PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
6. DENİZLİ MALZEME SEMPOZYUMU
12-13-14 NİSAN 1995 DENİZLİ

PİM-DİSK SÜRTÜNME SİSTEMİNDE TEMAS YÜZEYİ SICAKLIĞININ VE SÜRTÜNME ISISININ TEORİK VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Durmuş ODABAŞ* M. Baki KARAMIŞ** Nafiz KAHRAMAN***

ÖZET

Bu çalışmada kuru sürtünme şartları için pim-disk sisteminin temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme ısısı teorik ve deneysel olarak belirlenmiştir. AISI 3315-3150 çelik çifti üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sabit kayma hızı (1 m/s) ve değişik yüklerde (30-300 N) gerçekleştirilmiş ve CrNi-Ni termoelemanı kullanılarak sürtünme çiftlerinin hacim sıcaklıkları ölçülmüştür. Deneysel değerler teorik bağıntılarda kullanılarak sürekli rejim şartları için pim ve diskin görünen temas yüzeyi sıcaklığı ve ısı değerleri hesaplanmıştır.

Görünen temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme ısısının yükteki artışla artığı, sürtünme ısısının büyük bir kısmının ise diske transfer olduğu tespit edilmiştir.

ABSTRACT

In this study, the contact surface temperature and the friction heat of the pin-on disc system have been investigated theoretically and experimentally for dry sliding conditions. The experimental studies carried out on AISI 3315-3150 steel pair were conducted at a constant speed of 1 m/s with the different loads arranged from 30 to 300 N. During the tests, the bulk temperatures of the sliding pairs has been measured by means of a NiCr-Ni thermocouple. For the steady state conditions, the apparent contact surface temperature and the friction heat of pin and disc were calculated by using the experimental values in the theoretical equations.

It has been found that the apparent contact surface temperature and the frictional heat increase with an increase in load and a great deal of the frictional heat transfers in to the disc

1. GİRİŞ

Birbiri üzerinde kayma hareketi yapan elemanlara sahip fren, kavrama, yatak, dişli ve kesici takım gibi makina elemanlarının aşırı yükleme ve yüksek kayma hızı altında, temas yüzeylerinde termal deformasyon, termomekanik kararsızlık ve gerilme yığılması ile sıcaklık artışları gibi malzemelerin tribolojik davranışlarını etkileyen olaylar meydana gelir [1]. Sürtünme ısısının çoğunun temas yüzeyi ile yüzeyaltı tabakalarında üretildiği kabul edilir [2]. Temas eden yüzeyler arasında oluşan mikro kaynak bağlarının kırılması ve malzeme dokusunun plastik olarak deformasyona uğraması esnasında ortaya çıkan ısı sürtünme ısısını meydana getirir. Bu ısının tamamı temas eden cisimler arasında dağılarak sürtünme yüzeylerinde hissedilir bir sıcaklık artışına neden olur [2-4].

* Yrd.Doç.Dr., Erciyes Üniv., Mühendislik Fakütesi, Kayseri.
** Prof.Dr., Erciyes Üniv., Mühendislik Fakültesi, Kayseri.
*** Yrd.Doç.Dr., Erciyes Üniv., Mühendislik Fakültesi, Kayseri.

Teknik kuru sürtünmeli sistemlerde temas yüzeyi ile ilgili üç tür sıcaklık tanımlanır : 1) Gerçek temas alanındaki ani sıcaklık artışı yani parlama (Flash) sıcaklığı (ΔT_{pm}), 2) Gerçek temas alanının maksimum sıcaklığı (T_{maks}) ve 3) Görünen temas alanının ortalama sıcaklığı (T_o). Sürtünme esnasında gerçek temas alanında meydana gelen maksimum temas sıcaklığı $T_{maks} = T_o + \Delta T_{pm}$ eşitliği ile ifade edilmektedir [4].

Kayma teması yapan yüzeylerdeki temas sıcaklığının hesabı için bir çok teori geliştirilmesine rağmen yapılan kabullerin tam geçerli olmaması nedeniyle bu teorilerin pratiğe uygulanmaları mümkün olamamıştır. Hatta teorik ve deneysel değerler arasında % birkaç yüze varan farklar olduğu tespit edilmiştir [5]. Bu sebeble temas sıcaklığının belirlenmesinde daha çok deneysel usullere yer verilerek ölçülen sıcaklık değerleri sınır şartları olarak kullanılmış ve nümerik değerler hesaplanmıştır [6].

Bu çalışmada pim-disk sisteminde ısı transfer olayı teorik olarak analiz edilerek görünen temas alanının sıcaklığı (T_o) ile pim ve diske giren ısı miktarlarına ait bağıntılar elde edilmiştir. Deneysel değerler teorik bağıntılarda sınır şartları olarak kullanılmış ve nümerik degerler hesaplanmıştır.

2. PİM-DİSK KAYMA SİSTEMİNDE ISI TRANSFERİNİN TEORİK ANALİZİ

Bu teorik analizde matematiksel karmaşıklığı azaltmak ve daha pratik çözüm sağlamak için aşağıdaki kabuller yapılmıştır [7]:

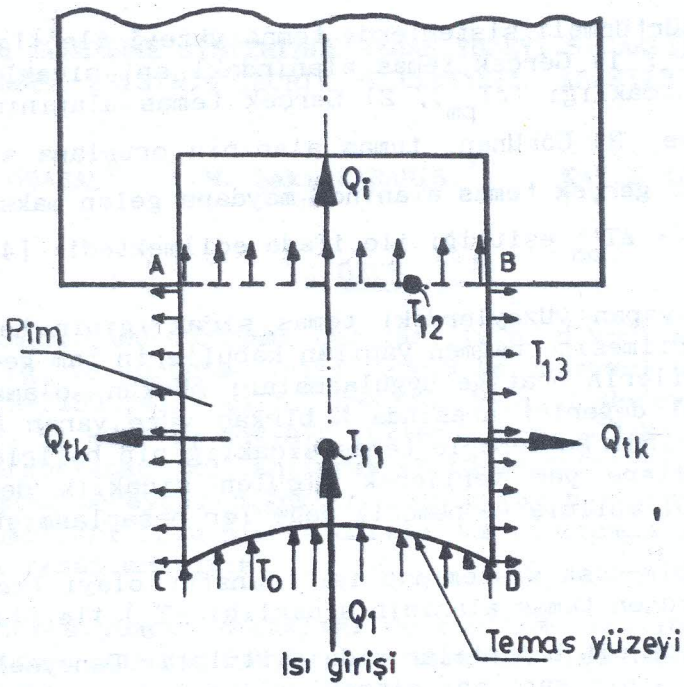
1) Disk sonlu uzunlukta bir karşı sürtünme elemanıdır.
2) Pim dönme hareketi yapan disk üzerinde dairesel kesitli bir kanat rolü oynar.
3) Atmosfere açık yüzeylerden pimden tabii konveksiyonla, diskten ise zorlanmış konveksiyonla ısı kayıbı olur.
4) Pim küçük kesitli ve sonlu uzunlukta durgun bir elemandır.
5) Aşınan yüzeylerden açığa çıkan ısı pime tek boyutlu, diske ise iki boyutlu olarak iletimle geçer.
6) Pimin kesitinde ısı akışı lineer olup, sıcaklık üniformdur.
7) Sistem kısa sürede sürekli rejime ulaşır.
8) Temas üniform olup, aşınma kayıpları ihmal edilmektedir.

2.1. Pimdeki Isı Transfer Olayının Analizi

Şekil-1'de görülen ısı transfer modeline göre pim ile disk arasındaki temas yüzeyinin genişliği pimin çapı $d_1 = 2r_1$ [m]'e eşit olup, tutucu dışında kalan L_1 [m] yüksekliğindeki parçasının dairesel kesitli bir kakanat rolü oynadığı kabul edilmiştir. Bu parça için temas yüzeyinden içeri sürekli rejimde tek boyutlu ısı iletimi

$$(\partial^2 T/\partial x^2) - m^2 T = 0 \qquad (1)$$

denklemi ile ifade edilebilir [8]. Bu denklemin genel çözümü



Şekil- 1: Pimin ısı tranfer modeli

$$T_{1x} = A\, e^{mx} + B\, e^{-mx} \qquad (2)$$

olup, pime ait x = 0 için T = T_o ve x = L_1 için T = T_{12} sınır şartlarını kullanarak $T_{12} = A\, e^{mL_1} + B\, e^{-mL_1}$ ve $T_o = A+B$ değerleri bulunur. Bu ifadeler (3) denkleminde yerine konursa, pimin temas yüzeyinden her hangi bir (x) uzaklığındaki hacim sıcaklığı

$$T_{11} = [T_o \sinh m(L_1-x) + T_{12} \sinh (mx)] \,/\, \sinh (mL_1) \qquad (3)$$

denklemiyle hesaplanır. Buradan pimin görünen temas yüzeyinin ortalama sıcaklığı ise

$$T_o = [T_{11}.\sinh(mL_1) - T_{12}.\sinh(mx)] \,/\, \sinh m(L_1-x) \qquad (4)$$

ifadesinden hesaplanır. T_{11} ve T_{12} hacim sıcaklıkları deneysel olarak ölçülerek T_o sıcaklığını nümerik olarak hesaplamak mümkündür. Diğer yandan $m = \sqrt{\alpha_1 P_1 / A_1 \lambda_1}$ olarak hesaplanır. Burada $P_1 = \pi d_1$ [m] pimin çevresi, $A_1 = \pi d_1^2 / 4$ [m^2] pimin kesit alanı ve λ_1 [Watt/m^oK] ise pim malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Pim numunenin atmosfere açık yüzeyine ait tabii konveksiyonla ısı transfer katsayısı

$$\alpha_1 = 1.22[\,(T_{13} - T_ç)/\, d_1] \quad [\text{Watt}/m^oK] \qquad (5)$$

bağıntısından bulunur [9]. Burada T_{13} pimin dış yanal yüzey, $T_ç$ ise çevre sıcaklığını ifade eder. Sürekli rejimde pime giren toplam (Q_1) ısısını bulmak için pimin tutucu dışında kalan L_1 boyundaki (ABCD) elemanının ısı dengesini yazmak yeterlidir. Aşınan (CD) yüzeyinden pime Q_1 ısısı girerken , (AB) kesitinden iletimle Q_i ısısı, yanal yüzeyden de tabii konveksiyonla Q_{tk} ısısı atılır. Buna göre pime giren toplam ısı $Q_1 = Q_i + Q_{tk}$ [Watt] olarak ifade edilir. T_{11}, T_{12}, T_{13} ve $T_ç$ sıcaklıkları bilindiği taktirde , pime eksenel yönde iletimle giren ısı miktarı

$$Q_i = \lambda_1 A_1 (T_{11}-T_{12}) / (L_1 - x) \quad [Watt] \qquad (6)$$

denklemi ile ve pimin çevreye açık yanal yüzeyinden tabi konveksiyonla atılan ısı miktarını da $Q_{tk}= 2\pi r_1 L_1 \alpha_1 (T_{13}-T_ç)$ [Watt] denklemi ile hesaplamak mümkündür.

2.2. DİSKTEKİ ISI TRANSFERİNİN ANALİZİ

Karşı sürtünme elemanı olan disk tahrik mili ile beraber döndüğünden diske giren toplam (Q_2) ısısı radyal ve eksenel yönde iletimle hacim içine yayılır. Diskin atmosfere açık yüzeylerinden zorlanmış konveksiyonla ısı kayıbı olur. Dönen diskin ısı transfer modeli Şekil-2 a'da görülmektedir. Diske tüm çevreden üniform ısı girdiği kabul edilmektedir. Gerçekte ise diske sadece pimle temas eden yüzeyden ısı girer. Diskin sürtünme yüzeyinden itibaren (Δr) kalınlığında bir çevresel eleman ele alalım (Şekil -2 b). Bu elemanın yanal yüzeyi çok küçük olduğu için bu yüzeyden zorlanmış konveksiyonla ısı kayıbı ihmal edilebilir. Bu nedenle bu elemanı sonsuz uzunlukta bir silindir gibi düşünebiliriz. Diskin dış yüzeyindeki ($r = r_{d1}$) sıcaklık (T_o), içteki ($r = r_{d2}$) hacim sıcaklığı ise T_{d1} olduğuna göre diske radyal yönde giren ısı miktarı

$$Q_R = 2\pi \lambda_2 b [T_o-T_{d1}] / \ln(r_{d1}/r_{d2}) \qquad (7)$$

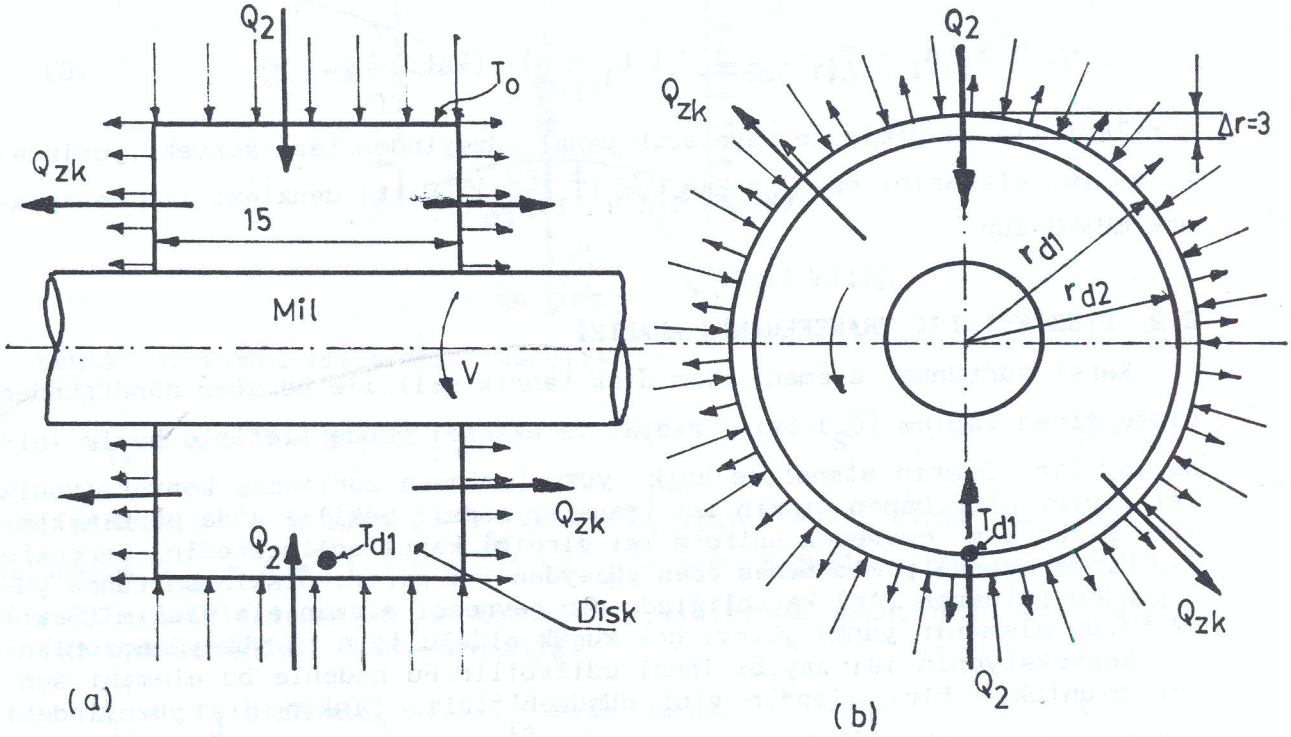
ifadesiyle hesaplanabilir [10]. Burada b [m] diskin genişliği, λ_2 [Watt/ m ^oK] disk malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Diskin çevresinden diske toplam (Q_R) ısısı girerken, aynı anda bu yüzeyden de zorlanmış konveksiyonla (Q_{zk}) ısısı kayıp olur ve bu ısı

$$Q_{zk}= 2\pi r_{d1} b \alpha_2 (T_o-T_ç) \qquad (8)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada (α_2) zorlanmış konveksiyonda ısı transfer katsayısı olup, Nusselt sayısı olarak bilinen

$$Nu = \alpha_2 d_2 / \lambda_o = C\,(Re)^n = C\,[v\,d_2/\nu_o]^n \qquad (9)$$

ifadesinden hesaplanır [9]. Burada (λ_o) ve (ν_o) sırasıyla havanın ısı iletim ve kinematik viskozite katsayılarıdır. C ve n katsayıları Reynold (Re) sayısına göre Tablo-1'den tespit edilir. (ν_o) ve (λ_o) değerleri $t_f = (t_o+t_ç)/2$ [C°] ortalama filim sıcaklığına göre hazırlanan ve kaynak [9]' da mevcut olan tablodan alınabilir.



Şekil-2 : Diskin ısı transfer modeli

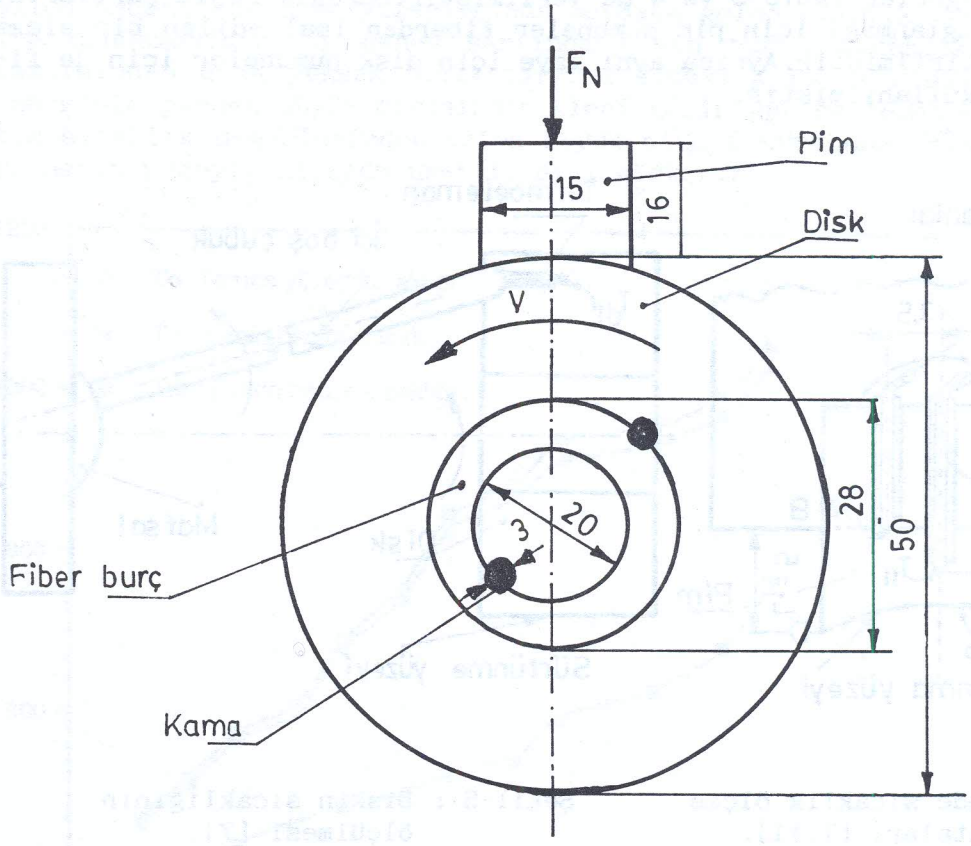
Diske radyal yönde iletimle geçen net ısı $Q_2 = Q_R - Q_{zk}$ [Watt] olarak hesaplanabilir. Fakat zorlanmış konveksiyonla atılan ısı diske giren toplam (Q_R) ısısının yanında çok az olduğundan ihmal edilebilir. Buna göre diske sürekli rejimde giren toplam ısı $Q_2 = Q_R$ olarak yazılabilir. Pim-disk kayma sisteminde sürtünme esnasında oluşan toplam ısı $Q_T = Q_1 + Q_R$ şeklinde hesaplanabilir. Ayrıca ısı oranı da $a = Q_1/Q_R$ bağıntısından hesaplanır.

Tablo-1 : Diske dik akışta gazlar için C ve n değerleri [9]

Re	C	n
0.4-4	0.891	0.330
4-40	0.821	0.385
40-4000	0.615	0.466
4000-40000	0.174	0.618
40000-400000	0.0239	0.805

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kuru sürtünme şartlarında yapılan deneylerde Şekil-3'de geometrisi görülen pim-disk kayma sistemi kullanılmıştır. Deney tesisatı hakkında ayrıntılı bilgiler kaynak [7] ve [11]'de mevcuttur.



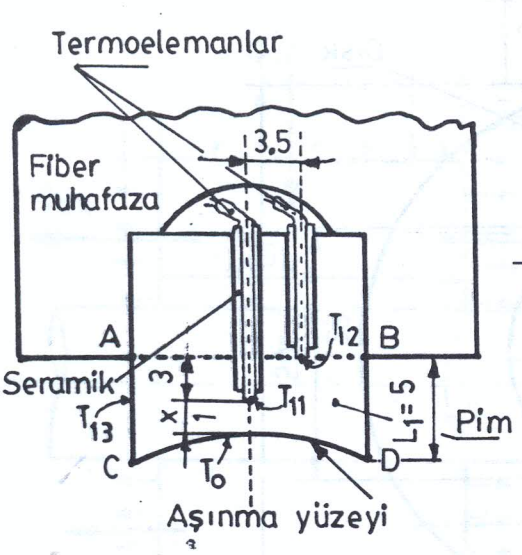
Şekil-3 : Sürtünme elemanlarının geometrisi [7,11].

Deneylerde pim malzemesi olarak AISI 3315 çeliği, disk için ise AISI 3150 çeliği kullanılmıştır. Aynı yarı mamül çubuklardan talaşlı imalat ile hazırlanan pim numunelere sadece normalizasyon, disklere ise hem normalizasyon ve hem de yağda sertleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Aşağıdaki Tablo-2'de deney malzemelerinin kimyasal analizleri ve sertlik degerleri verilmiştir. Deneylerden önce numunelerin temas yüzeyleri taşlanarak yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Deneyler esnasında Şekil-4 ve 5'de belirtilen noktalardan pim ve disk numunelerin hacim sıcaklıkları [K] tipi Ni-CrNi termoelemanları kullanılarak ölçülmüştür. Pim numunelerde termoelemanların temas uçlarının haricinde numuneye temas etmemesi ve yüksek sıcaklıktan etkilenmemesi için deliklere seramik tüpler takılmıştır (Şekil-4). Diğer yandan disklerin sıcaklığını ölçmek için diskle beraber bir mafsal etra-

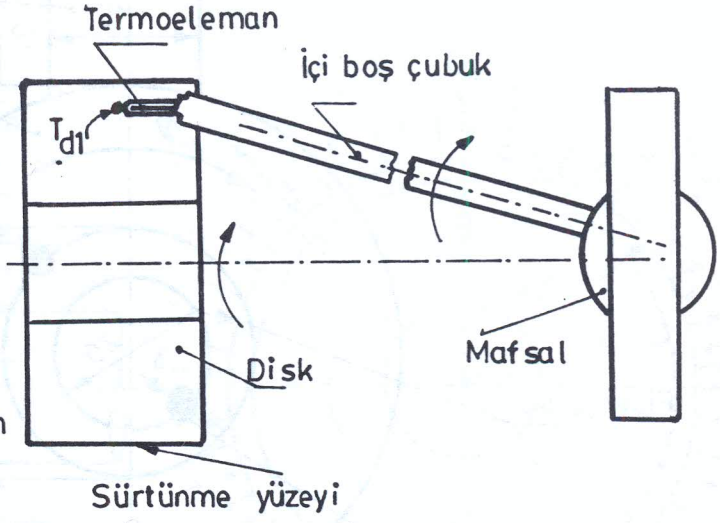
Tablo-2 : Deney malzemelerinin kimyasal bileşimleri

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%)							Sertlik
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	(HV30)
AISI 3315	0.15	0.7	0.21	0.03	0.029	0.8	3.5	260
AISI 3150	0.48	0.85	0.20	0.02	0.021	0.85	1.25	750

fında dönen termoeleman kullanılmıştır (Şekil-5). Sürtünme deneyleri 1 m/s'lik sabit kayma hızı ve 30-300 N arasında değişen normal yükleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney süresi 25 dakika olarak sabit tutulmuştur. Pim ve disk numuneler için sürekli rejim şartlarında ölçülen ve hesaplanan değerler Tablo-3 ve 4'de verilmiştir. Sürekli rejim şartlarının daha erken saglanması için pim numuneler fiberden imal edilen bir eleman içine yerleştirilmiştir. Ayrıca aynı gaye için disk numuneler için de fiber burçlar kullanılmıştır.



Şekil-4 : Pimde sıcaklık ölçme noktaları [7,11].



Şekil-5 : Diskin sıcaklığının ölçülmesi [7].

Tablo-3 : Isıl özelliklerin ve temas sıcaklığının yükle değişimi.

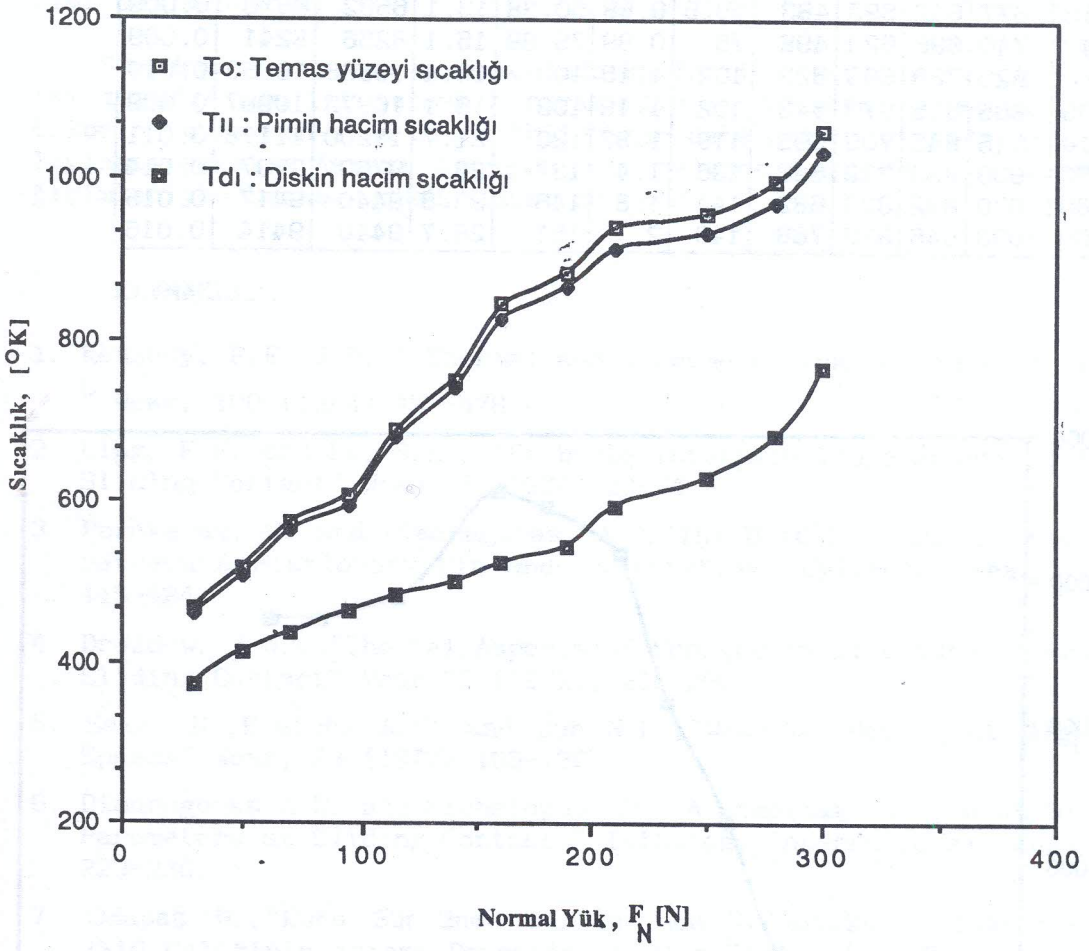
($T_ç$=303 ^oK, $\lambda_1=\lambda_2$=29 Watt/m^oK, A_1=176x10^{-6} m^2, P_1= 47x10^{-3} m)

v	F_N	Pim α_1	Pim m	Hava t_f	Hava λ_o	Hava ν_o	Disk		Disk α_2	T_o
[m/s]	[N]	[Watt/m^2^{o}K]	[m]	[^{o}C]	[Watt/m^{o}K]	[m^2/s]	Re	Nu	[Watt/m^2^{o}K]	[^{o}K]
	30	11.53	10	111	0.032	23	2168	22	14	467
	50	12.2	10.5	135	0.033	26	1923	21	14.2	515
	70	12.94	11	164	0.036	30	1648	19	14	572
	95	13.86	11.3	180	0.037	32	1548	19	14	605
	115	14.38	11.5	222	0.040	37	1333	19	14.5	688
1	140	14.74	11.6	254	0.042	42	1190	18	14.3	753
	160	15.18	11.8	301	0.045	47	1046	17	14.4	847
	190	15.28	11.8	320	0.046	50	985	16	14	885
	210	15.59	12	347	0.048	54	925	15	14.5	940
	250	15.78	12	356	0.049	55	893	15	15	956
	280	16.37	12.2	376	0.050	58	848	14	14	997
	300	17	12.5	407	0.052	63	785	14	14.5	1060

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Temas Yüzeyi Ve Hacim Sıcaklığının Yükle Değişimi

Şekil-6'dan da görüldüğü gibi sürekli rejim şartlarında temas yüzeyi sıcaklığı ve hacim sıcaklıkları yükteki artışla yükselmektedir. Bunun başlıca nedeni sürtünme yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyonun ısıya dönüşmesidir. Her deney şartında pimin hacim sıcaklıkları diskin sıcaklığından daha yüksek olmaktadır. Bu sıcaklık farkı diskin hareketli ve hacminin pimden büyük olmasından ileri gelir. Ayrıca temas sıcaklığının hacim sıcaklık değerlerinden daima büyük olması sürtünme ısısının yüzey veya hemen yüzeyin altında üretildiğini gösterir.



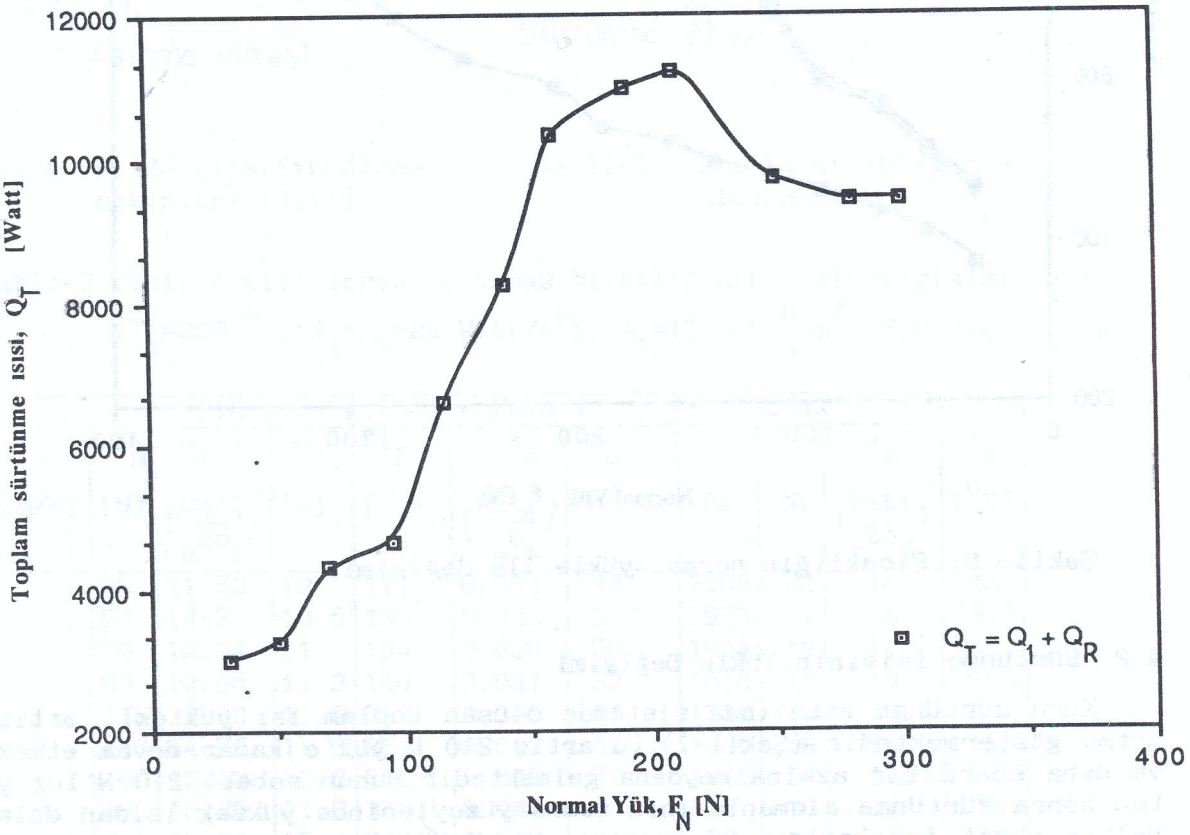
Şekil- 6: Sıcaklığın normal yükle ile değişimi.

4.2. Sürtünme Isısının Yükle Değişimi

Kuru sürtünme esnasında sistemde oluşan toplam ısı yükteki artışla artma göstermektedir (Şekil-7). Bu artış 210 N yük'e kadar devam etmekte ve daha sonra bir azalma meydana gelmektedir. Bunun sebebi 210 N'luk yükten sonra sürtünme elemanlarının temas yüzeylerinde yüksek ısıdan dolayı kalıcı oksit tabakasının oluşmasına ve sürtünme katsayısının azalmasına bağlanabilir.

Tablo-4 : Sıcaklık ve ısı değerlerinin yükle değişimi

v m/s	F_N [N]	Sıcaklık [°K] Pim T_{11}	Pim T_{12}	Pim T_{13}	Disk T_{d1}	Isı miktarları [Watt] Pim Q_i	Pim Q_{tk}	Pim Q_1	Disk Q_{zk}	Disk Q_R	Disk Q_2	Isı oranı a = Q_1/Q_R
1	30	459	434	423	373	42.5	0.29	42.79	5.39	3008	3002	0.014
	50	507	481	433	413	44	0.38	44.38	7	3264	3257	0.013
	70	563	533	493	436	51	0.52	51.52	8.8	4320	4311	0.011
	95	592	562	553	463	51	0.73	51.73	9.9	4672	4662	0.011
	115	677	642	593	483	59.5	0.88	60.38	13.1	6592	6579	0.009
	140	740	696	623	498	75	0.99	75.99	15.1	8256	8241	0.009
	160	828	769	663	523	102	1.15	103	18.4	10368	10350	0.010
	190	865	805	673	543	102	1.19	103	19.1	10976	10957	0.009
	210	915	845	703	593	119	1.32	120	21.7	11200	11178	0.011
	250	933	853	723	628	136	1.4	137	23	9760	9737	0.014
	280	970	882	823	682	144	1.8	146	22.8	9440	9417	0.015
	300	1033	945	873	768	149	2	151	25.7	9440	9414	0.016



Şekil-7 : Sürtünme ısısının yük ile değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tablo-4'deki ısı değerleri mukayese edildiğinde diskin pimden daha fazla ısı çektiği anlaşılır.Bunun başlıca nedenleri şunlar olabilir : 1) Disk hareketli, pim ise durgun olup, diskin hacmi pimin hacminin yaklaşık 39 katıdır.2) Pim bir ucundan fiber içine gömülerek izole edildiğinden ısı iletimi kısmen engellenmiştir.3) Pimin hacim sıcaklığının diskinkinden daha yüksek olması nedeniyle temas yüzeyinde pimden diske bir miktar ısı iletimi olur.4) Disk tahrik mili ile beraber döndüğünden radyal yöndeki ısı iletimi daha büyüktür.Ayrıca tahrik mili ekseni boyunca ısı iletimi söz konusudur.

Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan her deney sistemi için bir ısı tranfer analizi yapmakla sıcaklığın ve sürtünme ısısının malzemenin tribolojik davranışına olan etkilerinin daha anlaşılır hale gelmesini kolaylaştıracaktır.Aşınma deneylerinde malzeme kayıplarının sıcaklık değişimleriyle beraber düşünülmesi gerekir

KAYNAKLAR

1. Kennedy, F.E..J.R.," Thermal and Termomechanical Effects in Dry Sliding " Wear, 100 (1984) 453-476
2. Ling, F.F. and Pu, S.L., "Probable Interface Temperatures of Solids in Sliding Contact" Wear, 7 (1964) 23-34.
3. Parakevas, S. and Dimaragonas, A.D."The Distribution of Friction Heat between a Stationary Pin and a Rotating Cylinder" Wear, 19 (1972) 415-424.
4. Drozdow, Y.N., "Thermal Aspects of Scoring in Simultaneous Rolling and Sliding Contact" Wear 20 (1972), 210-209.
5. Saka, N.,Eleiche A.M. and Suh N.P.,"Wear of Metals at High Sliding Speeds" Wear, 23 (1977) 109-125.
6. Dimarogonas A.D. and Michalopous D.,"A Compilation of Heat Distribution Parameters at Sliding Contacts" Tribology International, August (1981) 223-230.
7. Odabaş D.,"Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması" E.Ü.M.F., Doktora Tezi, Eylül (1991), Kayseri.
8. Carslaw H. and Jaeger J.C.,"Conduction of Heat in Solids", Part VIII, pp. 226, Second Edition, Oxford University Press (1959).
9. Kakaç S.,"Laminer ve Türbilanslı Doğal Konveksiyonda Ortalama Film Katsayıları için Basitleştirilmiş İfadeler", Örneklerle Isı Tranferi Problemleri, ODTÜ yayınları, no 26 (1968), s.280.
10. Kakaç S.,"Sürekli Rejimde Tek Boyutlu Isı İletimi" Isı Transferine Giriş I, Cilt I, no 26,(1982), s. 40, Ankara
11. Odabaş D. ve Karamış M.B.," Hidrostatik Yüklemeli Yeni Bir Pim-Disk Aşınma Deney Tesisatı Tasarımı ve İmalatı" 5.Denizli Malzeme Sempozyumu, 7-8-9- Nisan 1993, Cilt 2, s. 412-421.