

Ağır Şartlarda Kinematik Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Metin AKKÖK

Doç.Dr.,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Ağır şartlarda (yüksek hız ve/veya ağır yüklerde) kuru sürtünme katsayısının belirlenmesinde ısıl etkenlerin varlığı incelenmiştir. Sürtünme nedeni ile oluşan sıcaklığın sürtünen malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı küçük olan ile sınırlanacağından hareket ederek bir model geliştirilmiştir. Blok tarafından geliştiriler basitleştirilmiş yüzey sıcaklık artış teorisi sürtünme katsayısını verecek şekilde yeniden yazılmıştır. Ağır şartlarda sürtünme katsayısını belirleyen ana etkenler; kayma hızı, yük, malzemenin ergime (veya çözülme) sıcaklığı, sertliği ve ısıl özellikleri olarak bulunmuştur. Bu modelin geçerliliği yayınlanmış bir çok deneysel çalışma ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

GİRİŞ

Malzemelerin kuru sürtünme katsayıları değişik çalışma şartlarında büyük farklılıklar göstermektedir. Sürtünme kuvvetine malzeme yüzeyindeki mikro boyutlardaki pürüzlerin neden olduğu bilinmektedir. Pürüzlerin yük altında kaynaması ve kayma hareketi ile de bu bağların kesilmesi olarak bilinen yapışma modeli ve yüzeylerden daha sert olanın pürüzlerinin yumuşak olan yüzeyi çizmesi (kazınması) olarak bilinen klasik sürtünme modelleri sürtünme katsayısındaki büyük farkları yeterince açıklayamamaktadır.

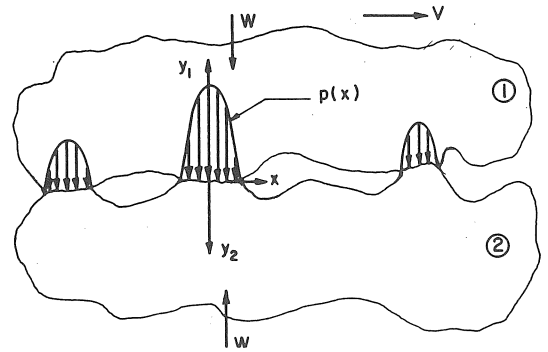
Kuru sürtünme katsayısı özel olarak seçilen deney şartlarında belirlenir. Özellikle çalışma şartlarının, sürtünmeden doğan ısının sürtünme katsayısını etkilemeyecek şekilde düzenlenmesi gereklidir. Böyle durumlarda sürtünme katsayısı yapışma ve şekil değiştirme bileşenleri ile belirlenir. Özellikle ergime sıcaklığına yakın çalışma şartlarında veya malzemenin mekanik özelliklerinin değiştiği çözülme (kimyasal olarak) sıcaklığına yakın çalışma şartlarında sürtünme sonucu üretilen ısı ile malzemenin yüzey sıcaklığı, ergime (veya çözülme) sıcaklığına erişebilir.

Bu çalışmada ağır şartlarda (yüksek hız ve/veya ağır yüklerde) sürtünme ile üretilen ısı enerjisinin yüksek olması ve bu ısının yeterince hızlı iletilememesi durumu incelenmiş ve ısıl etkenlerin varlığı gösterilmiştir.

DÜZGÜN OLMAYAN YÜZEYLER İÇİN SÜRTÜNME KATSAYISI

Yüzeyleri düzgün olmayan iki cisim sabit relatif V hızı ile kaymakta iken birbirlerine karşı yüklenmesi durumunda temas Şekil 1'de görüleceği gibi birden fazla küçük alan üzerinde olacaktır ve bu temas alanları devamlı olarak değişecektir. Temas alanlarında farklı elastik ve plastik şekil değişikliğine bağlı olarak oluşan temas basıncı dağılımı, $p(x)$, nedeni ile birim alanda yerel olarak bir anlık üretilen ısı;

$$q(x) = \mu(x) P(x)V \quad (1)$$



Şekil 1 Düzgün olmayan yüzeylerdeki değişken temas alanları

şeklinde yazılabilir. Burada $\mu(x)$ yerel sürtünme katsayısıdır. Bu ısı kayan ve sabit yüzeye iletilecektir. Kayan ve sabit yüzeyler için sıcaklık dağılımları $T_1(x, y_1)$ ve $T_2(x, y_2)$, ısı iletkenlik katsayıları k_1 ve k_2 olarak tanımlanırsa yerel olarak üretilen ısı için denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mu(x)P(x)V = k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y_1} \right|_{y_1=0} + k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} \quad (2)$$

Bu denklem verilen bir temas basınç dağılımı ve kayma hızı için bilinen konvansiyonel sayısal yöntemler kullanılarak sürtünme katsayısını lokal olarak verecek şekilde çözülebilir [1].

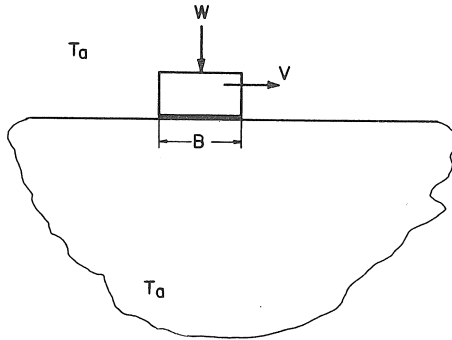
Bu yöntemle sürtünme katsayısı için hassas değerler elde etmek mümkün olmasına karşın sürtünen yüzeylerin mikro boyuttaki geometrisinin bilinmesini ve aşırı derecede bilgisayar zamanı ve belleği gerektirdiği için çok kullanışlı olmamaktadır. Bunun yerine düz yüzeyler için geliştirilmiş olan sürtünen yüzeylerdeki sıcaklık artışını analitik olarak veren basitleştirilmiş model kullanılacaktır.

DÜZ YÜZEYLER İÇİN SÜRTÜNMEDE SICAKLIK ARTIŞI

Şekil 2'de görüldüğü gibi yarı-sonsuz bir cismin düz yüzeyi üzerinde sabit bir W yükü altında V hızı ile kaymakta olan diğer bir cisim düşünelim. İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı, μ , nedeni ile birim temas alanında üretilen ısı, q , aşağıdaki denklemle verilir.

$$q = \mu PV \quad (3)$$

Burada P yük altında yüzeylerdeki temas basıncıdır. Böylece sürtünmede sıcaklık artışı V hızı ile hareket etmekte olan q şiddetindeki bir ısı kaynağı modeli ile bulunabilir. Isı kaynağının yeterince hızlı kaydığı durumlarda hareketli yüzey sürekli olarak çalışma ortam sıcaklığındaki, T_a , daha soğuk yüzeye temas edecektir ve belli bir süreli sıcaklığa erişecektir. Bu nedenle üretilen ısının büyük bir kısmı daha soğuk olan sabit yüzeye iletilecektir [2]. Isının malzemeye iletileme derinliği



Şekil 2 Yarı-sonsuz cisim üzerinde yük altında kayan cisim

temas yüzeyi boyutlarına göre küçük olmaktadır. Bu nedenle ısının yatay yönde akışı ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayımı ile ısı iletimi bir boyutlu ısı akış problemi olarak düşünülebilir ve yüzeydeki sıcaklık, $T_{\bar{u}}$, artışı aşağıdaki denklemle verilir [1].

$$T_{\bar{u}} - T_a = 2q \left(\frac{t}{\pi k \rho c} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Burada k, ρ ve c sabit yüzeyin sırasıyla ısı iletkenlik katsayısı, özgül kütlesi ve ısı kapasitesidir. Bu denklem sabit yüzey üzerindeki herhangi bir noktadaki sıcaklık artışını ısı akışının uygulandığı süre, t , ile vermektedir. Kayma yönünde ısı kaynağı boyu B olarak alınır, en yüksek sıcaklık ısı kaynağının arka kenarındaki noktada olacaktır. $t = B/V$ ilişkisi denklem (4)'de yerine konulursa en yüksek sıcaklık artışı aşağıdaki denklemle verilir.

$$T_{\max} - T_a = 2q \left(\frac{B}{\pi V k \rho c} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Buradan görüldüğü gibi sıcaklık artışı uygulanan ısı akışı ile doğru orantılıdır. Ağır şartlarda üretilen sürtünme enerjisinin yüksek olmasıyla yüzeydeki en yüksek sıcaklık malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı düşük olana erişir. Fakat bu değeri aşamaz. Bu durumda sıcaklık artışı sınırlanmış olacağından ısı iletimi de sınırlanacak ve çalışma şartlarının ağırlaşması durumunda üretilen enerji sürtünme katsayısının azalması ile sabit bir değere kalabilecektir.

SÜRTÜNME KATSAYISININ BELİRLENMESİ

Ağır şartlarda aşırı sürtünme enerjisi üretimi ile en yüksek sıcaklığın malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı düşük olanla sınırlanması sıcaklık artışını belirler. Bu nedenle sıcaklık artışı denklemi (5) sürtünme katsayısını bağımsız bir parametre olarak verecek şekilde yazılabilir.

Tam Yüzey Teması

Yüzey pürüzlülüğü olmayan ideal düz yüzeyler için veya çok küçük temas yüzeyleri için yükün tüm yüzeye eşit dağıldığı kabul edilebilir. Bu durumda yük ile temas basıncı doğru orantılı olarak değişecektir. (3) numaralı denklemle verilen sürtünme ısısı (5) numaralı denklemde yerine koyularak sürtünme katsayısı çözümlerse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\mu = C \frac{T_d - T_a}{P} \left(\frac{k \rho c}{VB} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Burada C bir sabit olup aşağıda tartışılacaktır. T_d , kayan veya sabit yüzeyin ergime (veya çözülme) sıcaklığı (hangisi küçük ise) ve T_a çalışma ortamı sıcaklığıdır.

Böylece sürtünme katsayısının yük ile ve kayma hızının karekökü ile ters orantılı olarak değiştiği görülür.

Eşitlik (6) en yüksek yüzey sıcaklığının temas alanının çıkış kenarında olması varsayımına dayanarak elde edilir. Diğer bir varsayım da sürtünme ile üretilen tüm ısının yarı-sonsuz cisme iletilmiş olmasıdır. Gerçekte az da olsa üretilen ısının bir kısmı kayıcıya iletilirken diğer kısmı da yarı-sonsuz cisme iletilir. C katsayısının (6) numaralı denklemdaki değeri $\sqrt{\pi/2} = 0.886$ 'dır. Eğer en yüksek sıcaklık ortalama bir yüzey sıcaklığı olarak alınırsa $C = 1.46$ kullanılabilir [3]. Sabit sıcaklıktaki bir ısı kaynağı için yapılan bir model ile de bu katsayı 2.0 olarak bulunmuştur [4] ve bu değer kullanılacaktır.

Kısmi Yüzey Teması

Bilindiği gibi gerçek yüzeyler pürüzlülük nedeni ile birden fazla noktada temas ederler. Bu temas noktaları aşırı yük ile elastik ve plastik şekil değişikliğine uğrayabilir. Burada karşılaşılan iki büyük zorluk vardır. Bunlardan birincisi gerçek temas basıncı değerinin bilinmesidir. Temas noktalarında alanın küçük olduğu varsayımı ile tüm temas noktalarının plastik şekil değişikliğine uğradığı kabul edilebilir. Bu nedenle gerçek temas basıncı olarak malzemelerden yumuşak olanın iz sertliği (akma sertliği) P_h alınabilir. Diğer bir bilinmeyen de temas noktalarının sayısıdır. Temas noktalarının alanın küçük olması nedeniyle dairesel olarak alınabilir. Ortalama çap B olarak alınırsa, n temas noktası için yük ile gerçek temas basıncı ve alanı arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{\pi B^2}{4} \cdot n \cdot P_h = W \quad (7)$$

Buradan B boyutunu çözüp (6) numaralı denkleme yerine koyarak ve (3) no.lu denklemden temas basıncı olarak P_h alınarak sürtünme katsayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

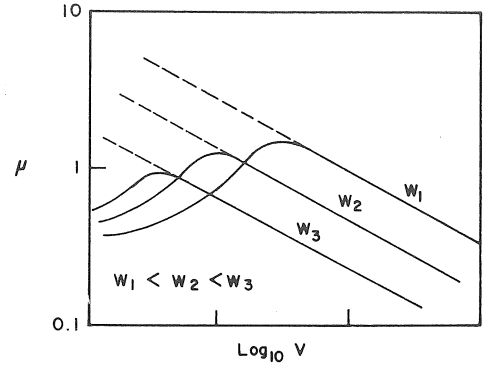
$$\mu = 1.88 \frac{T_d - T_a}{P_h^{3/4}} \cdot \left(\frac{k\rho c}{V}\right)^{1/2} \left(\frac{n}{W}\right)^{1/4} \quad (8)$$

Buradan sürtünme katsayısının $\mu \propto V^{-1/2} W^{-1/4}$ değiştiği görülür. Temas halindeki geniş yüzeyli cisimlerin sürtünme katsayısının bulunması için temas noktası sayısının bilinmesi gereklidir. Yükün yüzeyler arasında üç noktada taşındığı varsayımı ile mikroskopik temas alanlarının üç büyük temas alanında toplandığı düşünülebilir. Bu şekilde kısmi yüzey teması için geliştirilmiş olan eşitlik (8) geniş yüzeyli cisimler için $n = 3$ alınarak kullanılabilir. Sürtünme katsayısının $n^{1/4}$ ile değişmesi bu sayının etkisinin kuvvetli olmadığını göstermektedir.

SÜRTÜNME MODELİNİN DENEYSEL BULGULARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Hızın Etkisi

Sürtünme katsayısının ısıl etkenlerle belirlenmesinde en önemli şart sürtünmenin ağır şartlarda gerçekleşmesi ve bu nedenle de üretilen ısının yüksek olmasıdır. Bu özellik sürtünme katsayısının

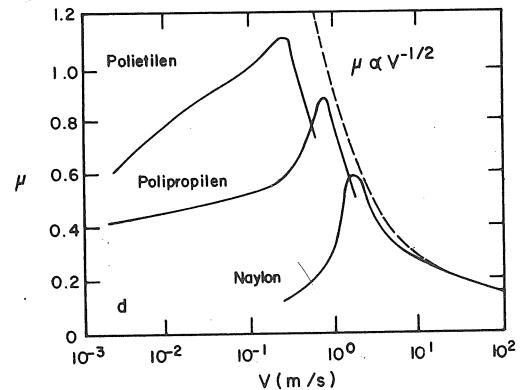


Şekil 3 Sürtünme katsayısının karakteristik değişimi

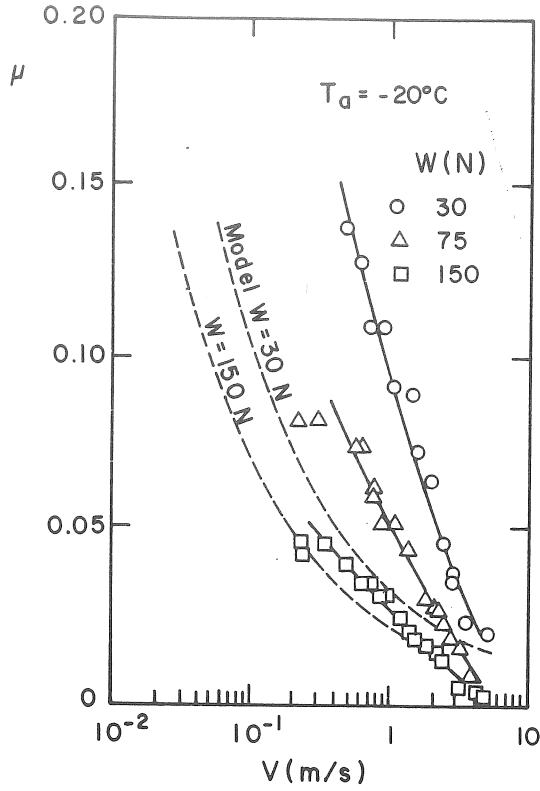
değişik yükler için hız ile değişimini gösteren bir grafikte gösterilebilir. Şekil 3'de düşük hızlar için yüzey sıcaklığı ergime (veya çözülme) sıcaklığına erişemediği için yukarıda bahsedilen model geçerli değildir. Bu durumda sürtünme yüzey pürüzlerinin yapışma-kesilme ve şekil değiştirme (kazıma) bileşenleri ile belirlenir. Düşük hızlarda sabit yükler için sürtünme katsayısının hız ile arttığı bilinmektedir. Bu artış sürtünmenin ısıl etkenlerle belirlenmeye başladığı $\mu \propto V^{-1/2}$ eğrisine erişinceye kadar devam eder ve bundan sonra sürtünme katsayısı hız ve yük ile düşmeye başlar (Şekil 3).

Bu özelliğin deneysel olarak gösterilmesinde en belirgin örnek Şekil 4'de görülmektedir. Burada üç polimerin çelik yüzeyi üzerindeki sürtünme katsayısının kayma hızına göre değişimi verilmektedir [5]. Çözülme sıcaklıklarının farklı olması nedeni ile (Polietilen:80°C, Polipropilen:145°C, Naylon:250°C) sürtünme katsayısının ısıl etkenlerle belirlenmeye başladığı sınır bölgesi açık bir şekilde artan hızlarda görülmektedir. Burada kesik çizgi ile gösterilen eğri Naylon için 10 m/s'deki deneysel değerinden geçen $\mu \propto V^{-1/2}$ eğrisidir.

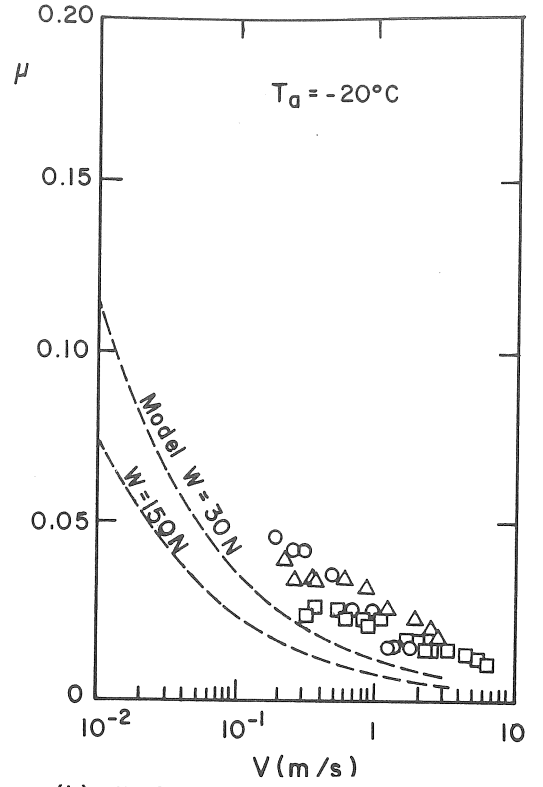
Sürtünme katsayısını etkileyen faktörlerin belirlenmesi için yapılan bir çalışmada ergime sıcaklığı düşük olan buz ile farklı ısıl temas katsayısı olan malzemeler arasındaki sürtünme katsayısının değişimi deneysel olarak incelenmiştir [6]. Şekil



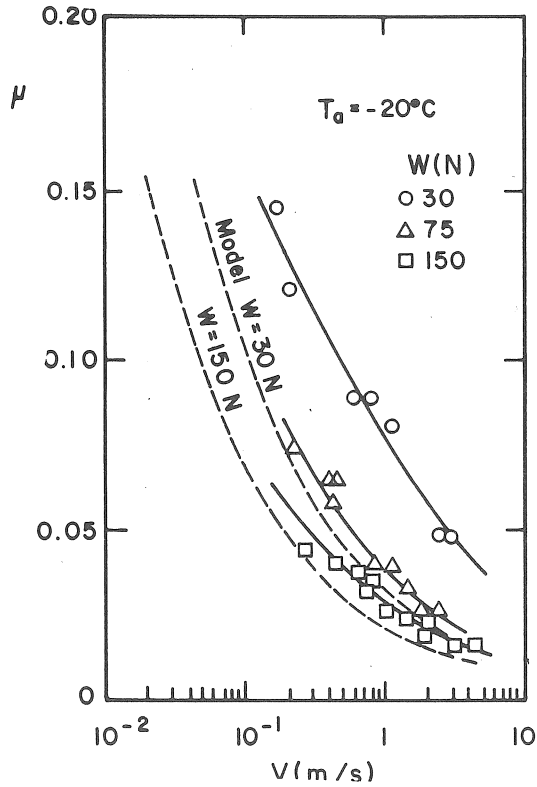
Şekil 4 Üç polimer için sürtünme katsayısının hıza göre değişimi



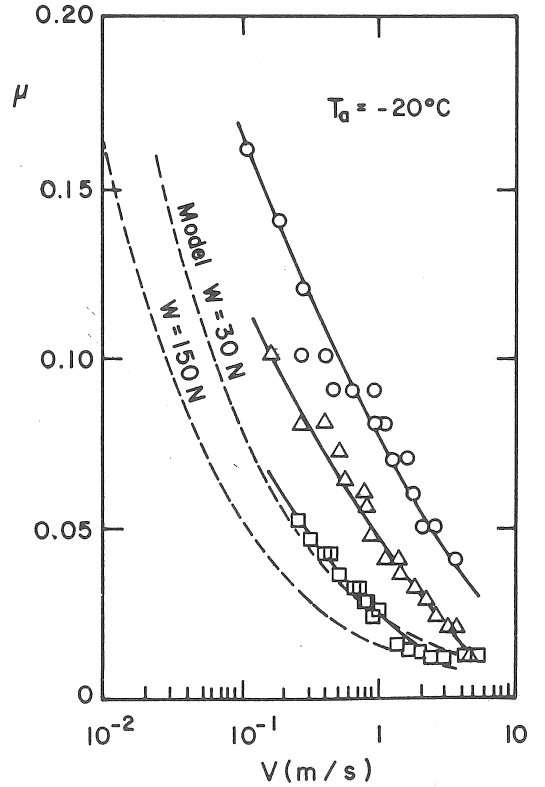
(a) Buz üzerinde naylon kayıcılar



(b) Naylon üzerinde buz kayıcılar



(c) Buz üzerinde cam kayıcılar



(d) Cam üzerinde buz kayıcılar

Şekil 5 Naylon ve cam ile buz arasındaki sürtünme katsayısının değişimi

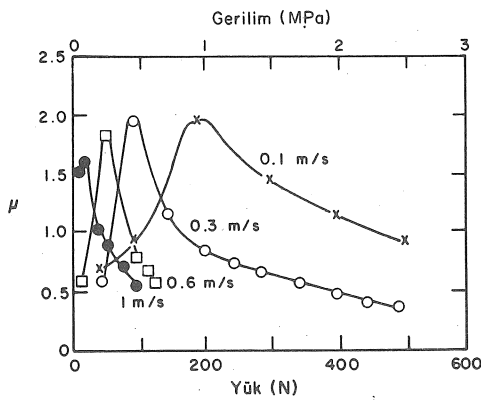
5a,b'de Naylon ile buz arasındaki sürtünme katsayısının hızla göre değişimi çeşitli yükler için verilmiştir. Aynı şekilde cam ile buz için sürtünme katsayısı değişimi Şekil 5c,d'de verilmiştir. Burada kesik çizgi ile gösterilen sürtünme katsayısı değişimleri kısmi temas için (8) numaralı denklemden elde edilmiştir. Buz için ergime sıcaklığı 0°C olmasına rağmen iz sertliği bu sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta (yaklaşık -1°C 'de) ani bir düşme göstermekte ve yumuşama meydana gelmektedir [7]. Bu fark ihmal edilerek en yüksek yüzey sıcaklığı sınırı olarak 0°C alınmıştır. Buzun sertliğinin sıcaklığa göre değişimi Barnes ve Tabor [7]. tarafından ölçülmüş ve -10°C 'den daha düşük sıcaklıklar için sertliğin değişiminin az olduğu gözlenmiştir. Bu değerler kullanılarak -20°C 'deki çalışma sıcaklığı için buzun iz sertliği yaklaşık olarak $P = 100 \text{ MPa}$ alınmıştır. Bu deneyler üç silindirik kayıcı ile buz üzerinde yapıldığı için burada $n = 3$ alınmıştır. Çeşitli deney grupları için yaklaşık olarak $\mu \propto V^{-0.34}$ ile $\mu \propto V^{-0.58}$ arasında değiştiği görülmüştür.

Yükün Etkisi

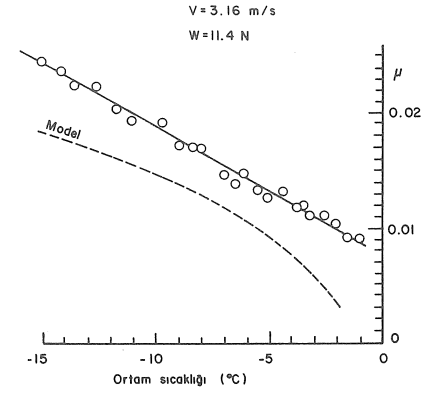
Sürtünmenin ısıl etkenlerle belirlendiği şartlarda sürtünme katsayısı yükün artması ile azalmaktadır. Kısmi temas olan yüzeyler için $\mu \propto W^{-0.25}$ ve tam temaslı yüzeyler için $\mu \propto W^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Bu bulguların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması için Naylon'un çelik üzerindeki sürtünme katsayısının sabit hızlar için yüke göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir [8]. Burada ısıl etkilerin başlangıcı yükün artması ile açık bir şekilde görülmektedir. Hız arttıkça ısıl etkilerin başlaması daha hafif yüklerde olmaktadır. Sürtünme katsayısının değişimi yaklaşık olarak $\mu \propto W^{-1}$ eğrisini takip etmektedir.

Buz üzerinde naylon, cam, çelik kayıcılar ve naylon, cam, çelik üzerinde buz kayıcılar ile yapılan deneylerden yaklaşık olarak $\mu \propto W^{-0.55}$ ile $\mu \propto W^{-0.58}$ arasında değiştiği görülmüştür [6]. Bu değerler kısmi ve tam temas durumları için olan değerler arasındadır.



Şekil 6 Çelik üzerinde naylon kayıcılar için sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 7 Buz üzerinde çelik kayıcılar için ortam sıcaklığının sürtünme katsayısına etkisi

Ortam Sıcaklığının Etkisi

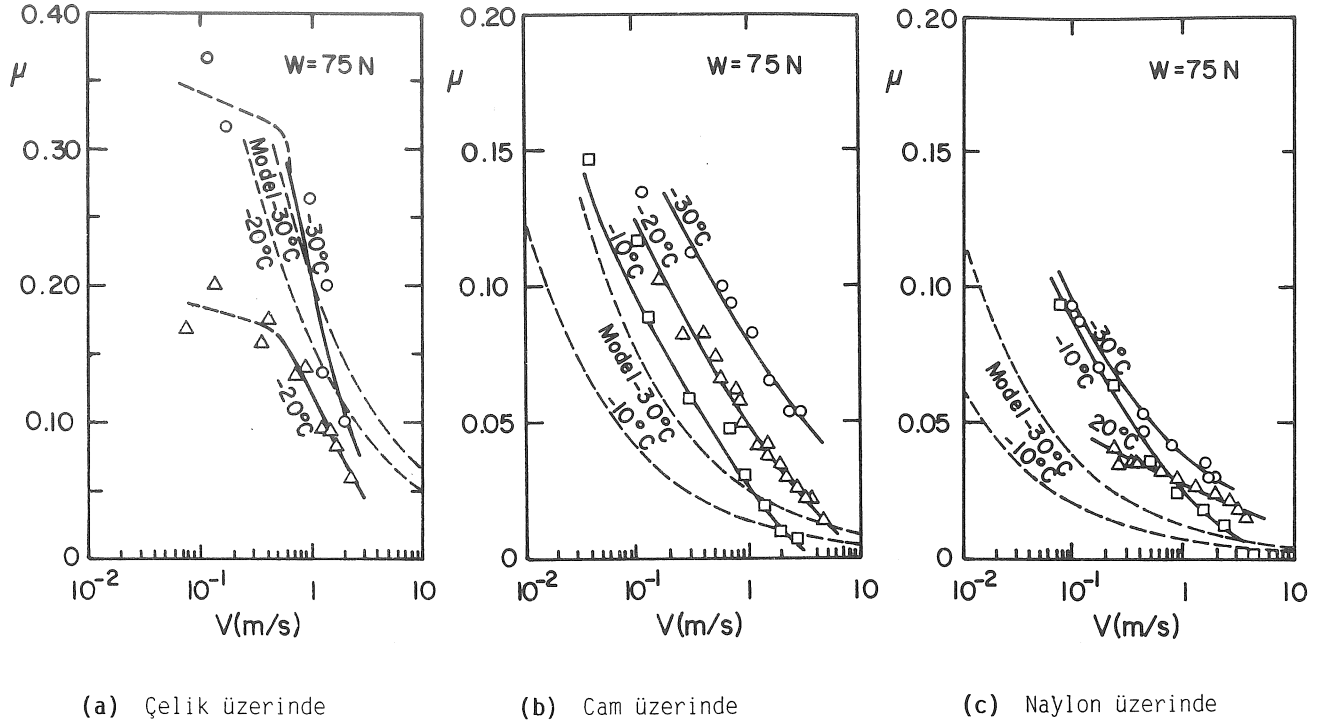
Şekil 7'de Evans ve diğerleri [9] tarafından deneysel olarak elde edilen buz üzerinde çelik kayıcılar için sürtünme katsayıları verilmiştir. Bu deneylerde çelik kayıcı bir noktada buz yüzeyine yüklendiğinden $n = 1$ alınarak elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kesik çizgi ile gösterilmiştir. Sürtünme katsayısının ortam sıcaklığı 0°C 'ye yaklaşırken doğrusal olarak değişmesinin nedeni buz sertliğinin düşmesidir. Şekil 8'de buz kayıcıların çeşitli malzemeler üzerindeki sürtünme katsayılarının değişimi aynı yük değeri için verilmiştir [6]. Bu deney sonuçlarından, çeşitli deney grupları için $\mu \propto (T_d - T_a)^{0.69}$ ile $\mu \propto (T_d - T_a)^{0.82}$ arasında değiştiği bulunmuştur.

SONUÇ

Ağır şartlarda sürtünme ile üretilen ısının yüksek olması nedeni ile sürtünme katsayısının ısıl etkenlerle belirlendiği gösterilmiştir. Sürtünmede en yüksek sıcaklığın malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı düşük olan ile sınırlanması ısı iletimini de sınırlamaktadır. Bu nedenle sürtünme katsayısını belirleyen en önemli etkenlerden birisi sürtünen malzemelerin ergime (veya çözülme) sıcaklığı olacaktır. Sürtünme katsayısının hız, yük ve ortam sıcaklığının artması ile azaldığı gösterilmiştir. Bu bulguların yayınlanmış deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalarında uyum sağlandığı gözlenmiştir.

DETERMINATION OF KINETIC COEFFICIENT OF FRICTION UNDER SEVERE CONDITIONS

The concept of thermal control of dry friction coefficient under severe sliding conditions is investigated. A model is developed by considering the maximum temperature occurring in dry sliding which is the decomposition temperature of the slider or counterface (whichever temperature is lower). Blok's flash



Şekil 8 Buz kayıcıların çeşitli malzemeler üzerindeki sürtünme katsayılarının sıcaklığa göre değişimi

temperature theory is manipulated to give the coefficient of friction as a dependent parameter. Under severe sliding conditions the principal factors controlling friction appear to be the sliding velocity, load, and the melting (or decomposition) temperature, hardness and thermal properties of the materials. The model is compared with several sets of experimental results, available in the literature.

KAYNAKÇA

- 1 Ettles, C., "The Thermal Control of Friction at High Sliding Speeds", *Trans. ASME*, 85-Trib-37, (1985).
- 2 Blok, H., "Theoretical Study of Temperature Rise at Surfaces of Actual Control Under Oiliness Lubricating Conditions", *I. Mech. E., Proc.*, 2 (1937), 225-235.
- 3 Archard, J.F., "Elastic Deformation and the Laws of Friction", *Proc. Roy. Soc. (London)*, A 243, (1958), 190-225.
- 4 Ettles, C., "Heat Generation and Friction in Rotating Bands", *ASLE Preprint*, 85-AM-1A-1, (1985).
- 5 McLaren, K.G. ve Tabor, D., "Friction of Polymers: Influence of Speed and Temperature", *Nature*, 197, (1963), 856-858.
- 6 Akkök, M., Ettles, C. ve Calabrese, S.J., "Parameters Affecting the Kinematic Friction of Ice", *Trans. ASME, Jour. of Tribology*'de yayınlanacak, (1986).
- 7 Barnes, P. ve Tabor, D., "Plastic Flow and Pressure Melting in the Deformation of Ice", *Nature*, 210 (1966), 873-883.
- 8 Watanabe, M., Karasawa, M. ve Matsubara, K., "The Friction Properties of Nylon", *Wear*, 12 (1968), 185-192.
- 9 Evans, D.C.B., Nye, J.F. ve Chessman, K.J., "The Kinematic Friction of Ice", *Proc. Roy. Soc.*, S.347, (1976), 473-512.