüzey pürüzlülüğü değerleri(μm)

Çap	Kaba Taşlama	Taşlama	İnce Taşlama
30 mm	1,150	0,719	0,040
35 mm	2,000	1,065	0,030
40 mm	1,550	0,981	0,039

4.1.2 Keçe yuvası-kapak

Seçilen radyal dudaklı keçelerin dış çapı 62 ve 52 mm dir. Keçe yuva toleransı H8 ve yüzey pürüzlülük değeri ise $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ olacak şekilde işlenmiştir. Keçe montajında kolaylık sağlamak için yuva ağzına 20° pah kırılmış, yuvadaki faturaya oturuncaya kadar çakılmıştır. Şekil 4.3'te keçe yuvasının kesit görünüşü bulunmaktadır.

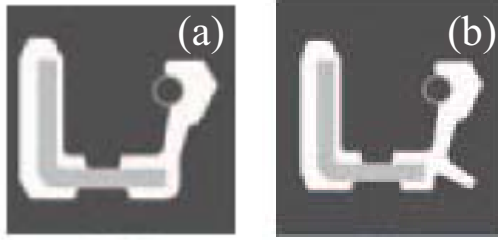


Şekil 4.4 : Kapağın kesit görünüşü

4.2 Deney Şartları ve Deney Numuneleri

Deneyler 18°-20°C ortam sıcaklığında ve %40-50 izafi nem bulunan laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada deneyler iki gruptan oluşmaktadır. Deneylerde öncelikle farklı dudak profiline sahip Profil A ve Profil B keçeleri denenerek makrogeometrinin sürtünme momentine etkileri araştırılmıştır. Her bir dudak profili grubunda 30, 35 ve 40 mm iç çaplarında keçeler denenmiş, böylece her bir çapın sürtünme momenti ile ilişkisi araştırılmıştır. Her bir çap için 3 farklı yüzey pürüzlülüğü ele alınmış ve bu pürüzlülük değerlerinin momenti ne şekilde etkilediği gözlenmiştir. Seçilen mil pürüzleri farklı çevresel hızlarda çalıştırılarak tekrar momentteki değişim gözlenmiştir. Sonuç olarak Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi bir deney matrisi elde edilmiş ve elde edilen verilerden örneğin aynı çapta farklı dudak geometrisindeki moment ya da aynı çapta fakat farklı pürüzlerde ölçülen moment ve yahut farklı çapta aynı pürüzde gözlenen moment gibi çok sayıda çapraz karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.5 : Keçe profilleri.

Şekil 4.5 te deneylerde kullanılan A ve B profilleri görülmektedir. (a)'da dudaksız (b)'de ise dudaklı keçeler görülmektedir [26]. Deneylerde aynı çaplardaki dudaklı ve dudaksız keçelerin çalışma esnasında ortaya çıkardığı momentlerin de kıyası yapılacaktır. A profili (Dudaksız keçeler) 9855-9847-9854 kodlu keçeler iken, B profili (Dudaklı keçeler) 6421-6355-7601 kodlu keçelerdir.

Çizelge 4.3 : Deney Matrisleri

A PROFİLİ – Dudaklı Keçe					B PROFİLİ- Çift Dudaklı				
Yüzey Pürüzlülüğü (µm)		a	b	c	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)		a	b	c
Φ30	0,5 (m/s)				Φ30	0,5 (m/s)			
	1 (m/s)					1 (m/s)			
	3 (m/s)					3 (m/s)			
	5 (m/s)					5 (m/s)			
Φ35	0,5 (m/s)				Φ35	0,5 (m/s)			
	1 (m/s)					1 (m/s)			
	3 (m/s)					3 (m/s)			
	5 (m/s)					5 (m/s)			
Φ40	0,5 (m/s)				Φ40	0,5 (m/s)			
	1 (m/s)					1 (m/s)			
	3 (m/s)					3 (m/s)			
	5 (m/s)					5 (m/s)			

Buna göre her iki grup deney için toplam 54 adet radyal dudaklı yaylı keçe ayrı ayrı denenmiştir. Çizelge 4.5’te deneylerde kullanılan keçe malzemeleri ve çapları verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Keçelerin özellikleri

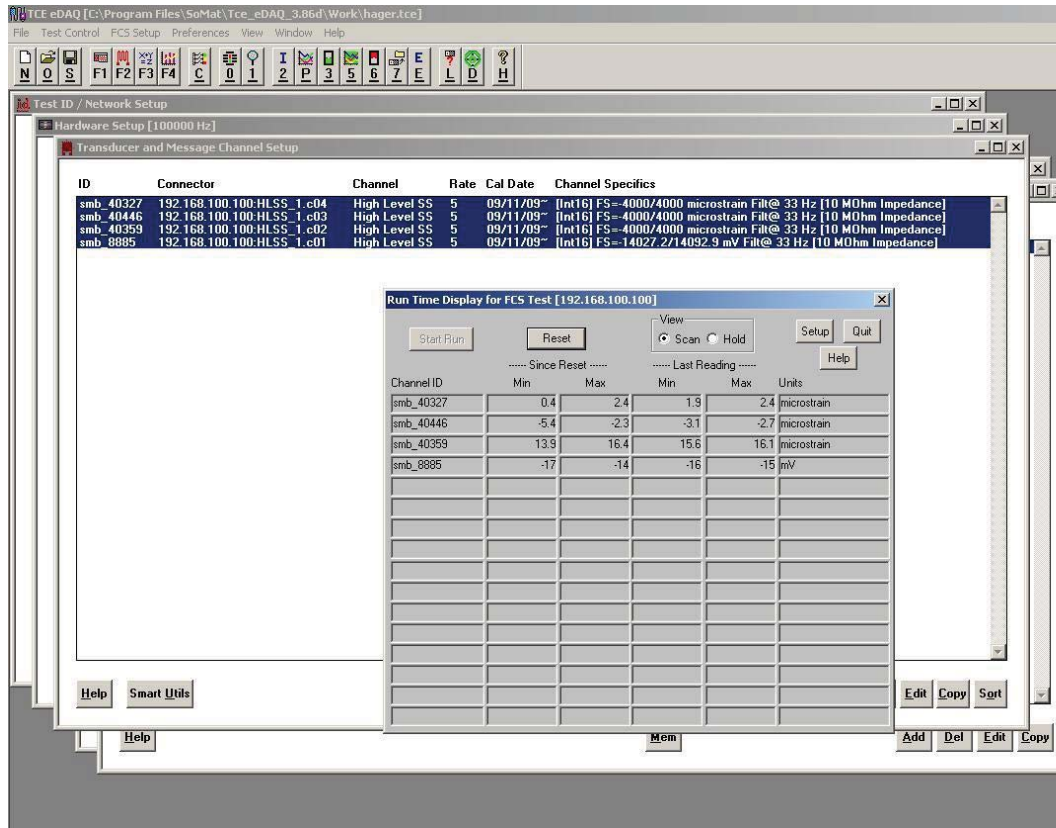
Malzeme	Keçe Kodu	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)
NBR	9854	40	62
NBR	9855	35	52
NBR	6355	30	52
NBR	9847	40	62
NBR	6421	35	52
NBR	7601	30	52

Montaj tamamlanmadan önce bir komparatör yardımı ile ± 0.05 mm hassasiyette diskin eksenel yöndeki kaçıklıkları giderilmeye çalışılmıştır.

4.3 Deneyin Yapılışı

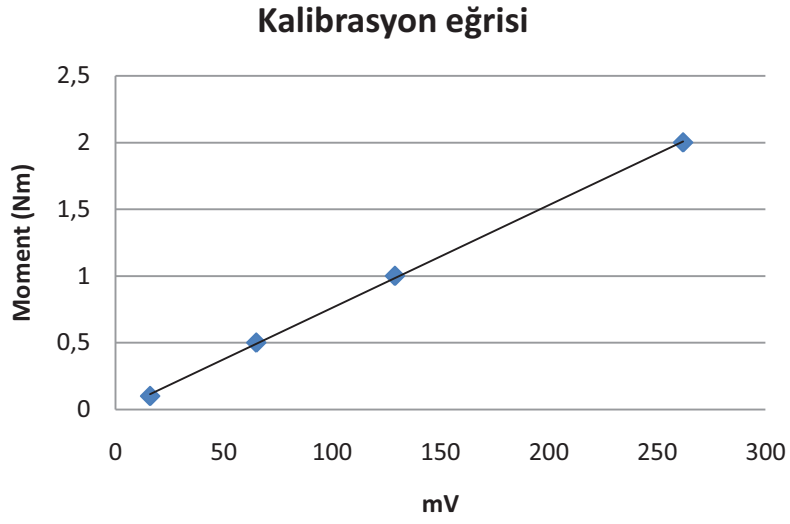
Keçeler yuvaya monte edilmeden önce dış çapı yağlanmış ve kapaktaki yuvaya çakılarak takılmıştır. Kapak silindir bloğuna cıvatalar ile tutturulmuştur. Böylece numune değişimi daha kolay yapılabilir. Keçe dudağı ile mil yüzeyi hafifçe yağlandıktan sonra silindir bloğu kayar tabla ile keçe içerisine doğru itilip keçenin mil ucu ile montajı tamamlanır. Yağ doldurma tıpasından literatürde önerildiği gibi milin %25'i yağ içinde kalacak şekilde yağ doldurulur.

Hız kontrol ünitesi yardımı ile motor hızı istenen devre getirilip sistem çalıştırılır. Deney süresince hız ve basınç sürekli olarak izlenmektedir. Şekil 4.6'da veri toplama yazılımı ara yüzü ve alınan ölçümler görülmektedir.



Şekil 4.6 : Veri toplama.

Aşağıda Şekil 4.7’de kalibrasyon eğrisi görülmektedir. mV cinsinden ölçülen değerlerin Nm cinsinden moment olarak karşılığı görülmektedir.



Şekil 4.7 : Kalibrasyon eğrisi.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Her bir keçede 0,5, 1, 3 ve 5 m/s hızlarda moment ölçümü yapılmıştır.

Çizelge A.1’de Profil A - tek dudaklı keçenin 0,2 μm , 0,9 μm , 1,5 μm pürüzler için 0 ve 0,5 bar basınçlar için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.1’de 0 bar basınçta 40 mm çapındaki keçenin 0,2 μm , 0,9 μm , 1,5 μm pürüzler için karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere referanslarda önerilen aralıktaki 0,9 μm pürüz değerinde en düşük moment değeri gözlenmiştir. En yüksek moment değeri ise en düşük pürüz değeri olan 0,2 μm ’de yapılan ölçümlerde gözlenmiştir. Şekil A.2’de ise aynı keçenin 0,5 bar basınçta okunan değerleri gözlenmektedir. Şekil A.1’deki gibi yine en düşük moment değeri 0,9 μm , en yüksek moment değeri ise 0,2 μm pürüz değerinde gözlenmiştir.

Çizelge A.2’te Profil A - tek dudaklı keçenin 0,03 μm , 1,065 μm , 2 μm pürüzler, 0 ve 0,5 bar basınçlar için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.3’te 0 bar basınçta 35 mm çapındaki keçenin 0,03 μm , 1,065 μm , 2 μm pürüzler için karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere 1,065 μm ve 2 μm pürüzler arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Ölçümler birbirlerine yakın çıkmıştır. Fakat En yüksek moment değeri yine en düşük pürüz değeri olan 0,03 μm ’de yapılan ölçümlerde gözlenmiştir. Şekil A.4’te ise aynı keçenin 0,5 bar basınçta okunan değerlerine bakılarak, en düşük momentin 2 μm pürüz değerinde gözlemlendiği, 0,03 ve 1,065 μm pürüz değerleri için ise nispeten yüksek moment değerlerinin gözlemlendiği söylenebilir.

Çizelge A.3’te Profil A - tek dudaklı keçenin 0,04 μm , 0,719 μm , 1,15 μm pürüzler, 0 ve 0,5 bar basınçlar için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.5’de 0 bar basınçta 30 mm çapındaki keçenin 0,04 μm , 0,719 μm , 1,15 μm pürüzler için karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere en düşük moment değeri 1,15 μm pürüz değerinde gözlenmiştir. En yüksek moment değeri ise 0,719 μm pürüz için gözlenmiştir. Fakat bu grafikte moment değerleri arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Şekil A.6’da ise aynı keçenin 0,5 bar basınçta okunan değerleri gözlenmektedir. Şekil A.8’deki duruma benzer şekilde en düşük

moment değeri 1,15 μm , en yüksek moment değeri ise 0,04 μm pürüz değerinde gözlenmiştir.

Çizelge A.4'te Profil B - çift dudaklı keçenin 0,2 μm , 0,9 μm , 1,5 μm pürüzler, 0 ve 0,5 bar basınçlar için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.7'de 0 bar basınçta 40 mm çapındaki keçenin 0,2 μm , 0,9 μm , 1,5 μm pürüzler için karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere referanslarda önerilen aralıktaki 0,9 μm pürüz değerinde en düşük moment değeri gözlenmiştir. En yüksek moment değeri ise en düşük pürüz değeri olan 0,2 μm 'de yapılan ölçümlerde gözlenmiştir. Şekil A.8'de ise aynı keçenin 0,5 bar basınçta okunan değerleri gözlenmektedir. Şekil A.7'deki gibi yine en düşük moment değeri 0,9 μm , en yüksek moment değeri ise 0,2 μm pürüz değerinde gözlenmiştir.

Çizelge A.5'te Profil B - çift dudaklı keçenin 0,03 μm , 1,065 μm , 2 μm pürüzler, 0 ve 0,5 bar basınçlar için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.9'da 0 bar basınçta 35 mm çapındaki keçenin 0,03 μm , 1,065 μm , 2 μm pürüzler için karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere 1,065 μm ve 0,03 μm pürüzler arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Ölçümler birbirlerine yakın çıkmıştır. En düşük moment değeri 2 μm 'de yapılan ölçümlerde gözlenmiştir. Şekil A.10'da ise aynı keçenin 0,5 bar basınçta okunan değerlerine bakılarak, en düşük momentin 2 μm pürüz değerinde gözlendiği, 1,065 μm pürüz değerleri için ise en yüksek moment değerlerinin gözlendiği söylenebilir.

Çizelge A.6'da Profil B - çift dudaklı keçenin 0,04 μm , 0,719 μm , 1,15 μm pürüzler, 0 ve 0,5 bar basınçlar için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri görülmektedir. Şekil A.11'de 0 bar basınçta 30 mm çapındaki keçenin 0,04 μm , 0,719 μm , 1,15 μm pürüzler için karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere en düşük moment değeri 1,15 μm pürüz değerinde gözlenmiştir. En yüksek moment değeri ise 0,719 μm pürüz için gözlenmiştir. Şekil A.12'da ise aynı keçenin 0,5 bar basınçta okunan değerleri gözlenmektedir. Şekil A.8'deki duruma benzer şekilde en düşük moment değeri 1,15 μm , en yüksek moment değeri ise 0,719 μm pürüz değerinde gözlenmiştir.

Keçe profillerine göre yapılan gruplamalara göre karşılaştırmalar görülebilir. A profili grubunda tek dudaklı keçeler 40, 35 ve 30 mm çaplar için, B profili grubunda

çift dudaklı keçeler yine aynı çaplar için denenmiştir. Her bir karşılaştırma pürüz bazında gerçekleştirmiştir.

40 mm çap için,

Şekil A.13'te 40 mm çap, 0,2 μm pürüz, 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Bu pürüz değeri için B profilli çift dudaklı keçede ölçülen momentin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Şekil A.14 de ise aynı keçeler için 0,5 bar basınçta gözlenen değerler görülmektedir. Düşük hızlarda moment B profilli çift dudaklı keçede daha düşük iken yüksek hızlarda değerler yakın olmakla beraber bu keçede daha yüksek moment gözlendiği görülebilir.

Şekil A.15'de ise 40 mm çap, 0,9 μm pürüz, 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Bu pürüz değeri için B profilli keçede ölçülen momentin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Şekil A.16 de ise aynı keçeler için 0,5 bar basınçta gözlenen değerler görülmektedir. Yine 0 bar basınçta gözlendiği gibi B profilli keçede gözlenen moment değeri daha yüksektir.

Şekil A.17'de 40 mm çap 1,5 μm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Bu pürüz değeri için de B profilli keçede ölçülen momentin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Fakat Şekil A.18'de görüldüğü üzere 0,5 bar basınç söz konusu olduğunda A profilli tek dudaklı keçenin daha yüksek moment oluşumuna sebep olduğu gözlenmektedir.

35 mm çap için,

Şekil A.19'da 35 mm çap 0,03 μm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Bu pürüz değeri için de B profilli çift dudaklı keçede ölçülen momentin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Fakat Şekil A.20'de görüldüğü üzere 0,5 bar basınç söz konusu olduğunda A profilli tek dudaklı keçenin daha yüksek moment oluşumuna sebep olduğu gözlenmektedir.

Şekil A.21'de 35 mm çap 1,065 μm pürüz, 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Diğer pürüz değerinde olduğu gibi B profilli çift dudaklı keçede ölçülen momentin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Ancak diğer pürüzlerin aksine Şekil A.22'de 0,5 bar basınç altında B profilli çift dudaklı keçenin daha yüksek moment oluşumuna sebep olduğu gözlenmiştir.

Şekil A.23’da 35 mm çap 2 µm pürüz, 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Fark çok da belirgin olmamakla beraber, B profilili çift dudaklı keçenin sürtünme moment daha yüksek gözükmemektedir. 0,5 bar basınç için Şekil A.24’e göre fark yine belirgin olmasa da B profilili çift dudaklı keçede daha yüksek moment değerleri gözlenmiştir.

30 mm çap için

Şekil A.25’de 30 mm çap 0,04 µm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. B profilili çift dudaklı keçede ölçülen momentin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. . 0,5 bar basınç için Şekil A.26’ye göre yine B profilili çift dudaklı keçede daha yüksek moment değerleri gözlenmiştir.

Şekil A.27’te 30 mm çap 0,719 µm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. Belirgin bir farkla B profilili çift dudaklı keçede yüksek moment değerleri gözlenmektedir. 0,5 bar basınç için Şekil A.28’ye göre yine B profilili çift dudaklı keçede daha yüksek moment değerleri gözlenmiştir.

Şekil A.29’te 30 mm çap 1,15 µm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri görülmektedir. B profilili çift dudaklı keçede diğer keçeye göre nispeten daha yüksek moment değerleri gözlenmektedir. 0,5 bar basınç için Şekil A.30’a göre yine B profilili çift dudaklı keçede daha yüksek moment değerleri gözlenmiştir.

Muhtelif pürüz değerleri için sürtünme momentinin keçe çapı ile nasıl değiştiğini gösteren grafikler görülebilir. Aynı profil grubundaki keçelerin aynı pürüzde farklı çaplardaki moment değerleri grafiklere yansıtılmaya çalışılacaktır.

Şekil A.31’de 0,2 µm pürüz 0 bar basınç için A Profilinin sürtünme momentleri görülmektedir. 40 mm çapta ölçülen moment değeri en fazla iken 30 mm çap için ölçülen moment değerleri de bu üç çap değerleri içinde gözlenen en düşük değerlerdir. 0,5 bar basınç değeri için ise Şekil A.32’ye göre 0 bar basınç değeri ile aynı durumun gözlemlendiği söylenebilir.

Şekil A.33’te 0,9 µm pürüz 0 bar basınç için A Profilinin sürtünme momentleri görülmektedir. 40 mm çapta ölçülen moment değeri en fazla iken 30 mm çap için ölçülen moment değerleri de bu üç çap değerleri içinde gözlenen en düşük değerlerdir. 0,5 bar basınç değeri için ise Şekil A.34’e göre 0 bar basınç değeri ile aynı durumun gözlemlendiği söylenebilir.

Şekil A.35'te 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için A Profilinin sürtünme momentleri görülmektedir. 40 mm çapta ölçülen moment değeri en fazla iken 30 mm çap için ölçülen moment değerleri de bu üç çap değerleri içinde gözlenen en düşük değerlerdir. 0,5 bar basınç değeri için ise Şekil A.36'e göre 0 bar basınç değeri ile aynı durumun gözleendiği söylenebilir.

Her üç pürüz değeri için de düşük çaplarda (30-35 mm) momentler arasındaki farkların azaldığı söylenebilir.

Şekil A.37'de 0,2 µm pürüz 0 bar basınç için B Profilinin sürtünme momentleri görülmektedir. 40 mm çapta ölçülen moment değeri en fazla iken 30 mm çap için ölçülen moment değerleri de bu üç çap değerleri içinde gözlenen en düşük değerlerdir. 0,5 bar basınç değeri için ise Şekil A.38'e göre 40 mm çap yine en yüksek moment değerinin görüldüğü çap olmakla beraber, en düşük moment 30 mm çapta değil, 35 mm çapta gözlenmiştir.

Şekil A.39'da 0,9 µm pürüz 0 bar basınç için B Profilinin sürtünme momentleri görülmektedir. 40 mm çapta ölçülen moment değeri en fazla iken 35 mm çap için ölçülen moment değerleri de bu üç çap değerleri içinde gözlenen en düşük değerlerdir. 0,5 bar basınç değeri için ise Şekil A.40'a göre momentlerin belirli bir aralıkta değiştiği fakat bunun belirgin bir karakteristik özellik göstermediği söylenebilir.

Şekil A.41'de 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için B Profilinin sürtünme momentleri görülmektedir. 40 mm çapta ölçülen moment değeri en fazla iken 35 mm çap için ölçülen moment değerleri de bu üç çap değerleri içinde gözlenen en düşük değerlerdir. 0,5 bar basınç değeri için ise Şekil A.42'ye göre de en yüksek moment 40 mm çapta en düşük moment ise 35 mm çapta gözlenmiştir.

Yapılan bu deneylerin sonuçlarına bakılarak mil hızının artması ile ölçülen momentin genel olarak arttığı söylenebilir. Toz dudağı olmayan profilde hemen hemen tüm çap ve pürüz değerleri için toz dudaklı profilde gözlenen sürtünme momentleri değerlerinden daha düşük değerler gözlenmiştir. Mil çapının artması ile de sürtünme momentinin arttığı gözlenmiştir. Standartlarda verilen değerler dahilinde seçilmiş yüzey pürüzü değerlerinde genellikle daha düşük moment değerleri gözlenmiştir.

Gerek elastomorik yapısı gerekse garter yayının imalatı ile ilgili sebeplerden ötürü her bir keçede farklı çapsal yükler gözlenir. Bu çapsal yük de sürtünme momenti üzerinde mikropompalamadan daha çok etkiye sahip olduğu için yapılan ölçümlerde bu çapsal yüklerin farklı oluşların etkileri gözönüne alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Salant, F. R., and Woodruff, G. W.**, 2002. Hydrodynamic Effects Of Shaft Surface Finish On Lip Seal Operation. *Tribology Transactions*, **45**, 404-410.
- [2] **Silvestri, M. at all**, 2006. Radial Lip Seals Efficiency Under Dynamic Operating Conditions. *AITC-AIT 2006 International Conference on Tribology*, Parma, Italy, September 20-22.
- [3] **Hadinata P. C., Stephens L. S.**, 2007. Soft Elastohydrodynamic Analysis of Radial Lip Seals with Deterministic Microasperities on the Shaft. *Journal of Tribology*, **129**, 851-859.
- [4] **Shi, F., Salant R. F.**, 2001. Numerical Study of a Rotary Lip Seal with a Quasi-Random Sealing Surface. *Journal of Tribology*, **123**, 517-524.
- [5] **Gawlinsky, M., and Kasprzyk, Z.**, 2003. Shaft Surface Roughness and Its Influence on the wear of the Lip Sealing Edge. *Materials Science*, **9**, 58-61.
- [6] **Kuntsfeld, T., and Haas, W.**, 2005. Shaft Surface Manufacturing Methods for Rotary Shaft Lip Seals. *Sealing Technology*, July 2005, pp. 5-9.
- [7] **Salant, R.F., and Shen, D.**, 2003. Hydrodynamic Effects of Shaft Surface Rooughness on Rotary Lip Seal Behaviour. *Sealing Technology*, June 2005, pp. 5-9.
- [8] **Horve, L. A.**, 1996. Shaft Seals for Dynamic Applications. M. Dekker, New York.
- [9] **Salant, R. F., Flaherty, A. L.**, 1995. Elastohydrodynamic Analysis of Reverse Pumping in Rotary Lip Seals with Microasperities. *Journal of Tribology*, **117**, 53-59.
- [10] <http://www.simritna.com/catalog/RSS.htm>, alındığı tarih 02.11.2009
- [11] **Akgül, H.**, 1986. Sızdırmazlık Elemanları, TMMOB yayın no:120, Bursa.
- [12] **Müller, H., Bernard, S. N.**, 1998. Fluid Sealing Technology: principles and applications. M. Dekker, New York.
- [13] **Salant, R. F.**, 1999. Theory of Lubrication of Elastomeric Rotary Shaft Seals. *IMEchE J. Eng. Tribol.*, **213**, 189-201.
- [14] **Horve, L. A.**, 1991. The Correlation of Rotary Shaft Radial Lip Seal Service Reliability and Pumping Ability to Wear Track Roughness and Microasperity Formation. *SAE International Congress and Exposition*, Detroit,USA
- [15] **Stakenborg, M. J. L.**, 1988. On the Sealing Mechanism of Radial Lip Seals. *Tribology International*, **21**, 335-340.
- [16] **Kawahara, Y. at all**, 1980. An Analysis of Sealinf Characteristics of Oil Seals. *ASLE Trans.*, **23**, 93-102.
- [17] **Shi, F., Salant R. F.**, 2001. A mixed Soft Elastohydrodynamic Lubrication Model with Asperity Cavitation and Surface Shear Deformation. *ASME, J. Tribology*, **122**, 308-316.
- [18] **Salant, R. F.**, 1997. Modelling Rotary Lip Seals. *Wear.*, **207**, 92-99.

- [19] **SAE**, 1996. Fluid Sealing Handbook Radial Lip Seals 1996 Edition. SAE HS-1417, pp.117
- [20] **Shen, D.**, 2005. Deterministic Modeling of a Rotary Lip Seal With Microasperities on the Shaft Surface, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology.
- [21] **Leeuwen H., Wolfert, M.**,1996. The Sealing and Lubrication Principles of Plain Radial Lip Seals: an Experimental Study of Local Tangential Deformations and Film Thickness. *Elastohydrodynamics*.
- [22] **Brink, R. V., Czernik, E., Horve, L. A.**, 1993. Handbook of Fluid Sealing. McGraw-Hill, New York.
- [23] < www.skt.com.tr > . alındığı tarih 02.11.2008

EKLER

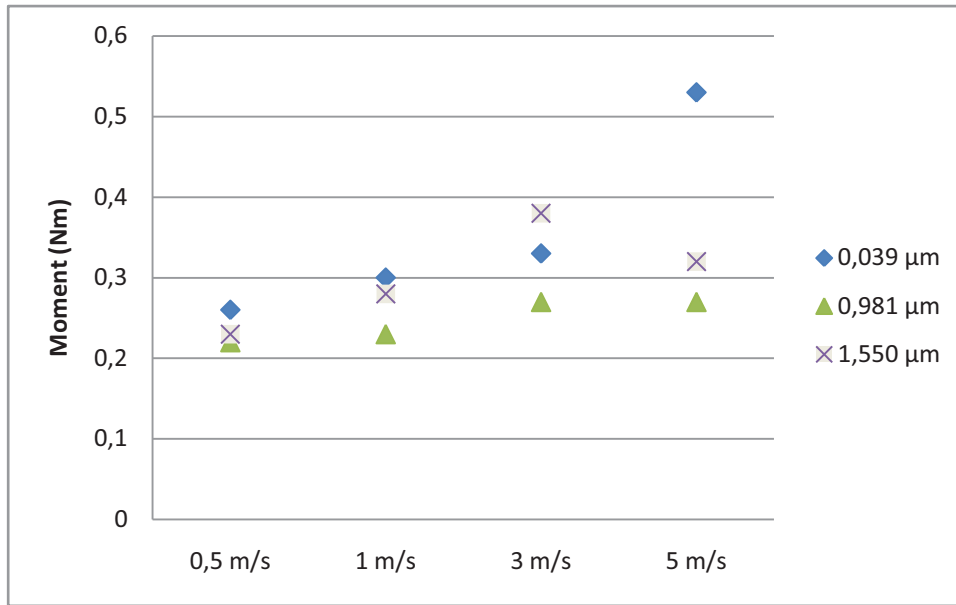
EK A: Moment Değerleri

EK A

Çizelge A.1 : A Profili- $\Phi 40\text{mm}$ çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.

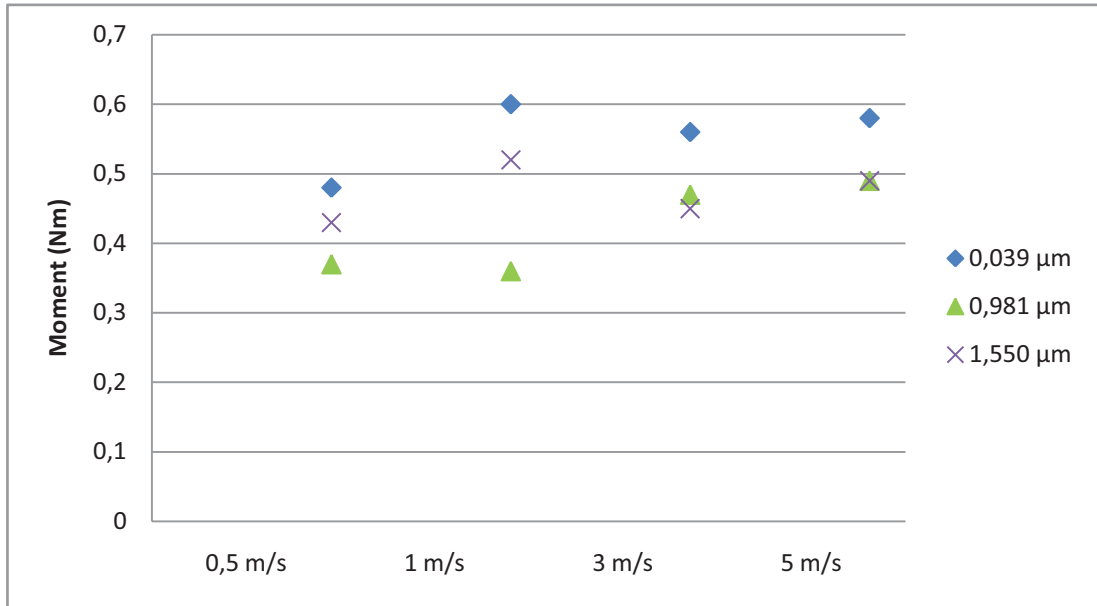
A Profili- $\Phi 40\text{mm}$ $0,039\ \mu\text{m}$ $0,981\ \mu\text{m}$ $1,550\ \mu\text{m}$

0,5 m/s- 0 bar	0,26	0,22	0,23
0,5 m/s- 0,5 bar	0,48	0,37	0,43
1 m/s- 0 bar	0,30	0,23	0,28
1 m/s- 0,5 bar	0,60	0,36	0,52
3 m/s- 0 bar	0,33	0,27	0,38
3 m/s- 0,5 bar	0,56	0,47	0,45
5 m/s- 0 bar	0,53	0,27	0,32
5 m/s- 0,5 bar	0,58	0,49	0,49



Şekil A.1 : A Profili- $\Phi 40\text{mm}$ çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

EK A

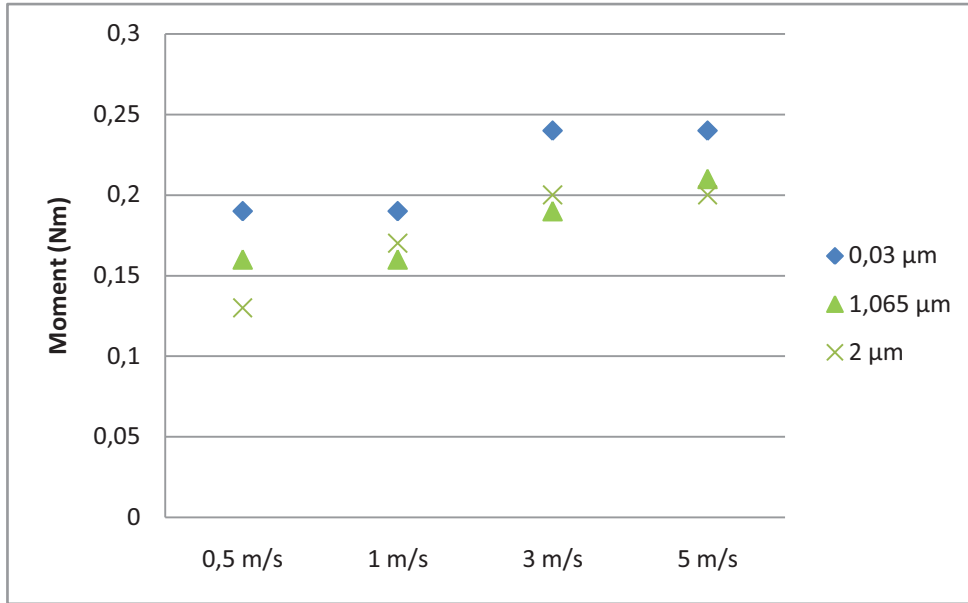


Şekil A.2 : A Profili- $\Phi 40$ mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

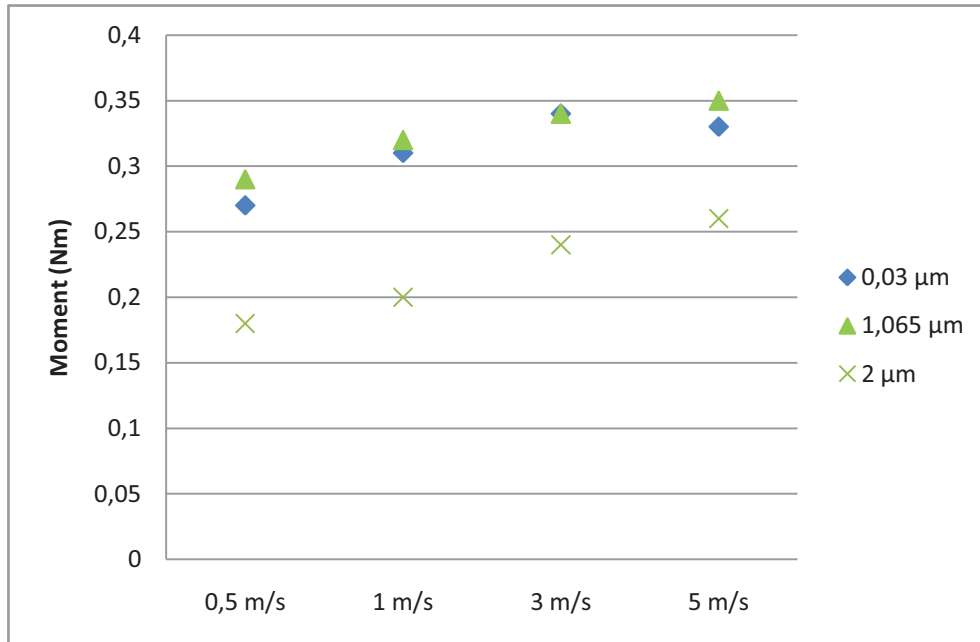
Çizelge A.2 : A Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.

A Profili- $\Phi 35$ mm	0,03 μ m	1,065 μ m	2 μ m
0,5 m/s- 0 bar	0,19	0,16	0,13
0,5 m/s- 0,5 bar	0,27	0,29	0,18
1 m/s- 0 bar	0,19	0,16	0,17
1 m/s- 0,5 bar	0,31	0,32	0,20
3 m/s- 0 bar	0,24	0,19	0,20
3 m/s- 0,5 bar	0,34	0,34	0,24
5 m/s- 0 bar	0,24	0,21	0,20
5 m/s- 0,5 bar	0,33	0,35	0,26

EK A



Şekil A.3 : A Profili-Φ35 mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

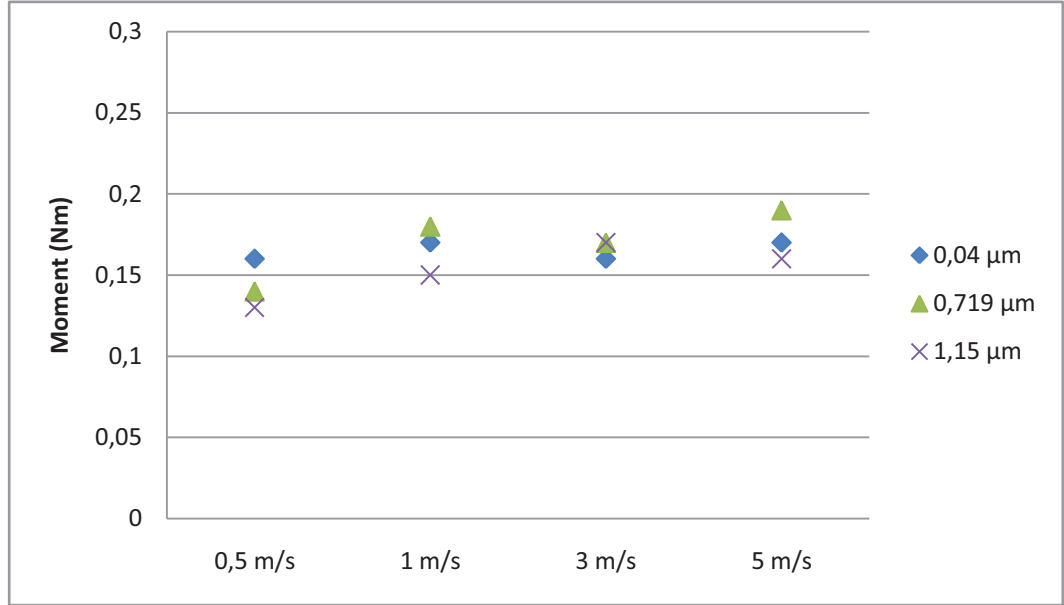


Şekil A.4 : A Profili-Φ35 mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

EK A

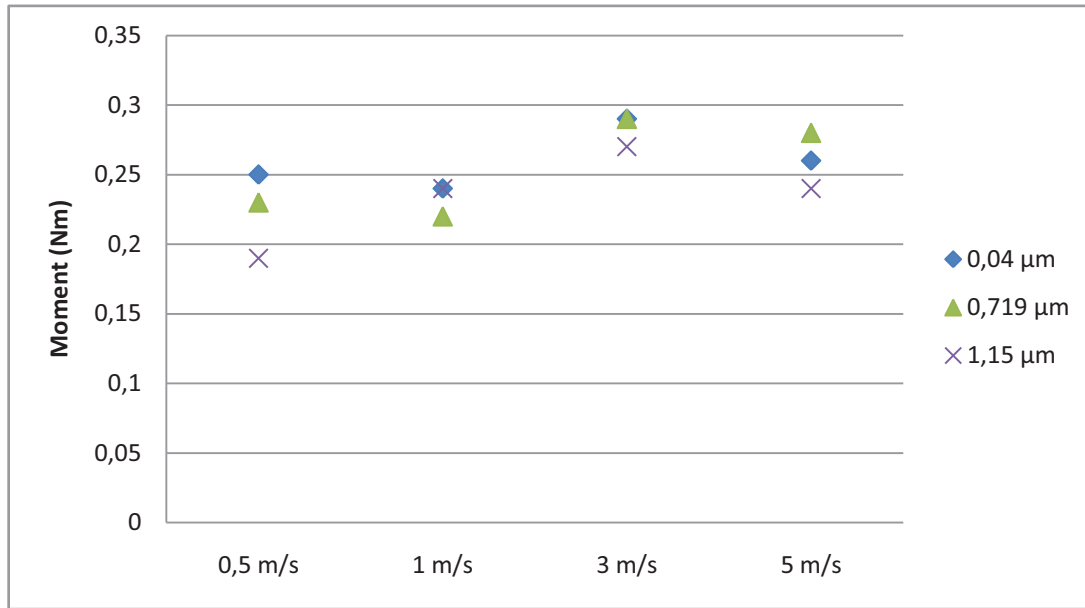
Çizelge A.3 : A Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.

A Profili- $\Phi 30$ mm	0,04 μm	0,719 μm	1,15 μm
0,5 m/s- 0 bar	0,16	0,14	0,13
0,5 m/s- 0,5 bar	0,25	0,23	0,19
1 m/s- 0 bar	0,17	0,18	0,15
1 m/s- 0,5 bar	0,24	0,22	0,24
3 m/s- 0 bar	0,16	0,17	0,17
3 m/s- 0,5 bar	0,29	0,29	0,27
5 m/s- 0 bar	0,17	0,19	0,16
5 m/s- 0,5 bar	0,26	0,28	0,24



Şekil A.5 : A Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

EK A



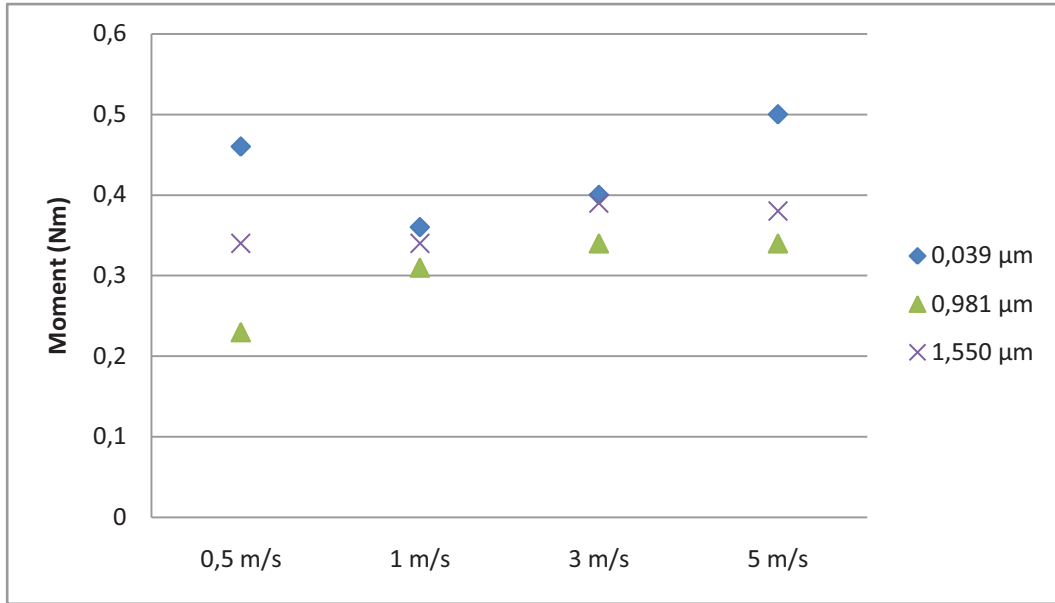
Şekil A.6 : A Profili-Φ30 mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

Çizelge A.4 : B Profili-Φ40 mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme momenti değerleri.

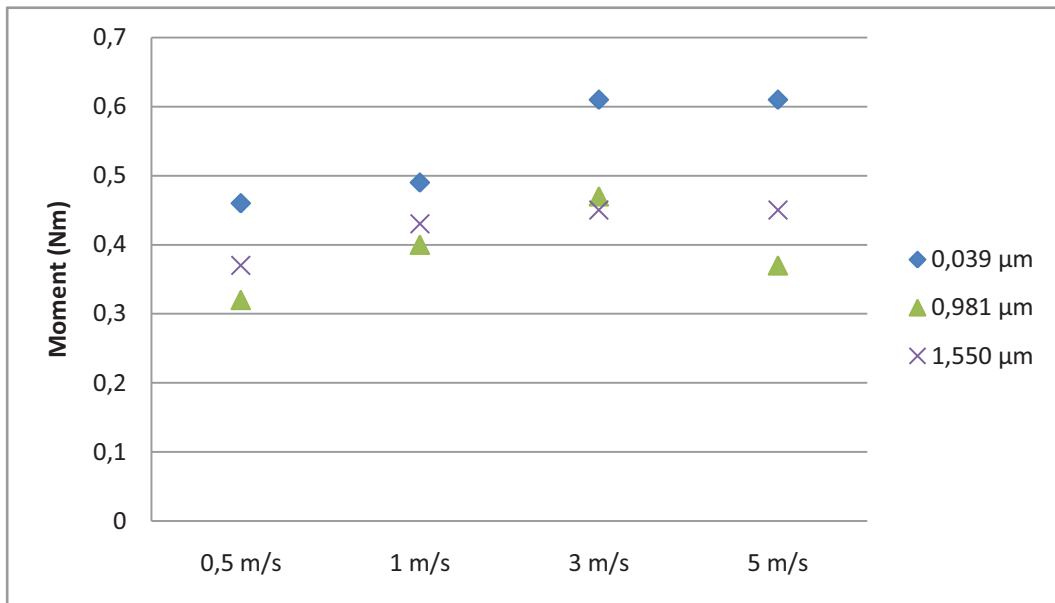
B Profili-Φ40mm 0,039 μm 0,981 μm 1, 550 μm

0,5 m/s- 0 bar	0,46	0,23	0,34
0,5 m/s- 0,5 bar	0,46	0,32	0,37
1 m/s- 0 bar	0,36	0,31	0,34
1 m/s- 0,5 bar	0,49	0,4	0,43
3 m/s- 0 bar	0,4	0,34	0,39
3 m/s- 0,5 bar	0,61	0,47	0,45
5 m/s- 0 bar	0,5	0,34	0,38
5 m/s- 0,5 bar	0,61	0,37	0,45

EK A



Şekil A.7 : B Profili-Φ40 mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

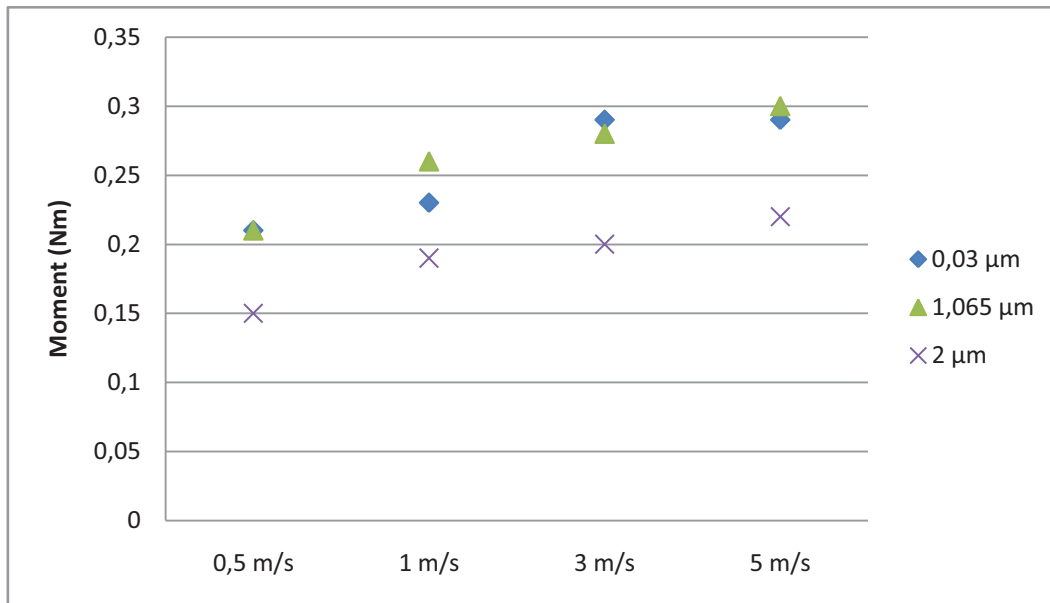


Şekil A.8 : B Profili-Φ40 mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

EK A

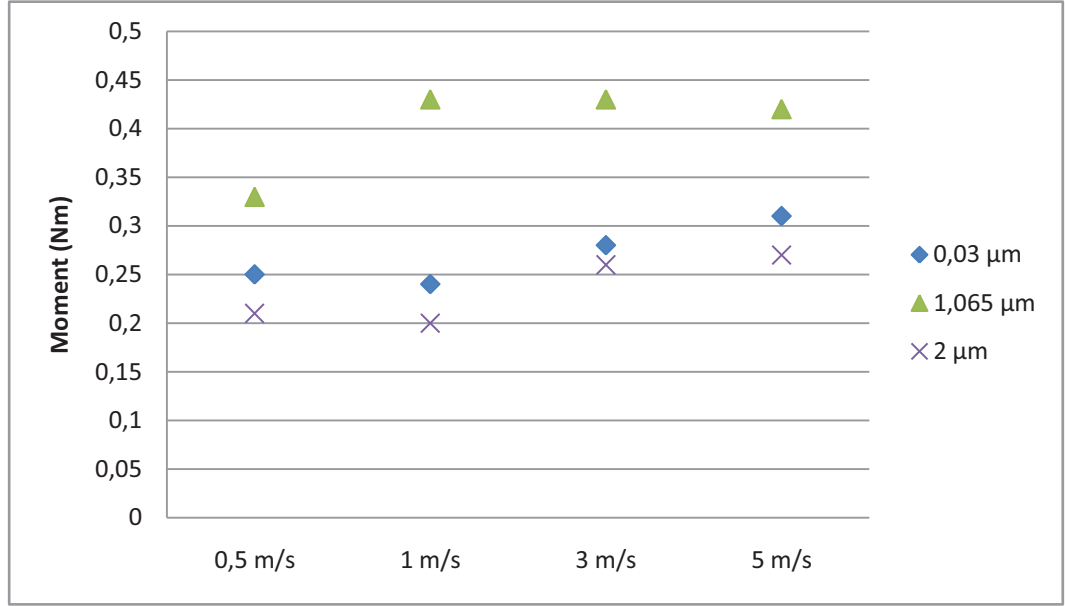
Çizelge A.5 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme moment değerleri.

B Profili- $\Phi 35$ mm	0,03 μm	1,065 μm	2 μm
0,5 m/s- 0 bar	0,21	0,21	0,15
0,5 m/s- 0,5 bar	0,25	0,33	0,21
1 m/s- 0 bar	0,23	0,26	0,19
1 m/s- 0,5 bar	0,24	0,43	0,20
3 m/s- 0 bar	0,27	0,28	0,20
3 m/s- 0,5 bar	0,28	0,43	0,26
5 m/s- 0 bar	0,29	0,30	0,22
5 m/s- 0,5 bar	0,31	0,42	0,27



Şekil A.9 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

EK A

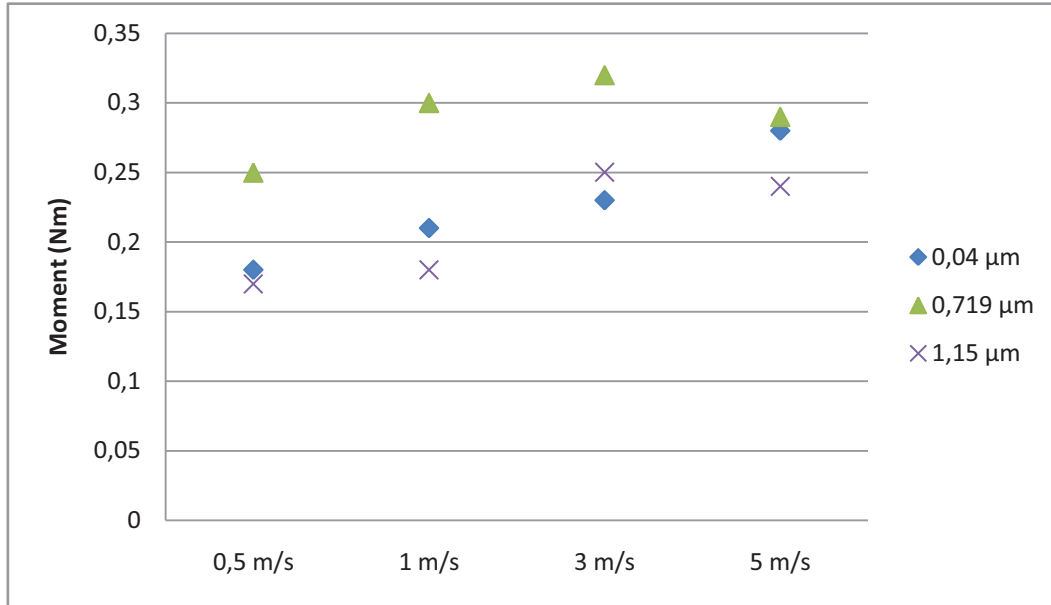


Şekil A.10 : B Profili- $\Phi 35$ mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

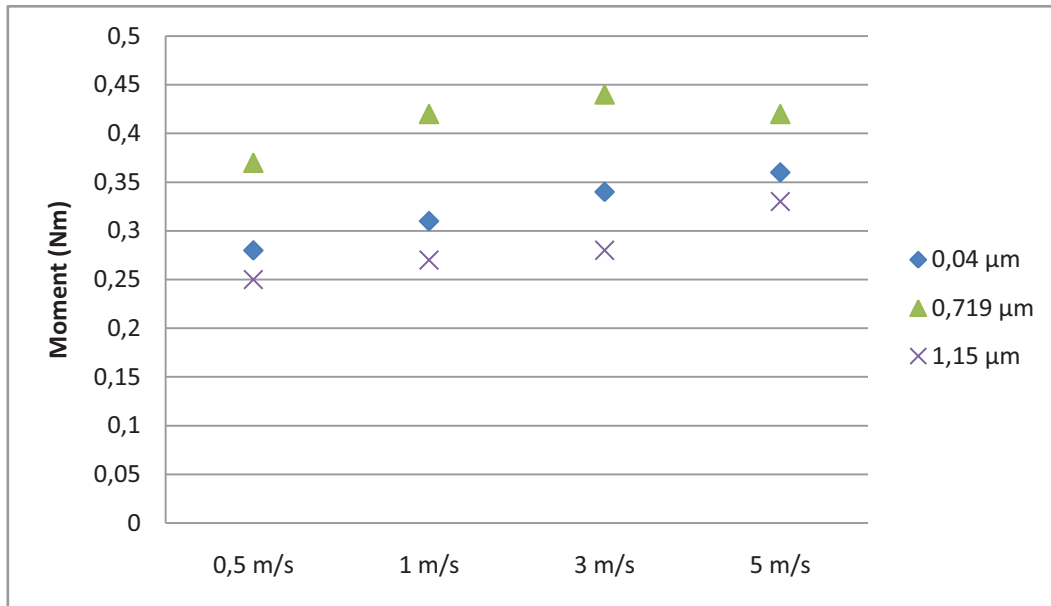
Çizelge A.6 : B Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için Nm cinsinden sürtünme moment değerleri.

B Profili- $\Phi 30$ mm	0,04 µm	0,719 µm	1,15 µm
0,5 m/s- 0 bar	0,18	0,25	0,17
0,5 m/s- 0,5 bar	0,28	0,37	0,25
1 m/s- 0 bar	0,21	0,3	0,18
1 m/s- 0,5 bar	0,31	0,42	0,27
3 m/s- 0 bar	0,23	0,32	0,25
3 m/s- 0,5 bar	0,34	0,44	0,28
5 m/s- 0 bar	0,28	0,29	0,24
5 m/s- 0,5 bar	0,36	0,42	0,33

EK A

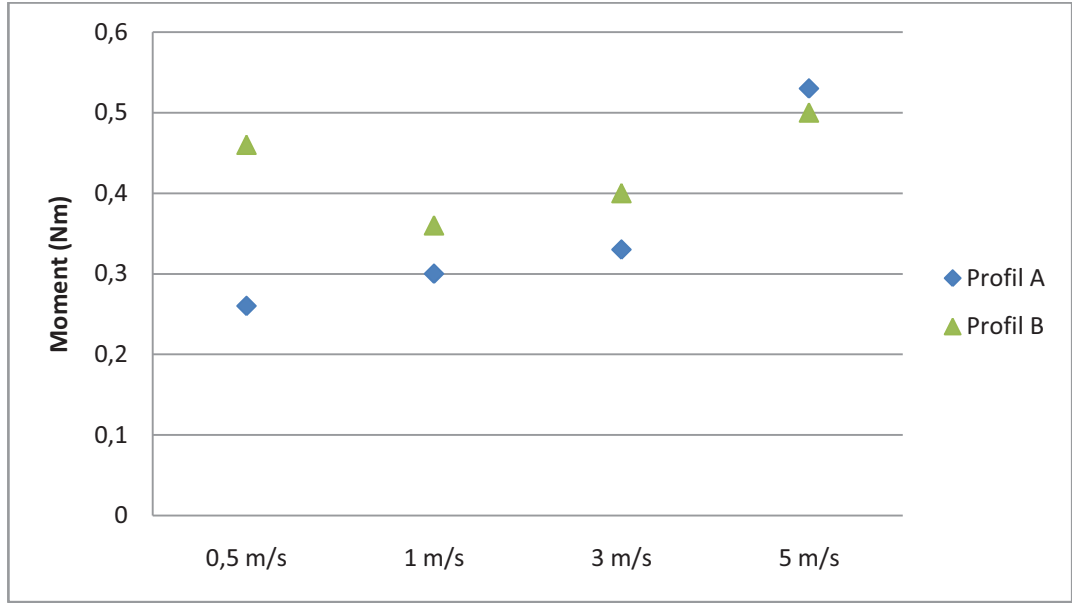


Şekil A.11 : B Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için 0 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

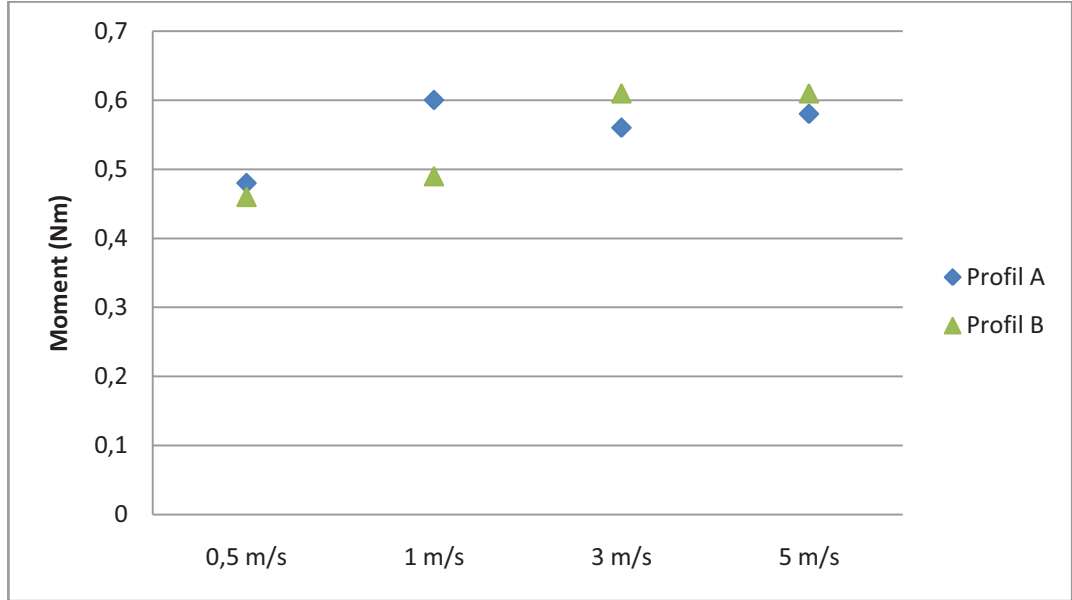


Şekil A.12 : B Profili- $\Phi 30$ mm çaplı keçe için 0,5 bar basınçta sürtünme momenti değerleri.

EK A

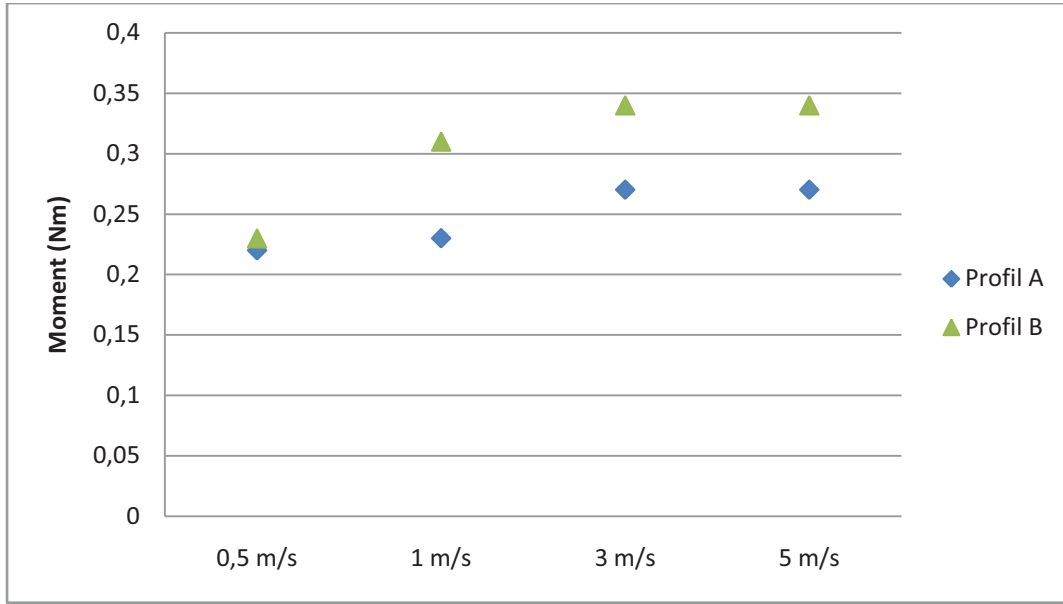


Şekil A.13 : 40 mm çap, 0,2 µm pürüz, 0 bar basınç için profillerin (9854-6421) sürtünme momentleri.

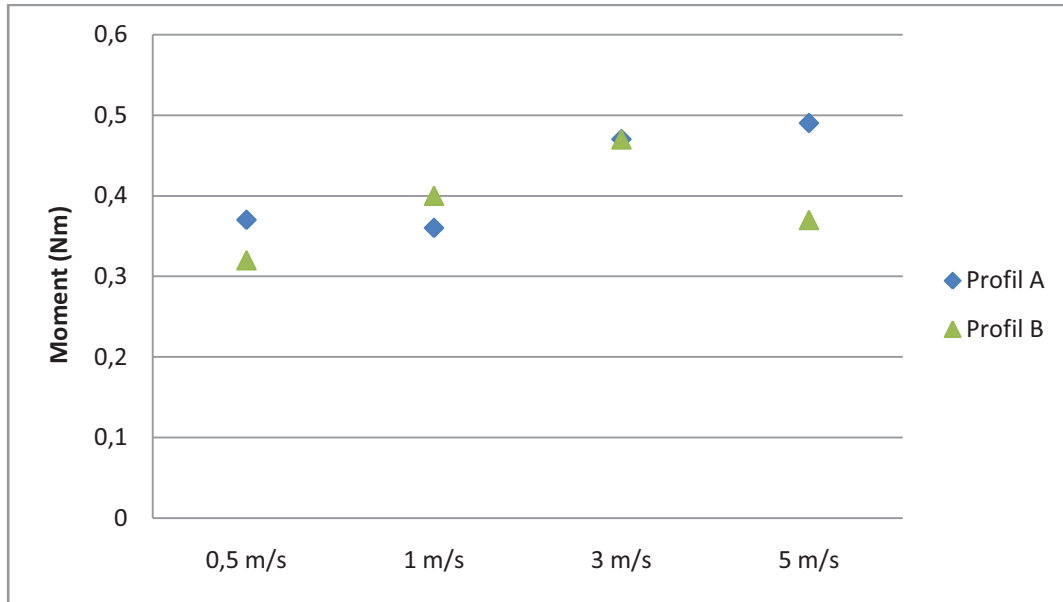


Şekil A.14 : 40 mm çap, 0,2 µm pürüz, 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

EK A

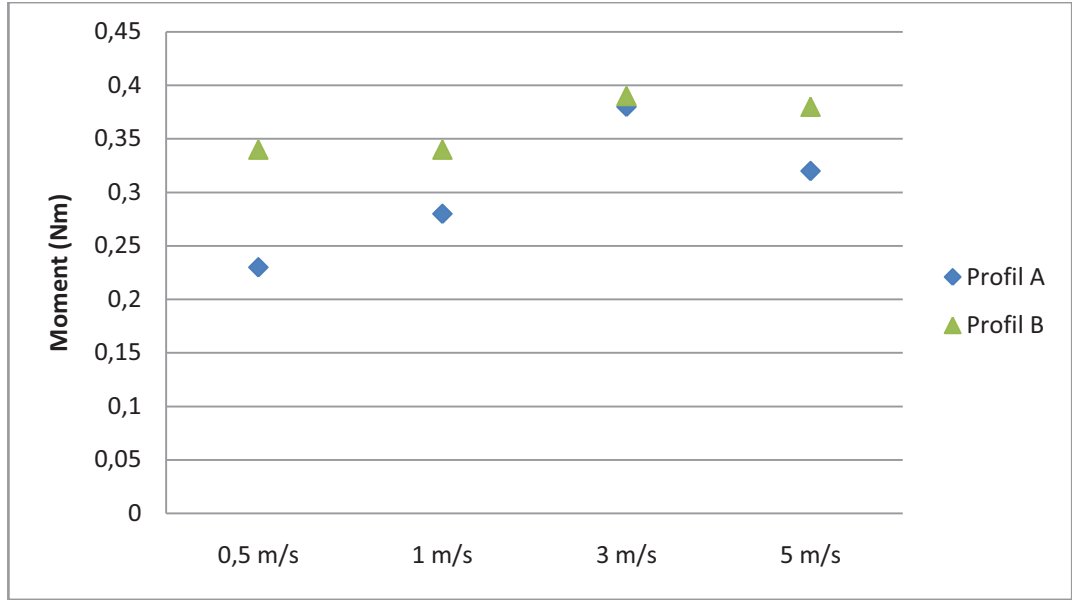


Şekil A.15 : 40 mm çap, 0,9 µm pürüz, 0 bar basınç için profillerin (9854-6421) sürtünme momentleri.

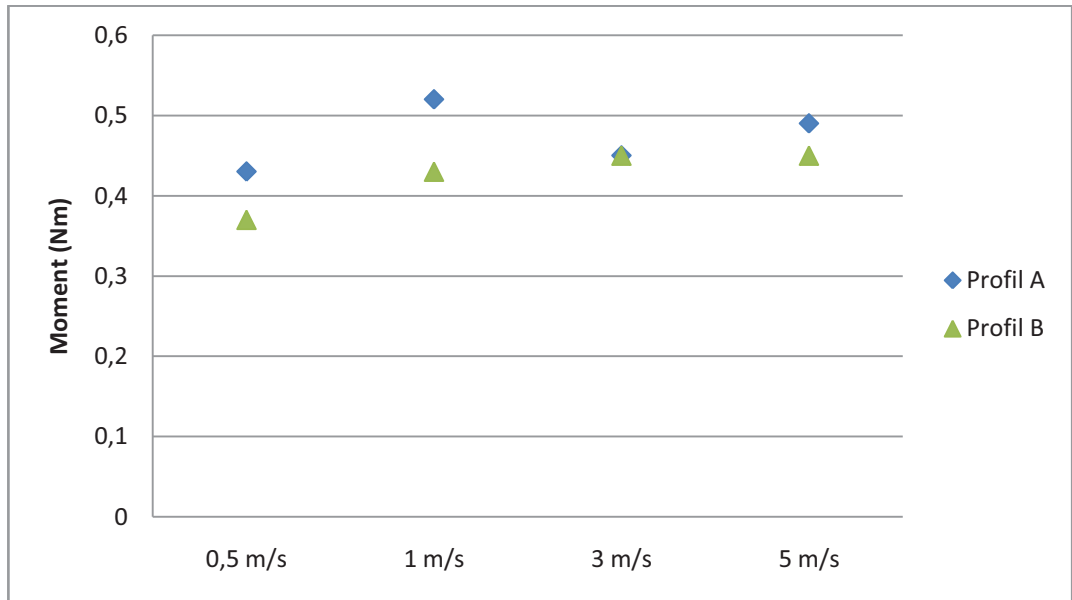


Şekil A.16 : 40 mm çap, 0,9 µm pürüz, 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

EK A

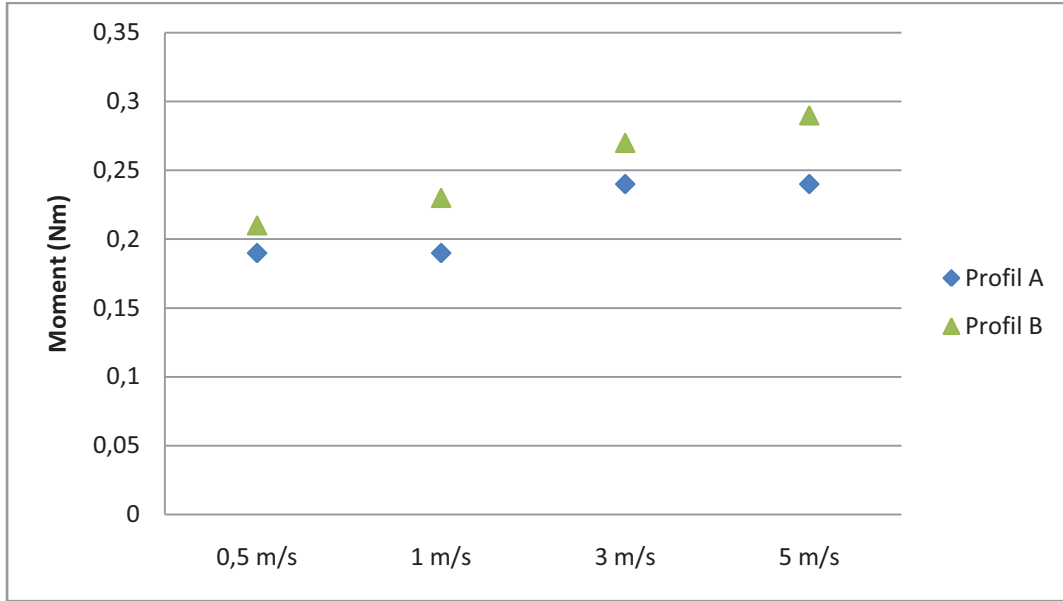


Şekil A.17 : 40 mm çap, 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

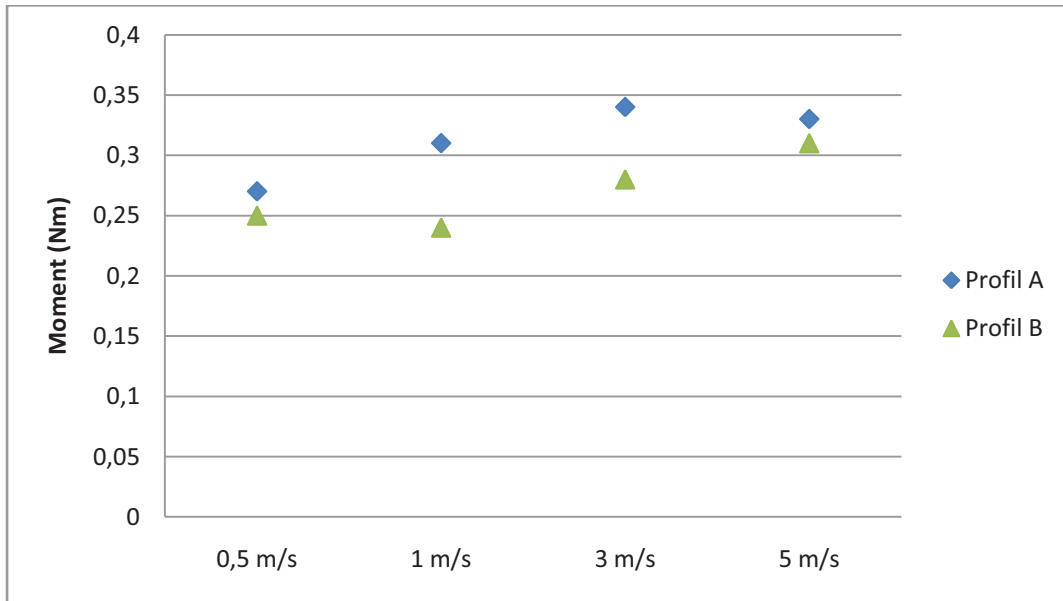


Şekil A.18 : 40 mm çap, 1,5 µm pürüz 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

EK A

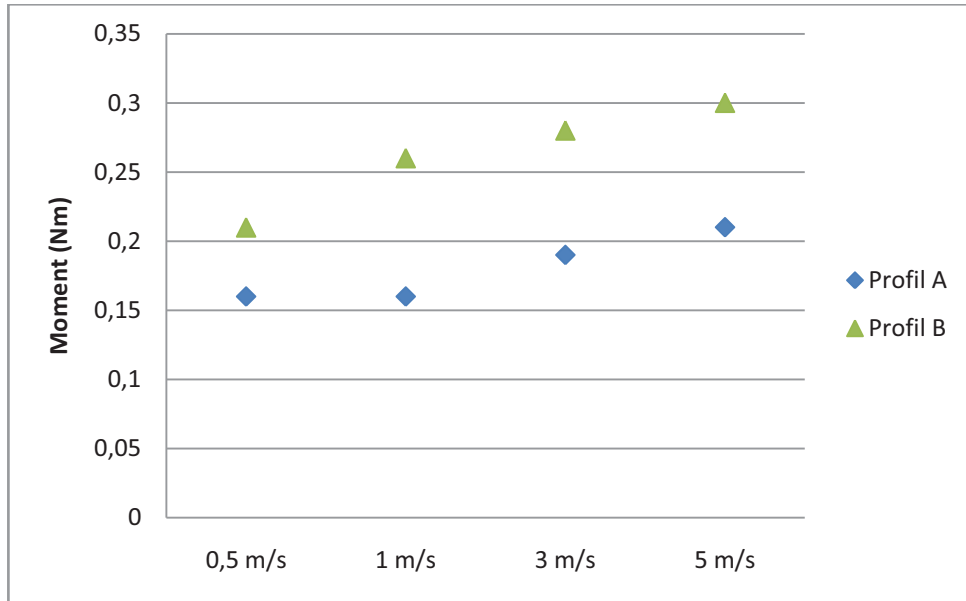


Şekil A.19 : 35 mm çap 0,03 µm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

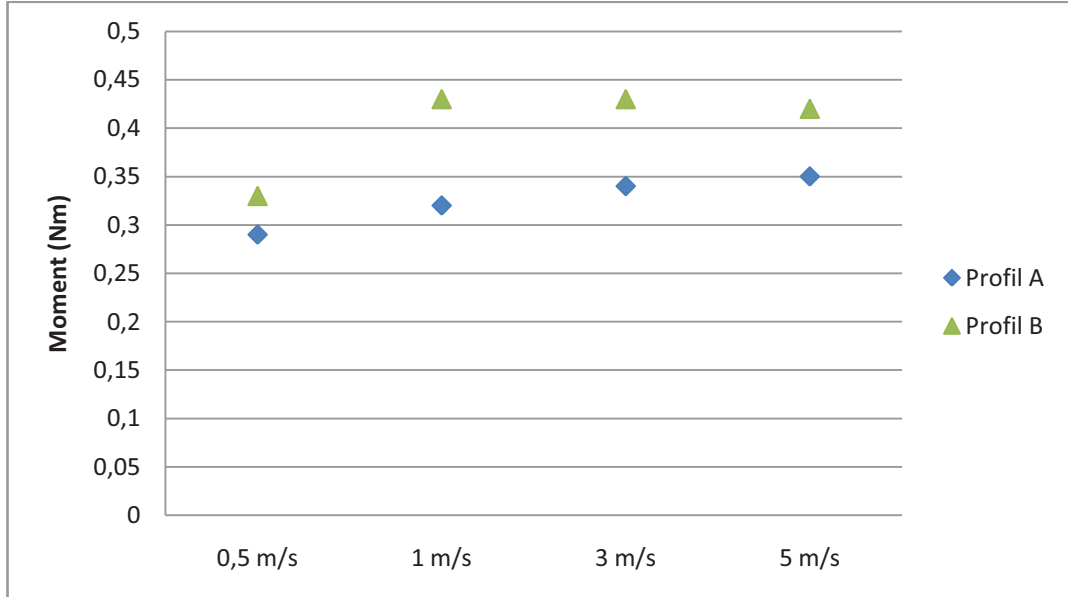


Şekil A.20 : 35 mm çap 0,03 µm pürüz 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

EK A

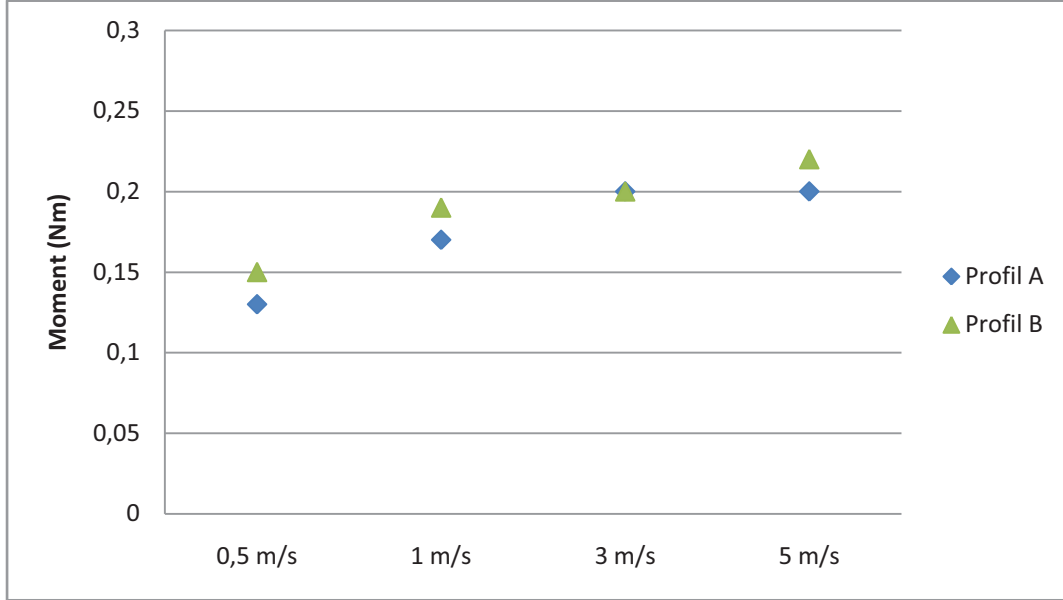


Şekil A.21 : 35 mm çap 1,065 μm pürüz, 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

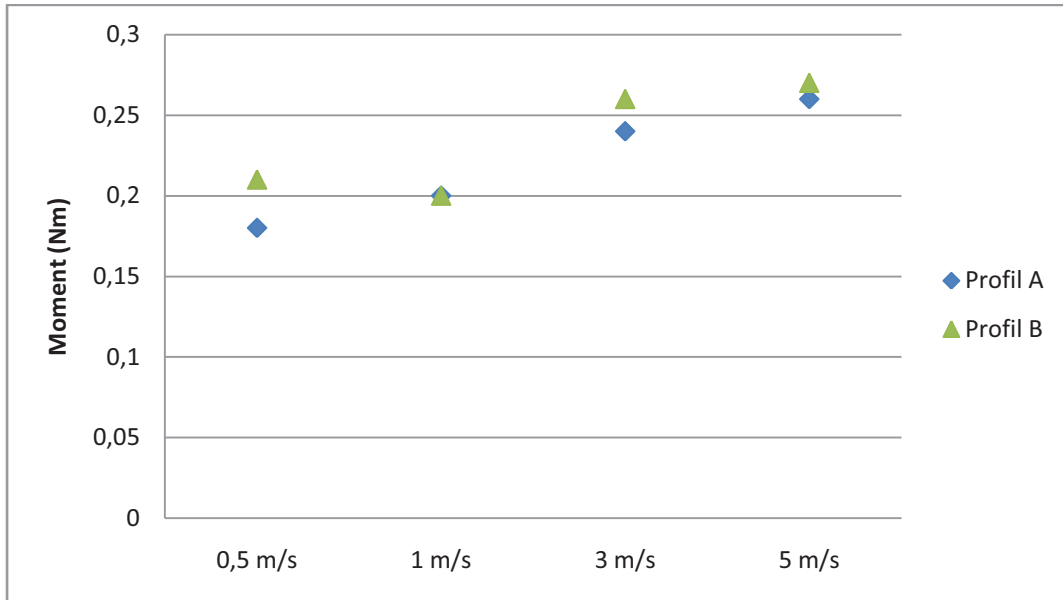


Şekil A.22 : 35 mm çap 1,065 μm pürüz, 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

EK A

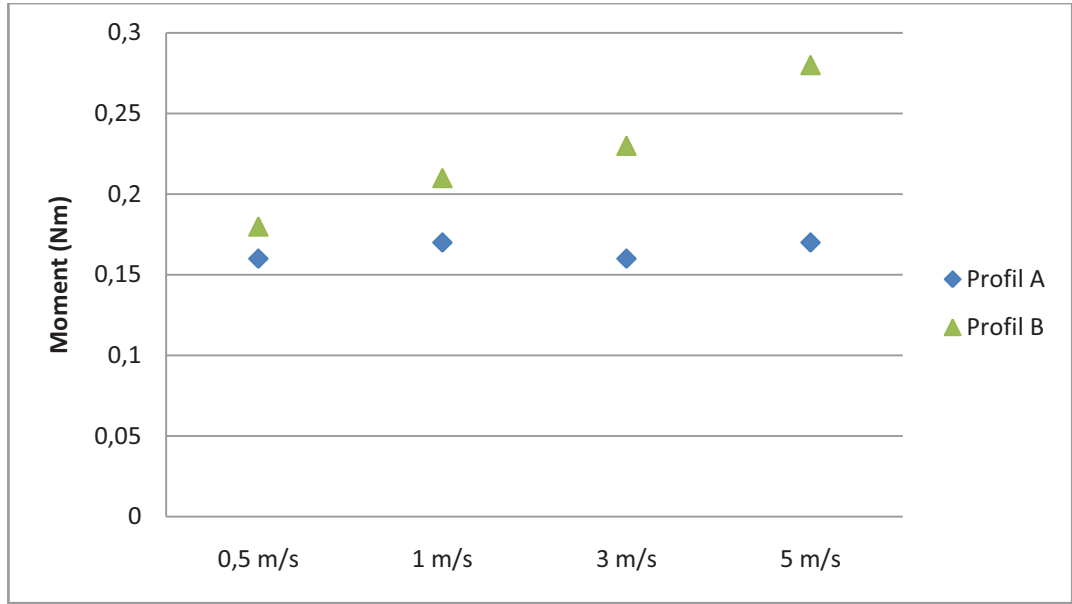


Şekil A.23 : 35 mm çap 2 μ m pürüz, 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

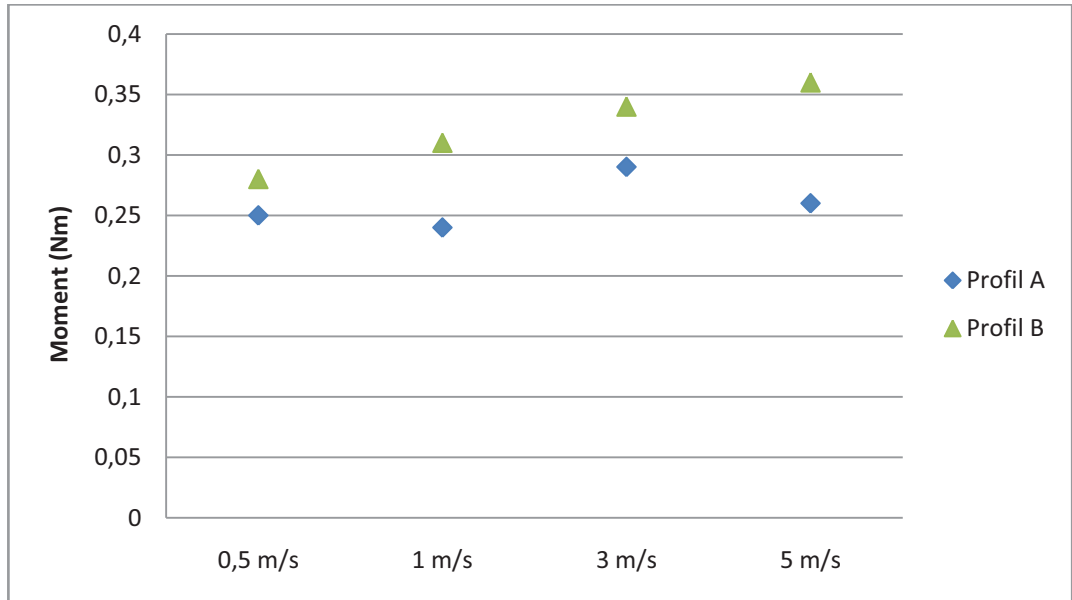


Şekil A.24 : 35 mm çap 2 μ m pürüz, 0,5 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

EK A

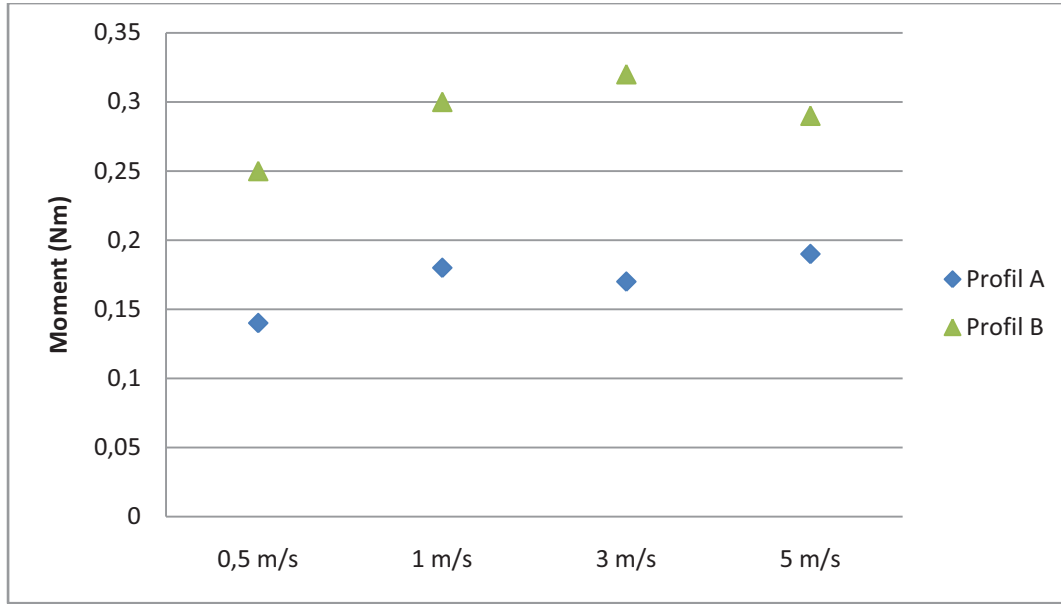


Şekil A.25 : 30 mm çap 0,04 μm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

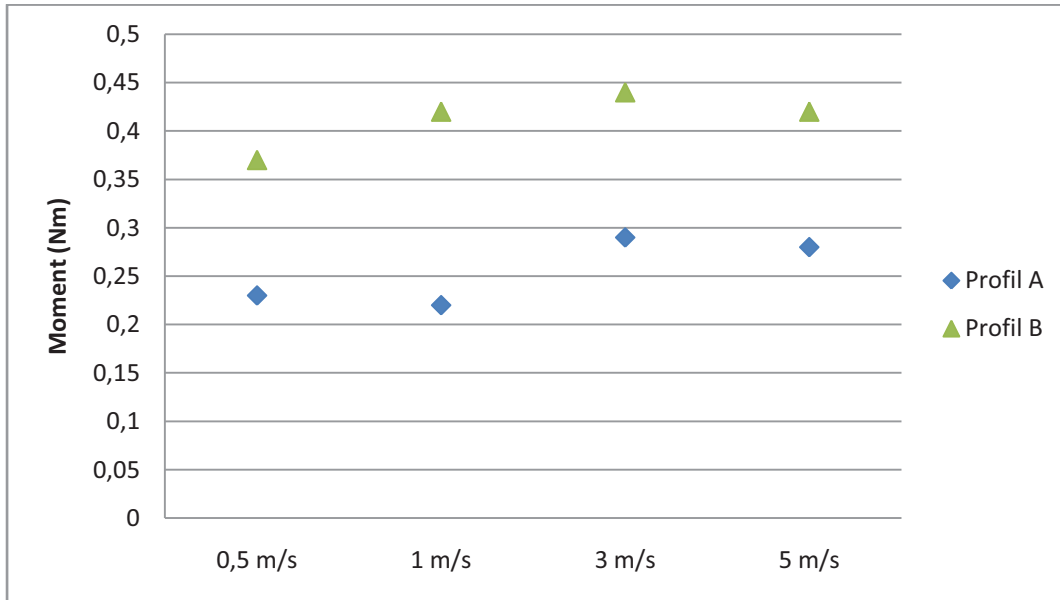


Şekil A.26 : 30 mm çap 0,04 μm pürüz 0,5 bar basınç için profillerin (9855-7601) sürtünme momentleri.

EK A

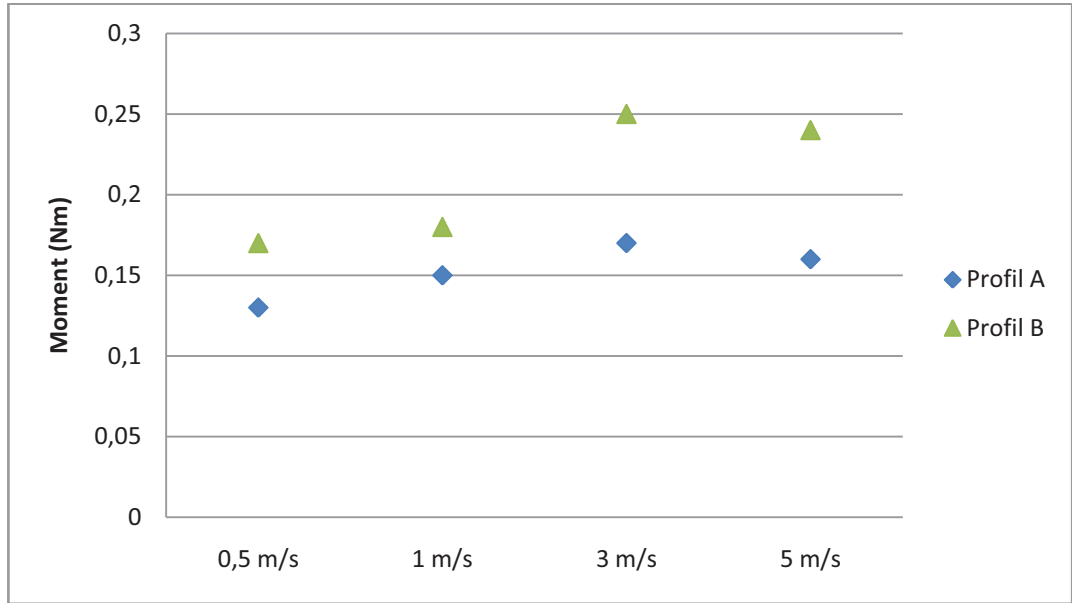


Şekil A.27 : 30 mm çap 0,719 μm pürüz 0 bar basınç için profillerin sürtünme momentleri.

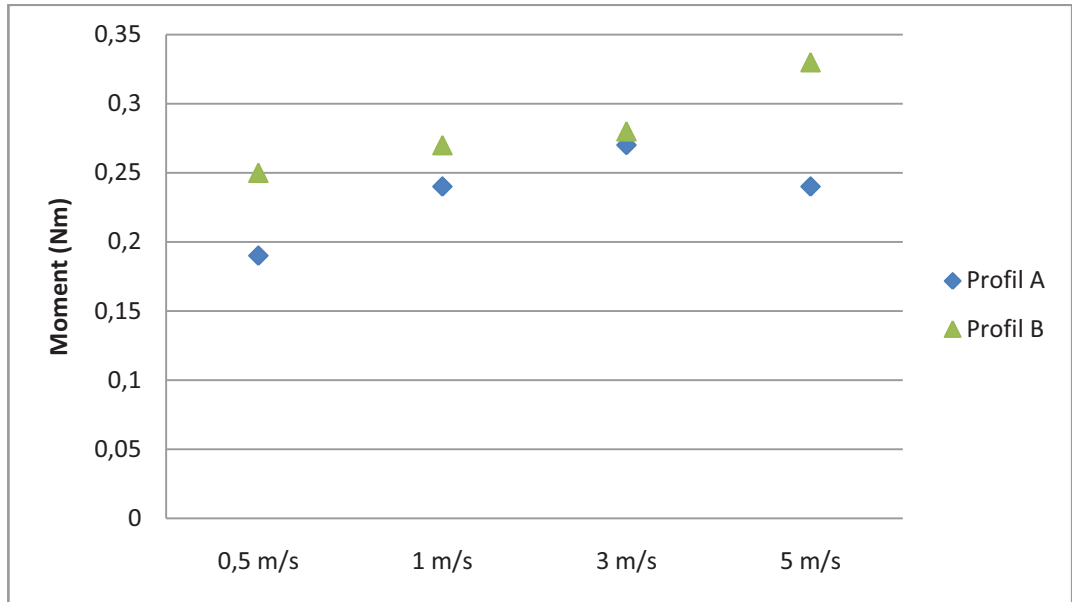


Şekil A.28 : 30 mm çap 0,719 μm pürüz 0,5 bar basınç için profillerin (9855-7601) sürtünme momentleri.

EK A

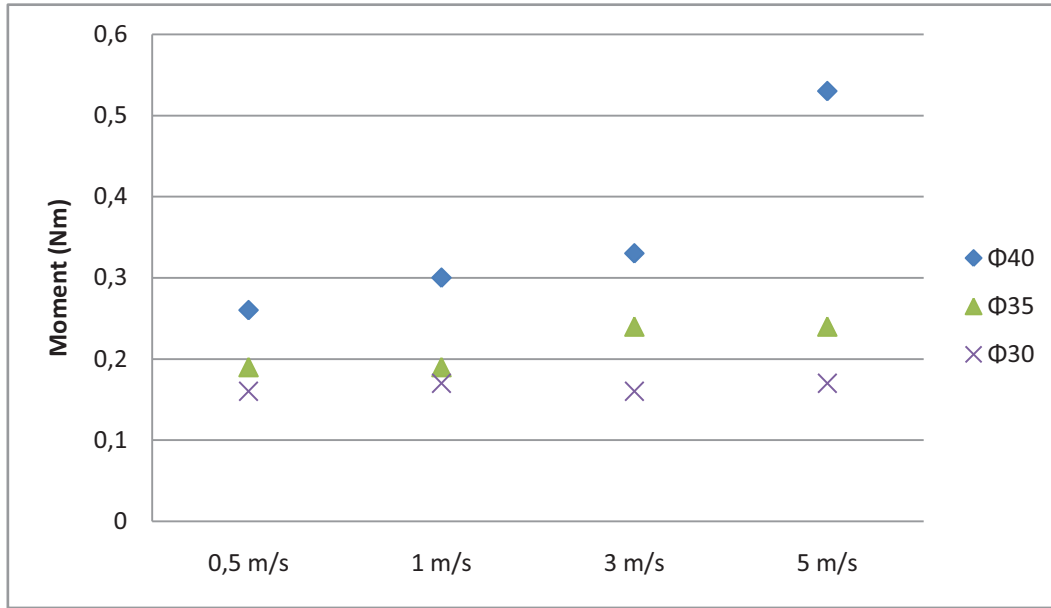


Şekil A.29 : 30 mm çap 1,15 μm pürüz, 0 bar basınç için profillerin (9855-7601) sürtünme momentleri.

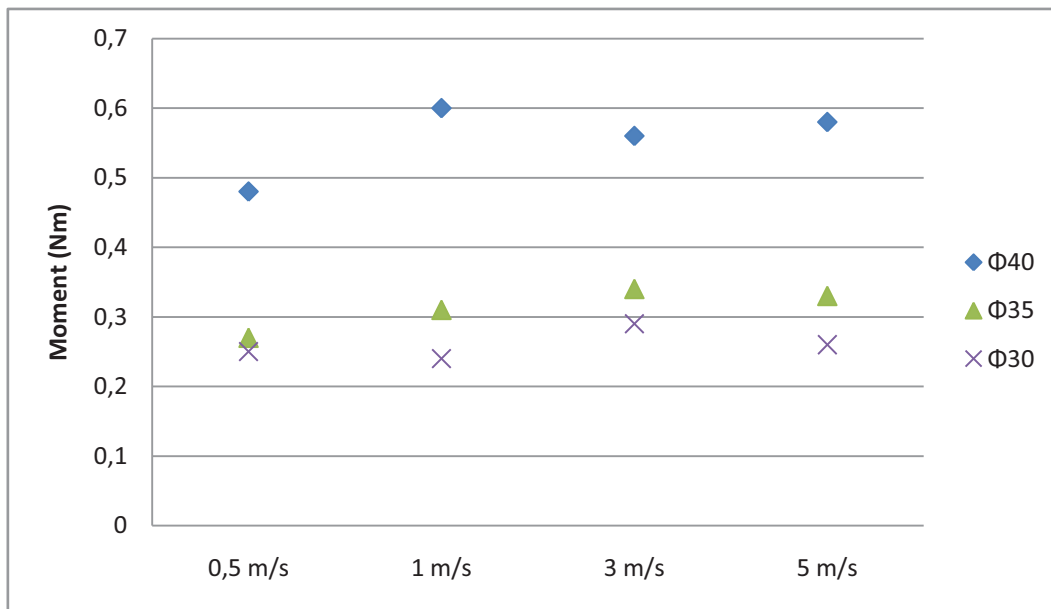


Şekil A.30 : 30 mm çap 1,15 μm pürüz 0,5 bar basınç için profillerin (9855-7601) sürtünme momentleri.

EK A

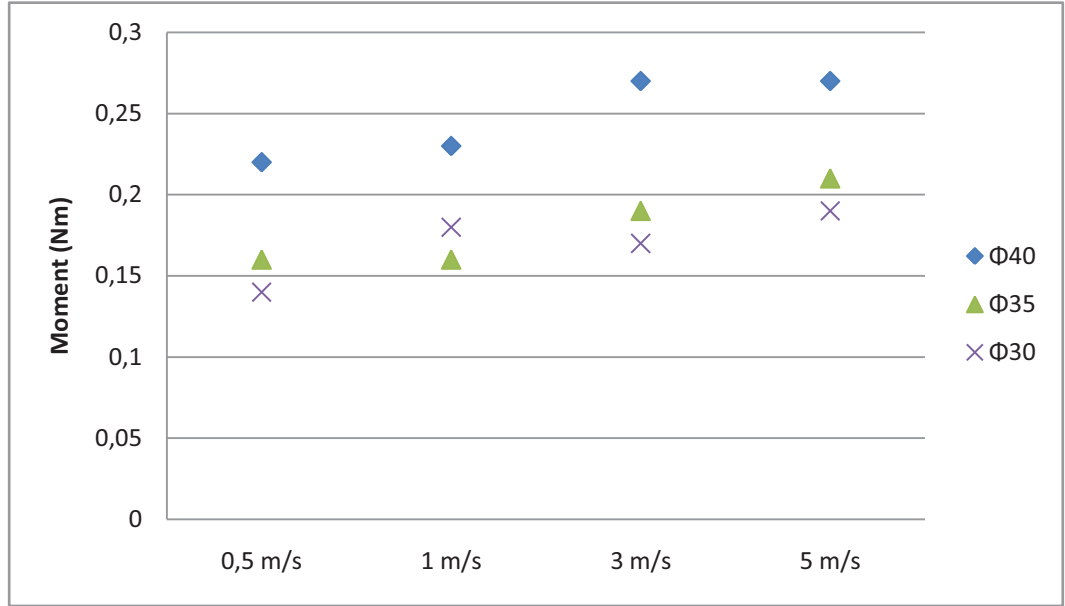


Şekil A.31 : 0,2 µm pürüz 0bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri.

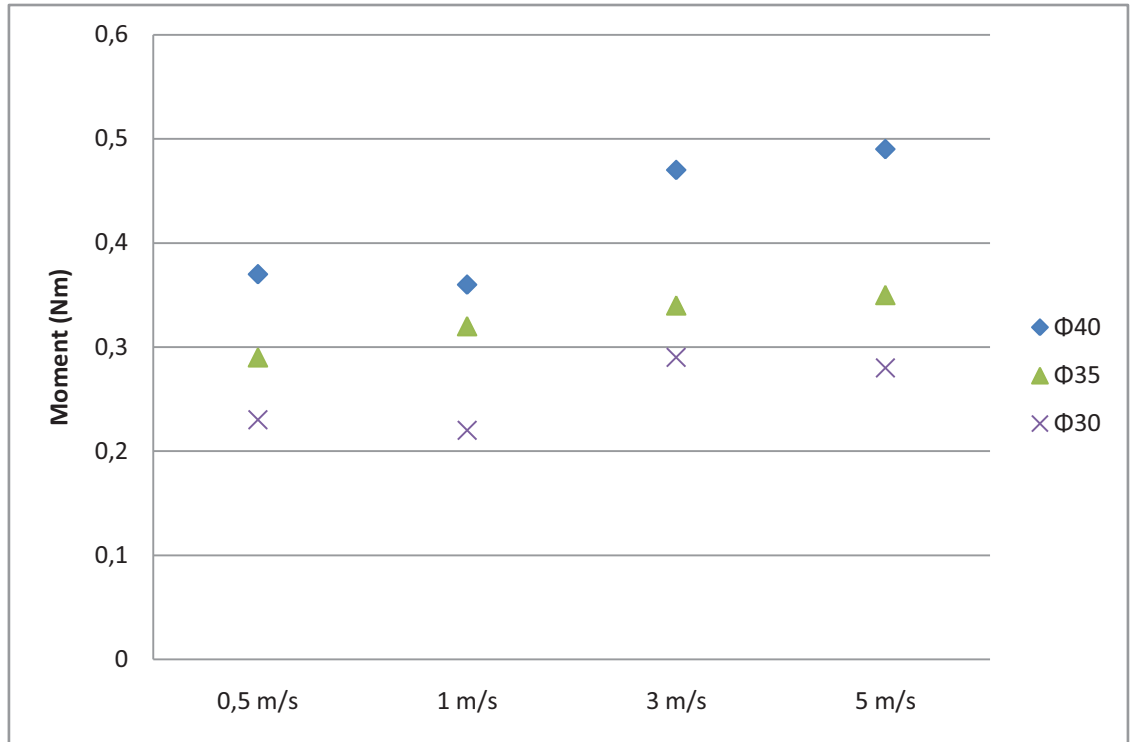


Şekil A.32 : 9855 0,2 µm pürüz 0,5 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri.

EK A

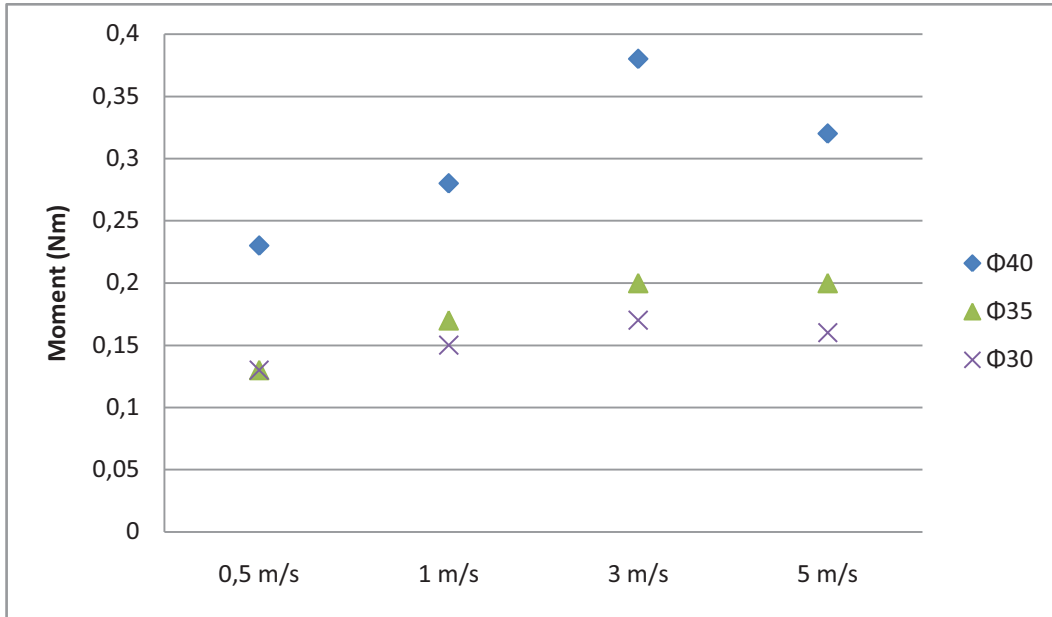


Şekil A.33 : 0,9 µm pürüz, 0 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri.

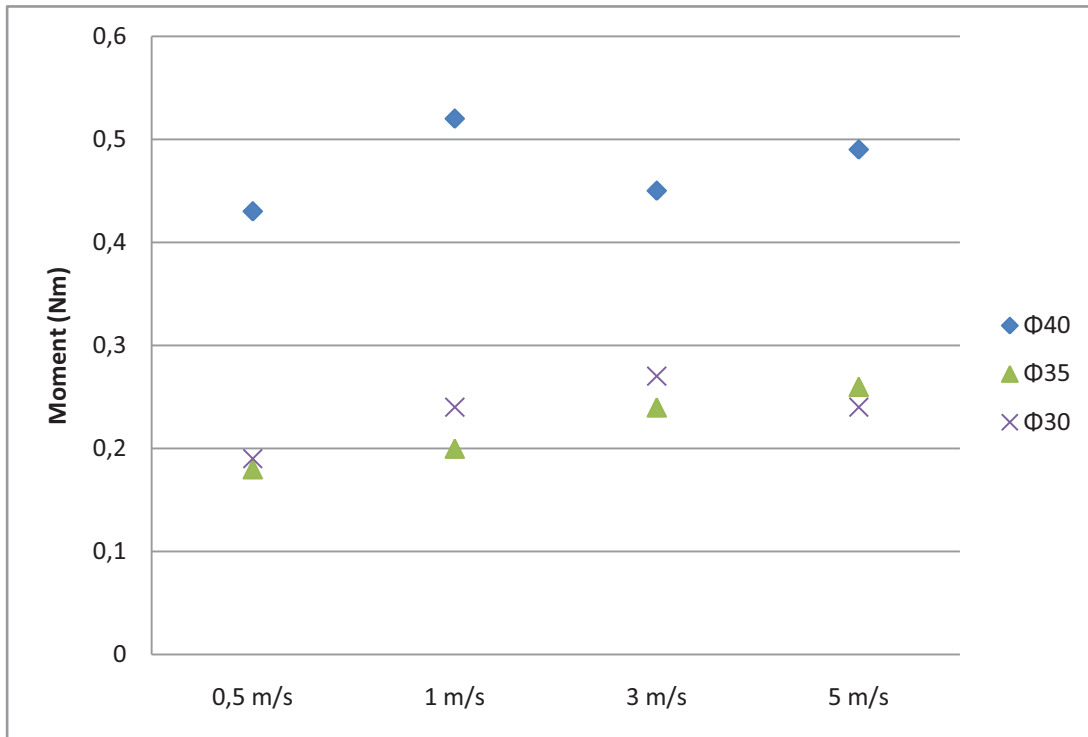


Şekil A.34 : 0,9 µm pürüz, 0,5 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri.

EK A

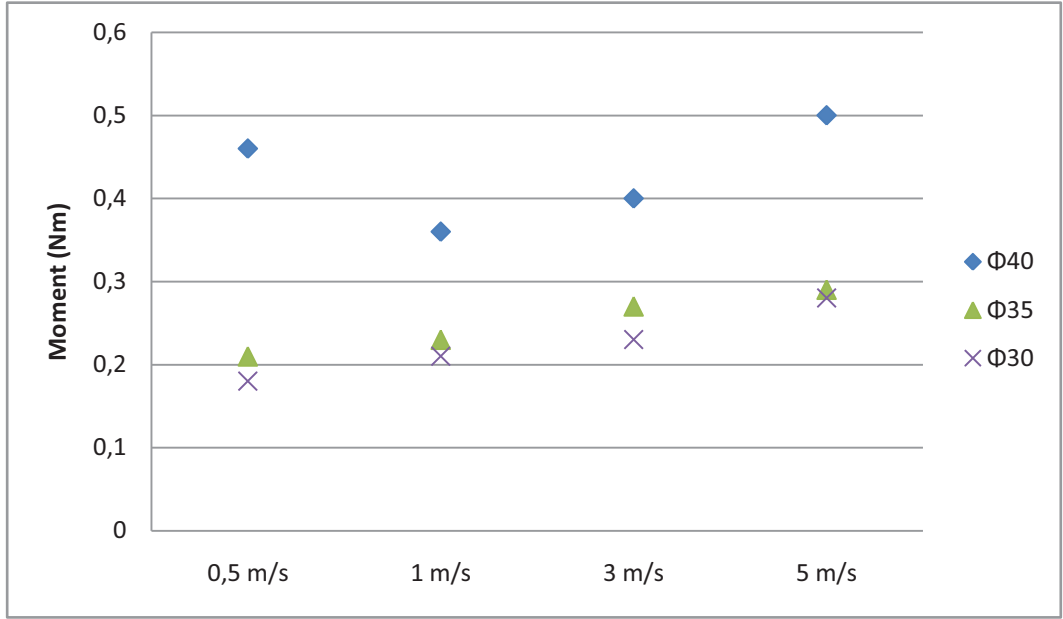


Şekil A.35 : 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri.

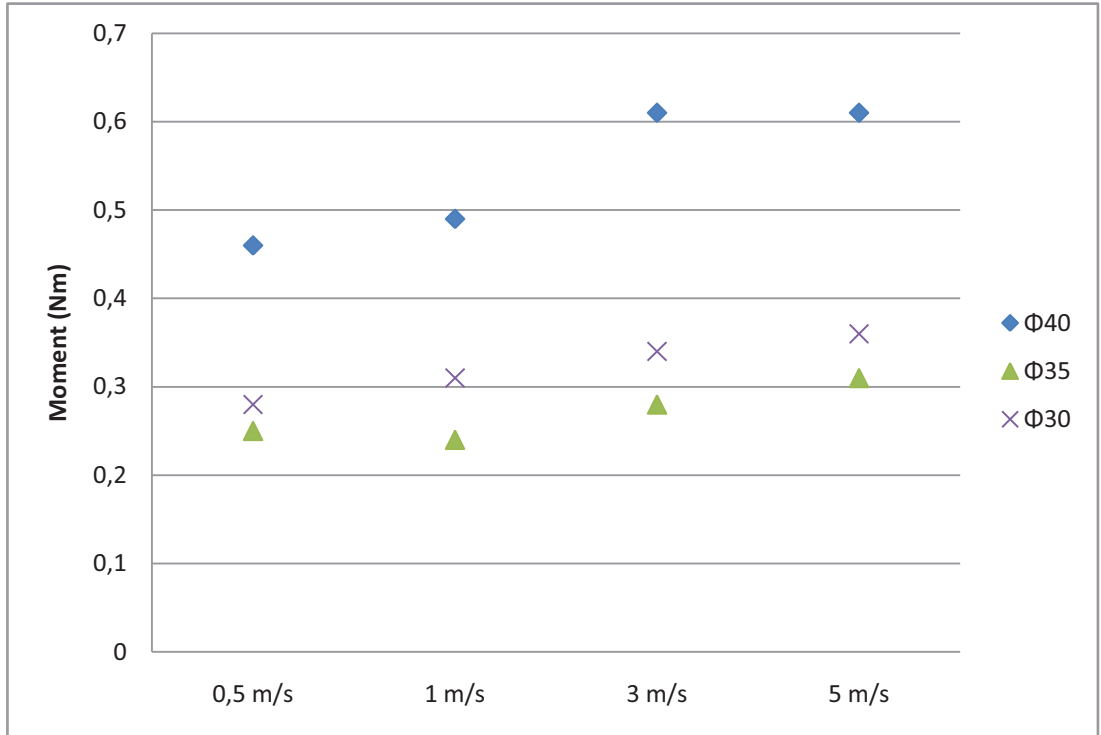


Şekil A.36 : 1,5 µm pürüz 0,5 bar basınç için A profilinin sürtünme momentleri.

EK A



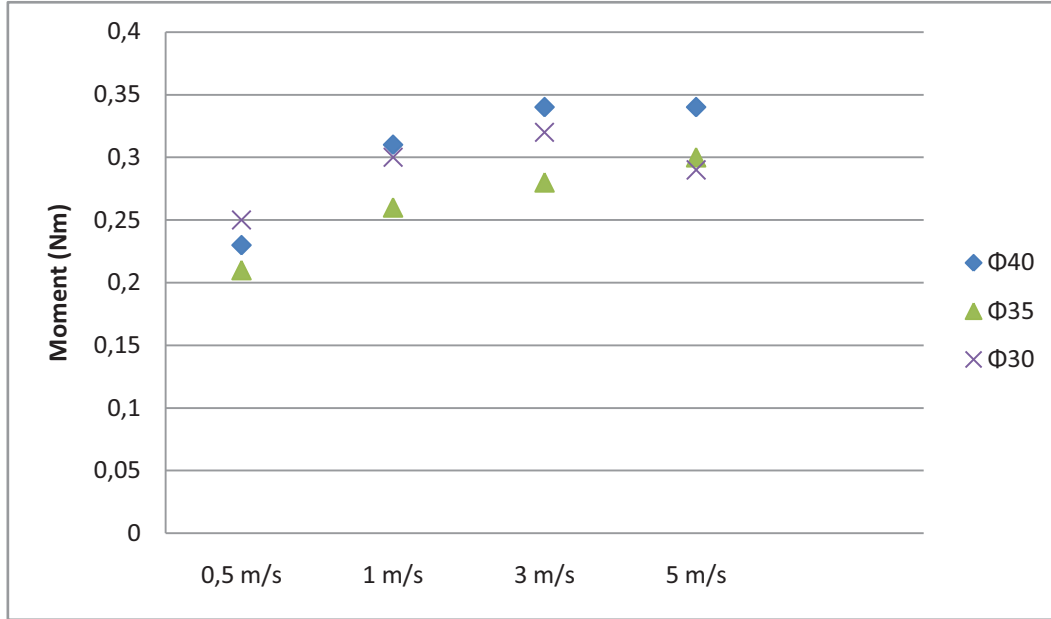
Şekil A.37 : 0,2 µm pürüz 0 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri.



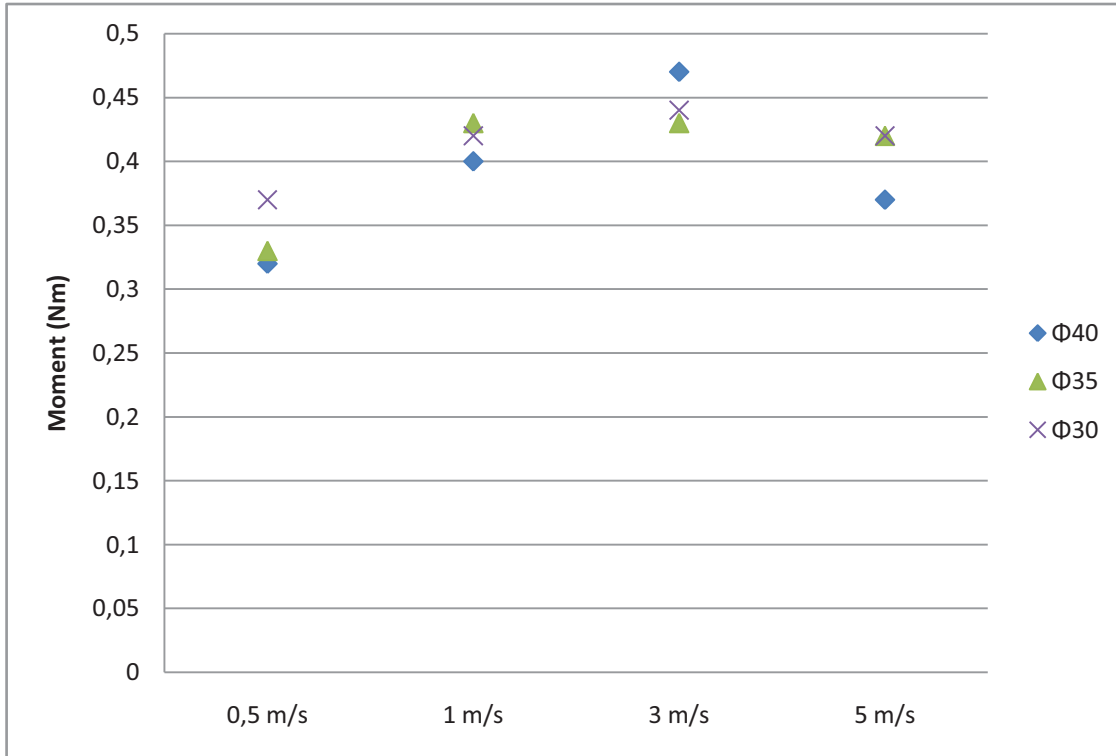
Şekil A.38 : 0,2 µm pürüz 0,5 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri.

Şekil A.39 :

Şekil A.40 : EK A

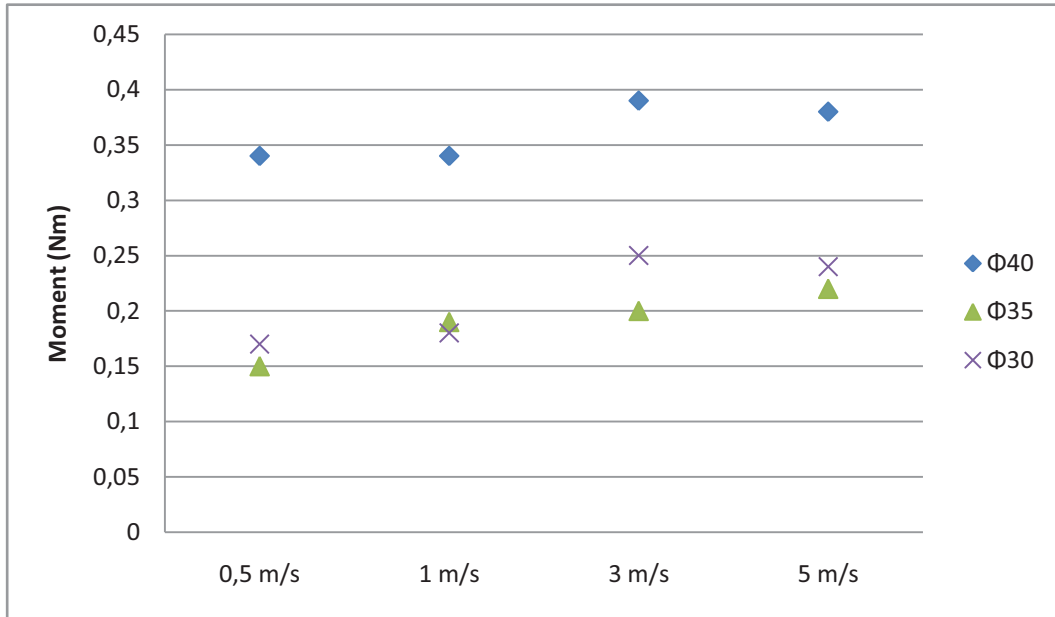


Şekil A.41 : 0,9 µm pürüz 0bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri.

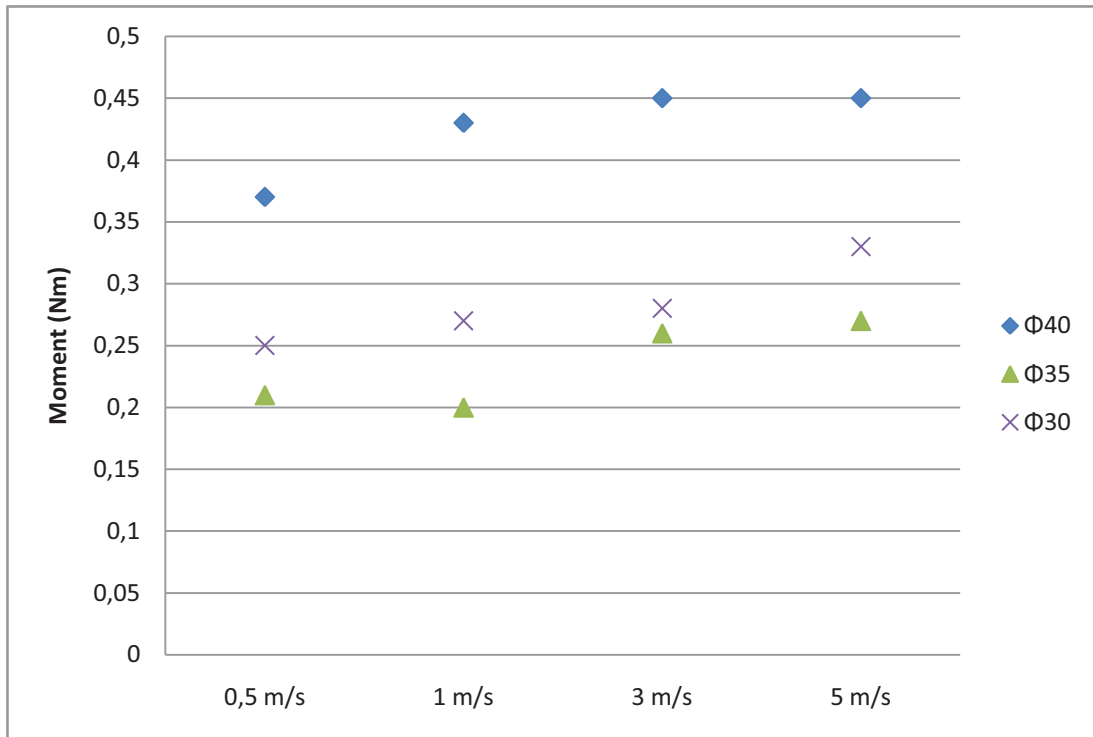


Şekil A.42 : 0,9 µm pürüz 0,5 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri.

EK A



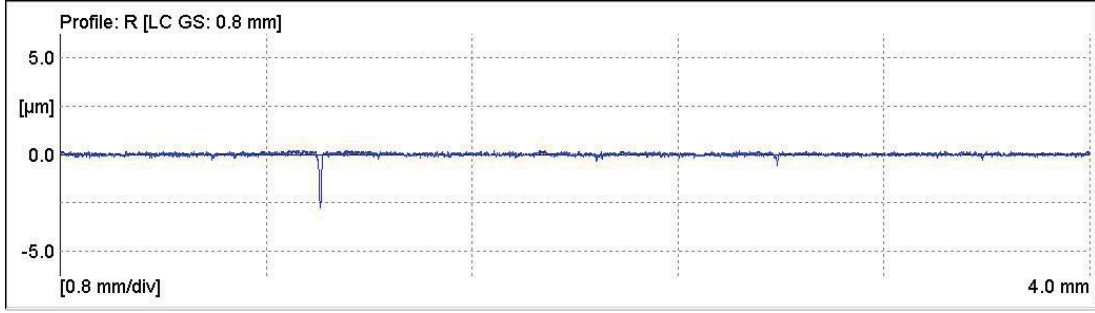
Şekil A.43 : 1,5 µm pürüz 0 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri.



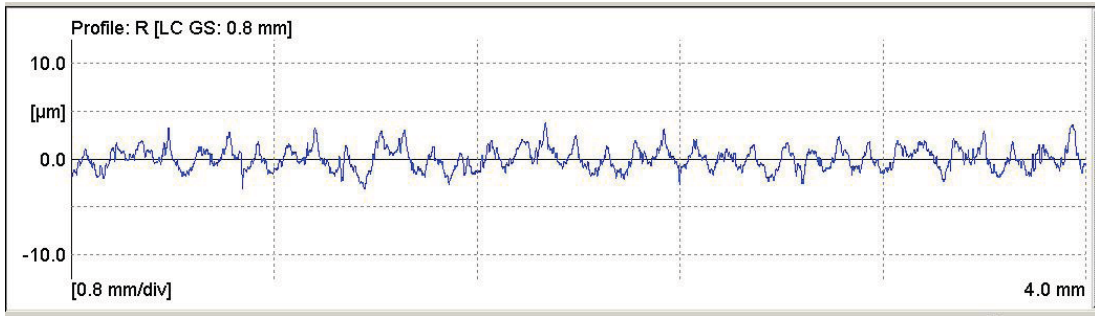
Şekil A.44 : 1,5 µm pürüz 0,5 bar basınç için B profilinin sürtünme momentleri.

EK B Mil pürüz profili

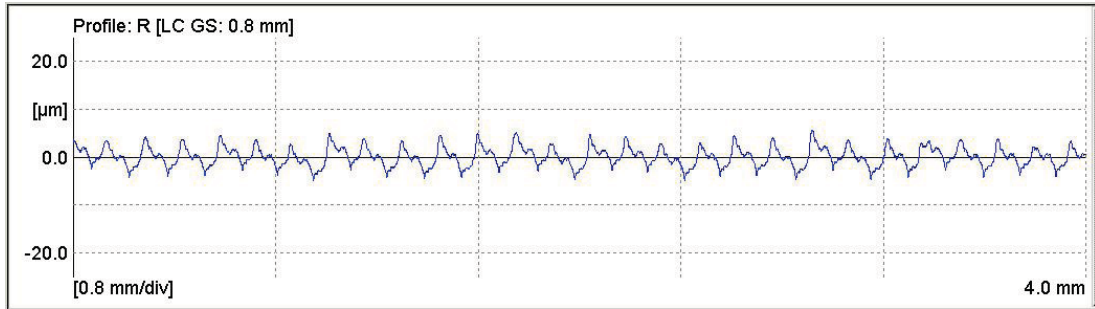
EK B



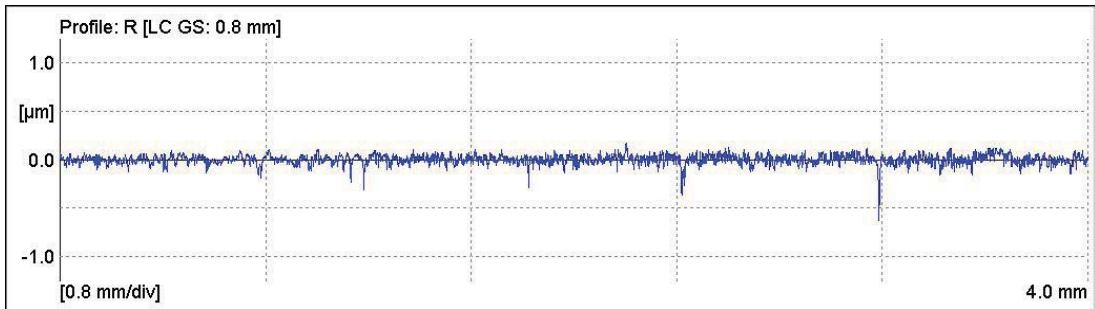
Şekil B.1 : 40 mm çap, 0,039 µm pürüz değeri için yüzey profili



Şekil B.2 : 40 mm çap, 0,981 µm pürüz değeri için yüzey profili

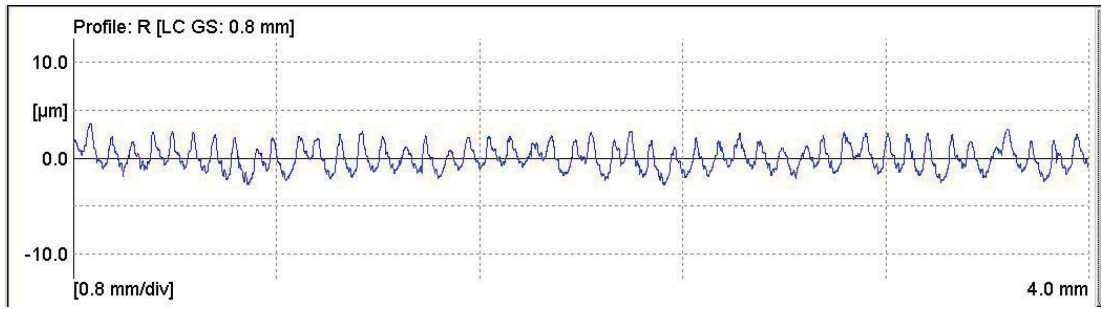


Şekil B.3 : 40 mm çap, 1,550 µm pürüz değeri için yüzey profili

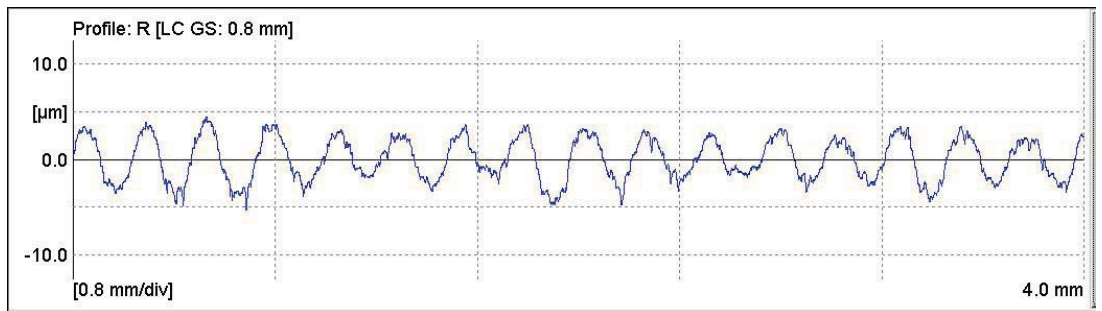


Şekil B.4 : 35 mm çap, 0,030 µm pürüz değeri için yüzey profili

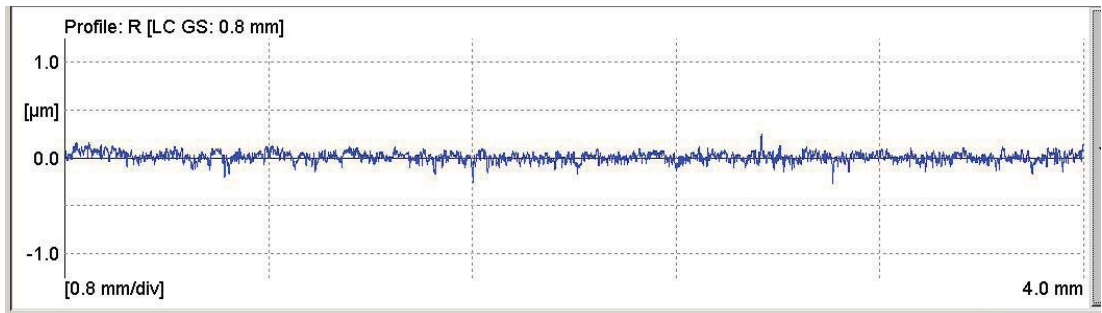
EK B



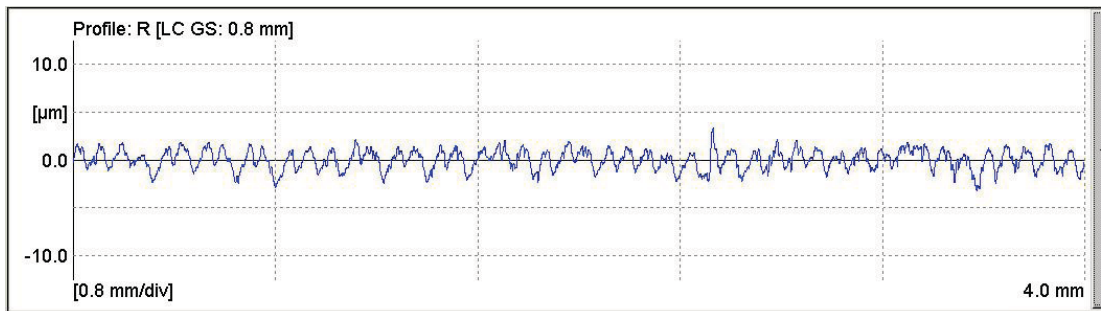
Şekil B.5 : 35 mm çap, 1,065 µm pürüz değeri için yüzey profili



Şekil B.6 : 35 mm çap, 2,000 µm pürüz değeri için yüzey profili

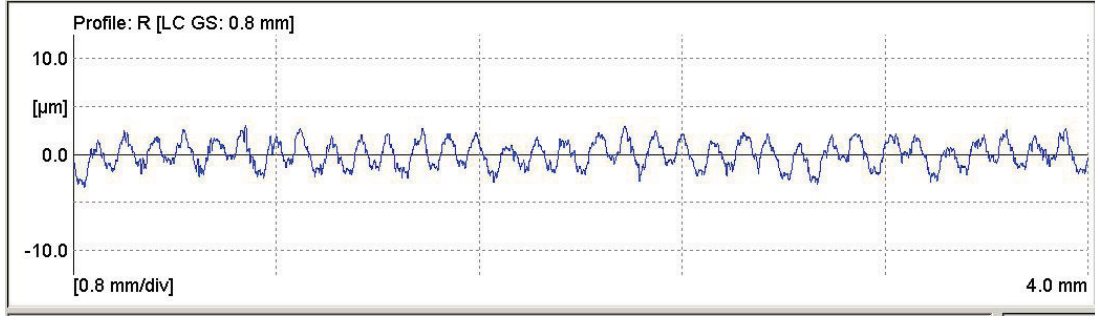


Şekil B.7 : 30 mm çap, 0,040 µm pürüz değeri için yüzey profili



Şekil B.8 : 30 mm çap, 0,719 µm pürüz değeri için yüzey profili

EK B



Şekil B.9 : 30 mm çap, 1,150 μm pürüz değeri için yüzey profili

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hacer ÖZPERK

Doğum Yeri ve Tarihi: 1984, İliç

Lisans Üniversitesi: İTÜ, Makina Mühendisliği