

Sabit ve Dinamik Yük Altında Çalışan Boru Bağlantılarındaki Sürtünme Katsayısının Değişimi

Olkan ÇUVALCI, Hasan SOFUOĞLU
*K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü
61080, Trabzon-TURKEY*

Geliş Tarihi 04.03.1996

Özet

Eş çalışan parçalarda, sürtünme katsayısı ve buna bağlı olarak oluşan metal transferi, normal kuvvet, yağlayıcı, yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme yüzeylerinin tasarımı gibi bir çok parametreye bağlıdır. Bu kadar çok parametrenin etkili olduğu sürtünmeyi ve metal transferi olayını matematiksel bir modelle ifade etmek çok zor olduğundan, sürtünme ve metal transferi olayı bazı parametreler sabit alınarak deneysel çalışmalarla açıklanabilmektedir. Bu çalışmada, kurulan bir deney düzeneği ile normal kuvvet, zamana göre sürekli artan şekilde veya sabit bir değerde tutulabildiği gibi, kademeli olarak da düzenlenerek sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Ayrıca, Yukarı-Aşağı (Up and Down) Tekniği kullanılarak değişik boru malzemeleri için akma gerilmesi ve uygun sıkma devir sayısı, istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmadaki tüm deneylerde L80 ve J55 standart boru malzemeleri kullanılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Yüzeyden Metal Transferi, Zaman Bağımlı Sürtünme Katsayısı, Yağlama.

The Variation of the Friction Coefficient in Pipe Connections Working Under Static and Dynamic Loads

Abstract

The friction coefficient and the galling process in metal to metal parts depend on many variables such as normal load, lubricant, roughness and design of the friction surfaces. Since developing a mathematical model is very difficult for friction phenomena and the galling process, these tribological events can be explained with studies taking some parameters as constant. In this study, an experimental system was established in order to investigate the friction coefficient versus the normal load with respect to time. Moreover, yield stress and rotational speed for different materials were determined with the Up and Down Technique. In all the experiments, L80 and J55 tubing materials were used.

Key Words: Galling, Time Dependent Friction Coefficient, Lubrication.

Giriş

Üretimi zor ve pahalı olan enerjinin azımsanmayacak bir bölümü, sürtünme, aşınma ve metal transferi gibi mekanizmaların etkisiyle kaybolmaktadır. Bu tribolojik enerji kaybının azaltılması amacıyla çeşitli çalışmalar yapıp, yeni mekaniz-

maların ve modellerin geliştirilmesi amacıyla önemli yatırımlara gidilmektedir.

Petrol endüstrisi ile enerjinin önemli bir bölümü karşılanmakla birlikte, ham petrolün kuyulardan çıkarılması işleminde çok çeşitli kayıplar ortaya

çıkılmaktadır. Ham petrolü kuyudan çıkarmak için kullanılan borular vidalı bağlantılarla birbirlerine eklenmektedir. Bu şekildeki vidalı boru bağlantılarına uygulanan sıkma momentinin yeterli olmaması durumunda, dişler arasından ve yetersiz yüzey basıncından dolayı alınlardan sızan ham petrol, kuyuya geri dönmektedir. Diğer yandan, sıkma momentinin gereğinden fazla olması durumunda vida dişleri arasında ortaya çıkan yüksek basınç nedeniyle bölgesel kaynaklanma ve bu kaynaklanan noktaların kopması sonucunda temas yüzeylerinde boşluklar oluşmaktadır. Bu olay “metal transferi (galling)” olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgelerde oluşan boşluklar ve kılcal çatlaklar nedeniyle ham petrolün kuyuya geri dönmesi önlenememektedir.

Ham petrol kuyularının bulunduğu bölge şartlarının uygunsuzluğu yanında, petrolü çıkarmak için harcanan enerjinin ve emeğin son derece pahalı olması sebebiyle, boru bağlantılarındaki geriye sızmaların olmaması amaçlanmaktadır. Bu ise, yalnızca bağlantı yerlerinde boru malzemelerine uygun bir sıkma momenti uygulanmasıyla veya uygulanacak sıkma momentinden bağımsız bir bağlantı tasarımı geliştirmekle sağlanabilir. Bununla birlikte, birleşme noktalarında oluşan yüzey basıncına ilave olarak yüzey pürüzlülüğü, yüzeyler arasındaki yağlayıcı, malzeme çifti, sürtünme katsayısı gibi pek çok parametreler de yüzeyden metal transferi olayına katkıda bulunmaktadır. Metal transferi olayında bu kadar çok parametrenin etkili olması nedeniyle, matematiksel bir modelin tam anlamıyla gerçekleştirilmesi mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla, bütün bulgular deneysel verilere dayanmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak da, deney numunesinin geometrisi, yüzey işleme kalitesi, devir sayısı, yüzey basıncı gibi ana parametrelerin, araştırmacıdan araştırmacıya değişmesi şeklindeki dezavantajlar ortaya çıkmaktadır. Deney sonuçları da, yukarıdaki parametrelere bağlı olarak ölçüm yöntemlerine ve deney düzeneklerine göre değişebilmektedir. Bu nedenle sonuçların değerlendirilmesi amacıyla bir standart belirlenmemiştir.

Deney Düzenegi

Deney düzenegi Şekil 1’de görüldüğü gibi üniversal bir çekme-basma deney makinasına bazı ekler yaparak tasarlanmıştır (Ertaş ve arkadaşları, 1990). Deney düzenegini oluşturan ana parçalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

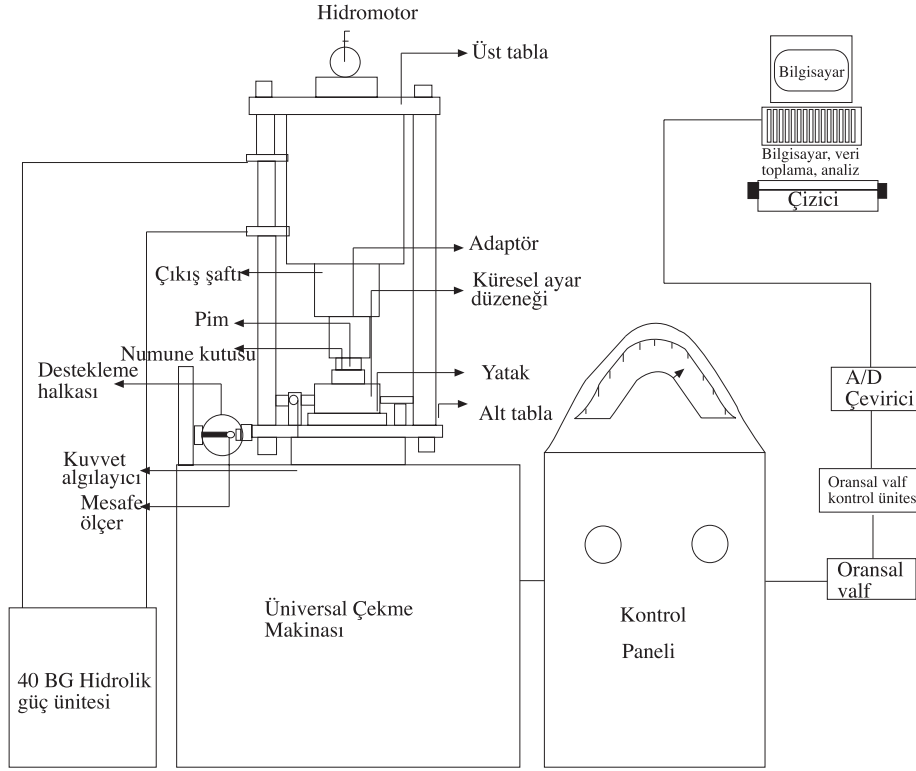
Üniversal çekme makinası ile test numunelerine 130 000 N’luk yük uygulanabilmektedir. Bunun için üniversal çekme makinasına ilave edilen alt ve üst tablalarda, test numunelerinin yerleştirilmesi için adaptörler yapılmıştır. Ayrıca, alt tabla ile adaptör arasına, alt tablanın rahatça dönebilmesi ve sürtünme kayıplarının az olması için eksenel bilyalı yatak yerleştirilmiştir.

30 kW’lık hidrolik güç ünitesini beslediği 10500 Nm’lik döndürme momentini sağlayan hidromotor, sabit olan üst tablaya monte edilmiştir. Hidromotorun döndürdüğü çıkış miline bağlanan bir adaptör, dönen erkek numuneyi taşımaktadır. Dişi numune küresel işlenmiş bir adaptör üzerine bağlanmıştır. Böylelikle, eksenel olarak uygulanan kuvvetin üniform yüzey basıncı oluşturması sağlanmıştır (Carper, ve arkadaşları 1990). Uç uca eklenecek iki parçanın birbirlerine göre relatif olarak dönerken aynı zamanda da ilerleyerek sıkışmaları fikri “vidalı bağlantıların” temel prensibini oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki deney düzeneginde de, yukarıda da belirtildiği gibi, üst parça alt parçaya göre relatif olarak dönmekte ve alt parça da uygulanan kuvvetin etkisiyle az da olsa yukarı doğru ilerlemekte ve iki parça arasında temas sağlanarak sıkışma ve dolayısıyla bağlantı sağlanmaktadır. Böylece, boruları uç uca eklemek için kullanılan vida bağlantısı bu şekildeki bir tasarım ile modellenmiş olmaktadır.

Yukarıda ana üniteleri kısaca açıklanan deney düzenegine son olarak, çekme-basma deney makinasının hidrolik güç ünitesinden beslenen hidrolik silindirin girişine, oransal ventil ilave edilmiştir. Bilgisayar tarafından üretilen sayısal değerlerin bir sayısal/analog dönüştürücü ile gerilime dönüştürülmesi ve bu voltajın kontrol ünitesi üzerinden oransal ventile hareket vermesi sayesinde, zamana bağlı olarak eksenel yükün istenildiği gibi değiştirilmesi olanağı sisteme ilave edilmiştir. Böylelikle hidrolik silindire, dolayısıyla, deney numunesine bilgisayar kontrollü ve geri beslemeli olarak belirli bir basıncın istenilen süre içinde hareket vermesi sağlanmıştır.

Ölçüm ve Kontrol Sistemleri

Sistemdeki kuvvet algılayıcısıyla, deney numunelerine uygulanan eksenel yük ölçülmektedir. Ayrıca dönme serbestisine sahip alt tablanın dönmesi bir dayanma bileziği ile engellenmiştir. Bu bileziğin içerisine yerleştirilen mesafe algılayıcısıyla bileziğe gelen çevresel kuvvet ölçülmektedir. Dayanma bileziği ve mesafe algılayıcısının kalibrasyon grafiği ve değerleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Veri kaydedici sistem, 486DX33 IBM PC ile Dash 8P6A donanım ve Notebook yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sistemle, deney düzeneğinden eksenel ve çevresel kuvvetler zaman bağımlı olarak saniyede 50 adet voltaj şeklinde kaydedilmiştir. Bu veriler oluşturulan bir FORTRAN programıyla değerlendirilmiştir.

Sisteme son olarak, hidrolik güç ünitesinden eksenel yük silindirine basınçlı yağ taşıyan boru üzerine HYCON adı verilen bir kontrol sistemi monte edilmiştir. HYCON aracılığı ile sisteme uygulanacak en yüksek deney basıncı ayarlanır. Basıncın ayarlanan bu değere ulaşmasından sonra sistem basıncı, HYCON aracılığı ile otomatik olarak kısa devre edilir. Böylelikle sistemin belirli bir basıncın üzerine kontrolsüz olarak çıkması tamamen engellenmiş olur. HYCON cihazının sayısal göstergesindeki değerin basınç olarak karşılığı;

$$P = \frac{1}{0.0000017603}(X - 0.074201) \quad (1)$$

bağıntısından elde edilmektedir. Bu bağıntıda, P numunedeki yüzey temas basıncını [psi], X ise volt değerini [V] ifade etmektedir.

Deney Numuneleri

Deney numuneleri Şekil 3’de görüldüğü gibi erkek ve dişi parçalar şeklinde imal edilmiştir.

Ayrıca erkek numunenin iç kısmına ve dişi numunenin dış kısmına, yüzey basıncından dolayı deforme olup eş çalışma mekanizmasını bozmamaları için toleranslı olarak takılan kalın destek parçaları da (bilezik ve tabla) Şekil 3’de görülmektedir. Malzeme olarak, Sumitomo Metal Inc. firması tarafından testleri istenilen L80 ve J55 standart kodlu boru malzemeleri kullanılmıştır. Tablo 1’de ayrıca L80 ve J55 standart malzemelerinin kimyasal kompozisyonu verilmektedir.

Yağlayıcı

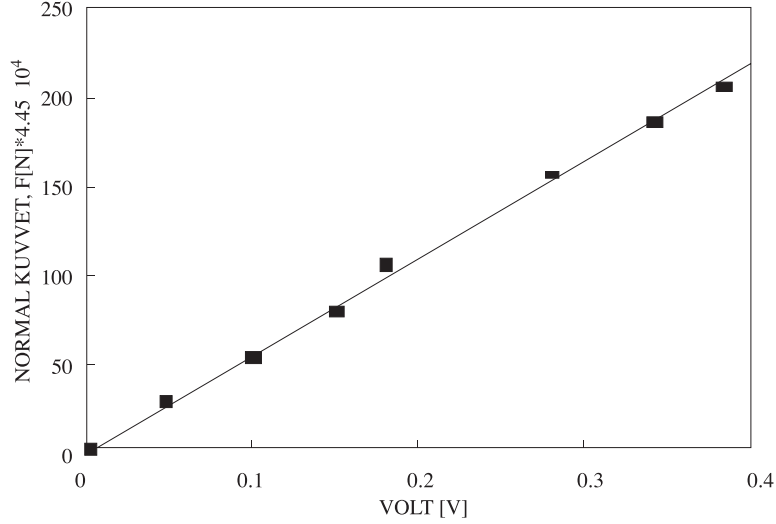
Deneylerde, API Bul5A yağlayıcısı kullanılmıştır. Yağlayıcı, deney öncesinde iyice karıştırılarak homojen hale getirilip, numunelerin temas yüzeylerine itinalı bir şekilde sürülmüştür.

Yukarı-Aşağı(Up-and-Down) Tekniği

Yukarı-aşağı tekniği, istatistiksel bir yöntem olarak, deney sonuçlarının değerlendirilerek yorumlanabilmesi amacıyla kullanılmıştır. (Ertaş ve

Jones, 1994). Bu istatistiksel yöntemde ana amaç, mümkün olabildiğince az sayıdaki deneylerle sonuca ulaşabilmektedir. Öncelikle bağımsız değişken değerleri, belirlenen sabit bir artımla tesbit edilmektedir. Daha sonra, herhangi bir bağımsız değişken esas alınıp deney yapılarak, deney sonucunda beklenen durumun gerçekleşip gerçekleşmediği gözlenir. Eğer beklenen durum gerçekleşmiş ise, o deneyin sonucuna “oldu” anlamında ‘X’ sembolü konulur ve bir sonraki deney, bir alt bağımsız değişken esas alınarak yapılır. Deney sonrasında beklenen durum gerçekleşmezse, o deneyin sonucuna “olmadı”

anlamında ‘0’ sembolü konulup yeni deney, bir üst bağımsız değişken esas alınarak yapılır. Böylelikle beklenen durumun gerçekleştiği (metal transferi olduğu) deneylerde ‘X’ sembolü kullanılarak bir alt bağımsız değişken esas alınarak, beklenen durumun gerçekleşmediği (metal transferi olmadığı) deneylerde de ‘0’ sembolü kullanılarak bir üst bağımsız değişken esas alınarak test numuneleri sayısınca deneyler tekrarlanır. Deney sonuçlarını içeren semboller bir tabloya kaydedilerek beklenen durumun gerçekleştiği ve gerçekleşmediği deney sayısı tesbit edilir.



Şekil 2. Dayanma bileziğinin kalibrasyon grafiği.

Deney sonuçları sembollerini içeren tablodaki ilk sütun sabit artımlı bağımsız değişken değerlerini göstermektedir. Eğer, ilk bağımsız değişken esas alınarak yapılmış olan deneylerde, beklenen durum hiç gözlenememişse o satır değerlendirilmeye alınmamaktadır. Bu şartlar altında;

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 n_i \quad (2)$$

$$N = \sum_{i=0}^k n_i \quad (3)$$

$$A = \sum_{i=0}^k i n_i \quad (4)$$

olmak üzere,

$$\bar{x} = D_0 + I \left(\frac{A}{N} \mp \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

bağıntısından metal transferinin gerçekleştiği ortalama bağımsız değişken değeri elde edilir. Bu bağıntıdaki D_0 analizin yapıldığı ilk bağımsız değişken değerini ve I artım değerini ifade etmektedir. Ayrıca, $+1/2$ metal transferinin gerçekleşmediği değerin istenmesi durumunda ve $-1/2$ metal transferinin gerçekleştiği değerin istenmesi durumunda kullanılacaktır. Standart sapma

$$S = 1.620I \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad (6)$$

bağıntısından ve nominal değerin standart sapması ise,

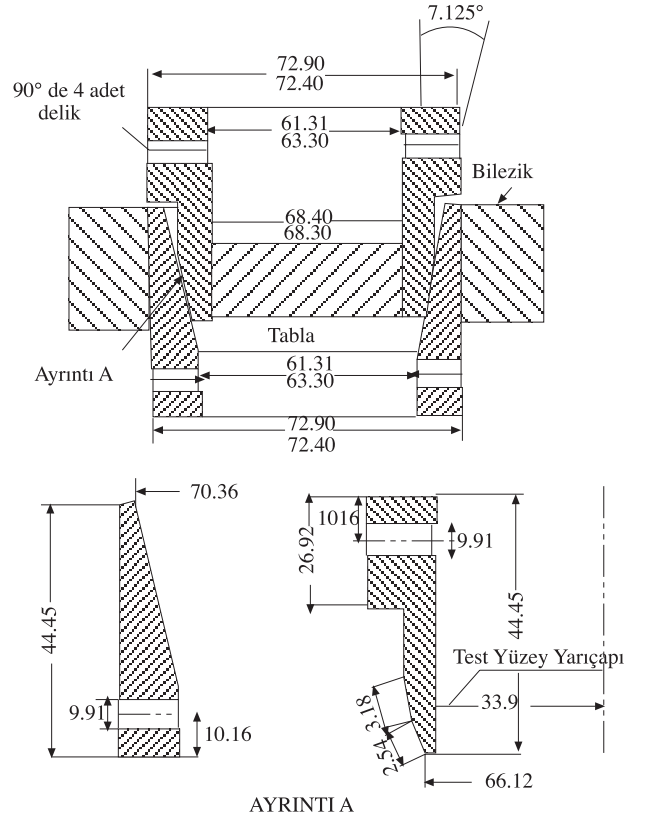
$$S_{\bar{x}} = \frac{6S + I}{7N^{0.5}} \quad (7)$$

bağıntısından hesaplanmıştır.

Deneylerin Yapılışı

Deney numunelerinin talaşlı imalatından sonra, yüzey pürüzlüğü ölçümü yapılmıştır. Mitutoya Surfes 201 serisi yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak Ra aritmetik sapma ve Rq kök aritmetik sapma değerleri ölçülmüş ve bu değerlere göre malzeme çiftleri sınıflandırılmıştır. Deneylerde kullanılan malzeme çiftleri için Ra=1.27 ila 1.4 µm (50 ila 55 µin.) ve Rq=1.63 ila 1.75 µm (64 ila 69 µin.) olarak alınmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm ve sınıflandırma işleminden sonra, iç ve dış destek parçaları deney numunelerine takılmıştır. Dişi numune, alt tablaya bağlı adaptörün üzerine, erkek numune ise shaft üzerindeki yuvasına yerleştirilmiştir. Adaptör ve destek parçalarına bulaştırmamaya özen gösterilerek numunelerin üzerine yağlayıcı sürülmüştür. Başlangıç değerlerinin referans olması amacıyla mesafe değişim algılayıcısındaki voltaj değeri kaydedilmiştir. Üst tabla ve ona bağlı sistem aşağıya indirilerek küresel adaptör yardımı ile uniform bir oturmanın gerçekleşmesi sağlanmıştır. Sisteme daha sonra devir sayısı, aksel yük ve uygulanma süresi, yük değişim hızı gibi başlangıç değerleri verilerek deney başlatılmıştır. Deney sonuçları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'e aktarılmıştır.



Şekil 3. Deney numunelerinin geometrik görünüşü.

Tablo 1. L80 Standart malzemesinin kimyasal analiz sonuçları.

	Kimyasal Analiz										
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Va	Al
L80	.27	1.28	.009	.12	.012	.02	.03	.05	.02	.001	0.026
J55	.35	1.50	.03	1.00	.35	.15	-	-	-	-	-

Tablo 2. Sabit devir sayısında L80 standart malzemesinin metal transferi deney sonuçları.

Test no:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	X	0	
555					X		X														2	0
486				0		0		X		X		X									3	2
417			0						0		0		X				X		X		3	3
348		0												X		0		0			1	3
279	0														0						0	2
Toplam:																					9	10

Nominal temas gerilmesi [MPa]	i	n_i	in_i	$i^2 n_i$
555	3	2	6	18
486	2	3	6	12
417	1	3	3	3
348	0	1	0	0
	N=9	A=15	B=33	

Ortalama $X = 50,5 + 10(15/9 - 1/2) = 62.17$ kpsi = 428 MPa. Ortalama değer sapması $S_x = 4.25$ kpsi = 29.3 MPa

Tablo 3. Sabit devir sayısında J55 standart malzemesinin metal transferi test sonuçları.

Test no:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	X	0		
462											X									X	0	
407						X				0		X									2	1
352			X		0		0		0				X		X						3	3
297		0		0				X						0		X			X		3	3
242	0																	0			0	2
Toplam:																				9	9	

Nominal temas gerilmesi [MPa]	i	n_i	in_i	$i^2 n_i$
462	3	1	3	9
407	2	2	4	8
352	1	3	3	3
297	0	3	0	0
		N=9	A=10	B=20

Ortalama $X = 43 + 8(10/9 - 1/2) = 42.2$ kpsi = 318 MPa. Ortalama değerin sapması $S_x = 4.15$ kpsi = 28.6 MPa

Tablo 4. Sabit normal kuvvetle L80 standart malzemesinin metal transferi test sonuçları.

Test no:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	X	0
1.75		X													1	0
1.5		0	X				X								2	1
1.25				X		0		X		X		X			4	1
1.0					0				0		0		X		1	3
0.75														0	0	1
Toplam:															8	6

Çevre Hızı [rpm]	i	n_i	in_i	$i^2 n_i$
1.75	3	1	3	9
1.50	2	2	4	8
1.25	1	4	4	4
1.0	0	1	0	0
		N=8	A=11	B=21

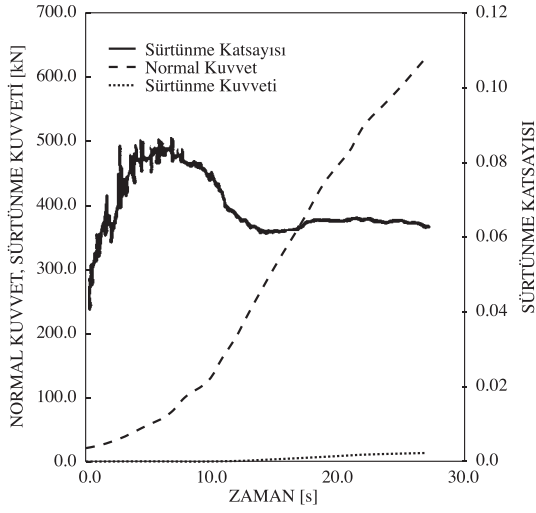
Ortalama $X = 1 + 0.25(11/8 - 1/2) = 1.218$ rpm = 0.0203 1/s Ortalama değerin sapması $S_x = 0.3264$ rpm = 0.0544 1/s

Deneyleyler, 1.05 rpm (0.0175 1/s) ve 3.05 rpm (0.0508 1/s) sabit devir sayılarında, sabit artımlı normal kuvvet ve kademeli artımlı normal kuvvet olmak üzere iki kuvvet serisinde 19000 lb (84.5 kN)'dan 65000 lb (289 kN)'a kadar attırılarak yapılmıştır. Sonrasında ise, metal transferi olayının gözlemlendiği ortalama basınç değerlerini sağlayan yük sabit tutularak, L80 standart malzemenin değişik devir sayılarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde sabit yük altında sürtünme katsayısının ve sürtünme momentinin devir sayısı ile olan değişimi ve yüzeyden metal transferi olayının gerçekleştiği şartlar araştırılmıştır. Bunun için, devir sayısı 0.75 dev/dak (0.0125 1/s) başlangıç değerinden başlayarak 1.75 dev/dak (0.0292 1/s) değerine kadar arttırılmıştır.

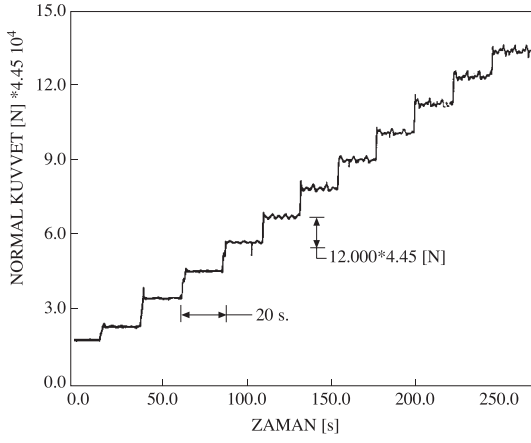
İlk seri deneylerde, Şekli 4'de görülen normal kuvvetin zamana göre değişimi, sürekli artan bir karakterde olacak şekilde uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvetin sonucunda elde edilen sürtünme kuvvetinin ve sürtünme katsayısının değişimi de Şekil 4'de görülmektedir.

Daha sonraki deneyler, Şekil 5'deki gibi kademeli normal kuvvet değişimi uygulanarak yapılmıştır. Normal kuvvetin kademeli uygulanması sonucunda elde edilen sürtünme katsayısının değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.

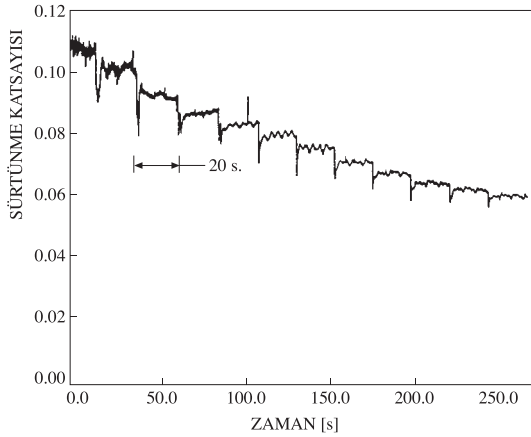
Şekil 7 ve 8'de ise, J55 ve L80 standart malzemelerinin her birisi için yapılan altışar adet deney sonuçları verilmiştir. Şekil 9'da ise, Şekil 7 ve 8'deki deneylerin ortalamaları alınarak malzeme farklılığının etkisi gösterilmiştir.



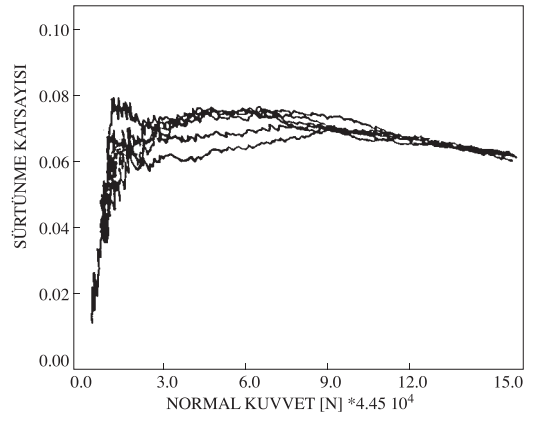
Şekil 4. Uygulanan normal kuvvetin, sürtünme katsayısının ve sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi.



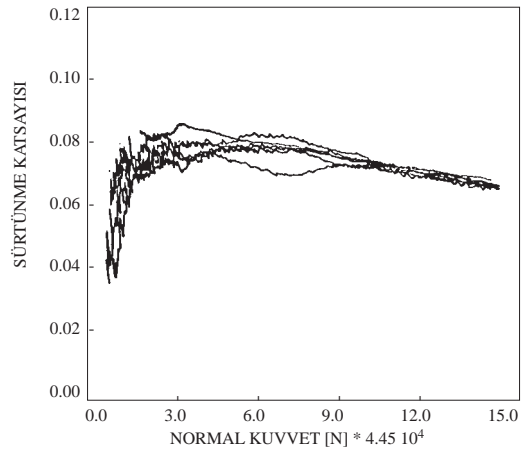
Şekil 5. Kademeli artırılan normal kuvvetin zamana göre değişimi.



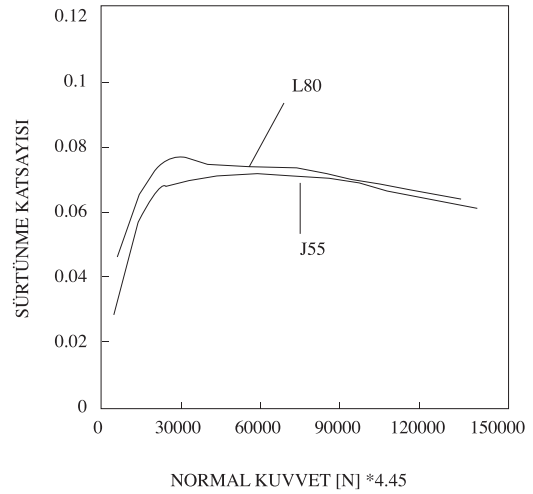
Şekil 6. Kademeli artırılan normal kuvvete göre sürtünme katsayısının değişimi.



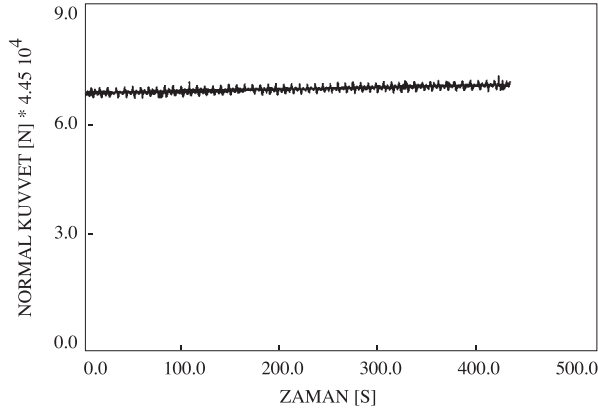
Şekil 7. J55 Kodlu malzemenin sürtünme katsayısının normal kuvvete göre değişimi.



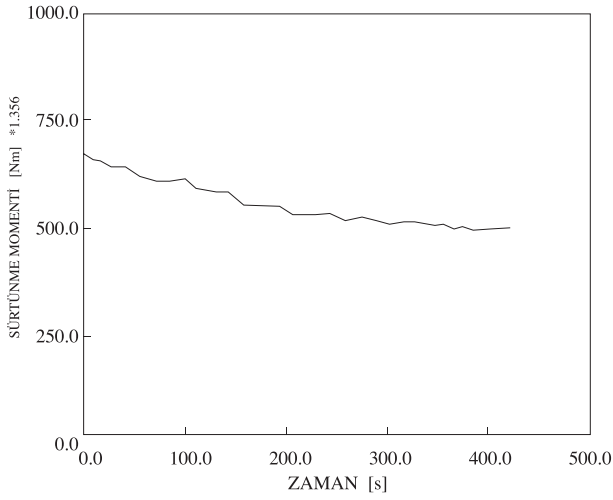
Şekil 8. L80 Kodlu malzemenin sürtünme katsayısının normal kuvvete göre değişimi.



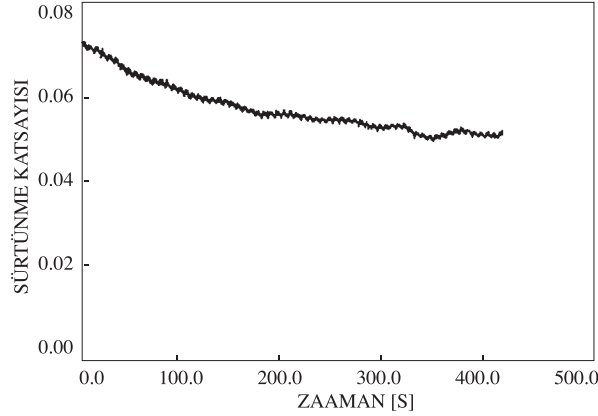
Şekil 9. Ortalama değerlerle her iki numune için sürtünme katsayısının normal kuvvete göre değişimi



Şekil 10. Normal kuvvet yüklemesi diyagramı.



Şekil 11. Sabit yük altında sürtünme momentinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 12. Sabit yük altında sürtünme katsayısının zamana bağlı olarak değişimi.

Son olarak, Şekil 10'da 7000 lb (31.15kN) sabit normal kuvvet uygulanması durumunda, sürtünme

momentinin zamana göre değişimi Şekil 11'de ve sürtünme katsayısının zamana göre değişimi ise Şekil 12'de verilmiştir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, birbiri ile eş çalışan parçalarda, devir sayısı sabit tutularak uygulanan, sürekli ve kademeli artımlı normal kuvvet değerlerinde deneyler yapılarak sürtünme katsayısının ve sürtünme momentinin değişimi ve değişik malzemelerin sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, yukarı-aşağı tekniği kullanılarak malzemelerin akma gerilmeleri istatistiksel olarak elde edilmiştir. Birinci grup deneylerde, Şekil 4'de görüldüğü üzere normal kuvvetin sürekli artırılması durumunda sürtünme katsayısı ilk hareket nedeniyle kararsız bir şekilde önce artmakta sonra azalma gösterip sabite yakın bir değerde kalmaktadır. İkinci grup deneylerde ise, normal kuvvet kademeli olarak ve her bir kademede 2640 N'luk yük artımı ve 20 saniyelik süre ile 12 kademede Şekil 5'de görüldüğü gibi uygulanmıştır. Normal kuvvetin kademeli uygulanması sonucunda sürtünme katsayısı da Şekil 6'daki gibi kademeli olarak azalma yönünde davranış göstermektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de sırası ile J55 ve L80 standart malzemelerine ait altışar adet deney sonuçları görülmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'deki deneylerde, normal kuvvet Şekil 4'deki gibi yüklenmiştir. Bu iki şekilden de görüldüğü gibi, sürtünme katsayısı önce kararsız olarak artmaktadır. Bunun en önemli sebepleri arasında, başlangıçta sürtünme yüzeyleri oluşmadığından sürtünme katsayısı hesabının sağlıklı yapılamaması ve deney numunelerindeki yüzey pürüzlülüğü sebebiyle yüzeylere sürülen yağlayıcının yağlama görevini tam yapamaması verilebilir. Sonrasında ise, sürtünme yüzeylerinin birbirlerine alışmaları sonucunda ve aradaki yağlayıcının etkisi ile sürtünme katsayısında azalma görülmektedir. Şekil 9'da J55 ve L80 standart malzemelerine ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, değişik malzemelere ait sürtünme katsayılarının, artan normal kuvvet ile azalma karakterleri fazla miktarda etkilenmemektedir. Sürtünme katsayıları, malzeme çiftine bağlı olarak belirli bir değer almakta fakat daha sonrasında normal kuvvetin artırılması ile bu değerler arasındaki fark azalma eğilimi göstermektedir.

Son seri olarak yapılan deneylerde ise Şekil 10'da görüldüğü gibi 420 saniyelik süre boyunca normal kuvvet sabit tutulmuştur. Bunun neticesinde

sürtünme momenti ve sürtünme katsayısı Şekil 11 ve 12'de sırası ile görüldüğü gibi belirgin bir seyrinde düşme göstermiştir. Sabit normal kuvvet uygulanmasına rağmen, yukarıda açıklandığı üzere bu düşüş, yüzeylerin birbirine alışması ve yağlayıcının etkisiyle oluşmaktadır.

Deneylerde uygulanan gerilmeler malzemelerin akma sınırları içinde tutulmuştur. Deney sonuçları, makaledeki şartlar ve malzemeler için geçerli olup elde edilen grafiklerde, sürtünme katsayısının genel değişimi önce artan sonra azalan şekilde gözlenmiştir. Bu, literatürle uyuşan ve beklenen bir davranıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve başlangıçta deney çiftinin yüzey temasının çok iyi olmaması nedeniyle oluşan gerilme konsantrasyonu gibi nedenlerle sürtünme katsayısı önce yüksek değerlere

ulaşmaktadır. Daha sonra, eksenel yükün giderek artması veya statik yük durumunda yüzey temasının iyileşmesi (sabit deney numunesinin bağlandığı küresel sistem ile), yüzey pürüzlülüklerinin zamanla düzelmesi ve yağlayıcının etkisiyle yüzeylerin birbirine alışması, sürtünme katsayısında giderek azalmaya neden olmaktadır.

Bu deneylerden, sürtünme katsayısının kullanılan malzemenin ve zamanın bir fonksiyonu olduğu anlaşılmaktadır. Büyük bilgisayar belleği kullanıp, uzun süreli deneyler yaparak, sabit normal kuvvet etkisi altında sürtünme katsayısının değişimi incelenebilir. Deneylerin, farklı malzeme çiftleri kullanılarak tekrarlanması halinde, bulunan sonuçlardan genel bir yorum yapma imkanı doğabilir.

Kaynaklar

Carper, H.J., Ertas, A., Çuvalcı., O., "Nonlinear Friction, Measurement Program" Final Report, Texas Tech University, October 1990

Carper, H.J., Ertas, A., Issia, J., Çuvalcı., O., "Effects of Some Material Manufacturing and Operating Variables on the Friction Coefficient in OCTG Connections" ASME, Journal of Tribology, 114, 698-705 1992

Ertas, A., Carper, H.J., Çuvalcı., O., Ekwaro-Osire, S., Blackstone, W.R., "Experimental Investigation of Galling Resistance in OCTGConnections" ASME, Offshore and Arctic Operations Symposium, 15-20 1990

Ertas, A., Jones, J., "The Engineering Design Process" John Wiley and Sonc Inc. New York 1994

Merchant, M.E., "Friction and Adhesion" Interdisciplinary Approach to Friction and Wear, ed., P.M.KU., NASA SP-181 Washington, D.C., 181-265 1968