

**CR4 ÇELİĞİ İÇİN BASINÇ VE GEOMETRİNİN SÜRTÜNME KATSAYISINA
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FRICTION COEFFICIENT OF
CR4 STEELS UNDER DIFFERENT PRESSURE AND GEOMETRY CONDITIONS

Yahya GÜNEŞ

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Bilecik, TÜRKİYE

ORCID: 0009-0009-8515-807X

Dr. Emre ESENER

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik,
TÜRKİYE

ORCID: 0000-0001-5854-4834

ÖZET

Bu çalışmada, 0,73 mm kalınlığındaki CR4 kalite sac malzeme kullanılarak; sürtünme katsayısının sabit bir değer olmadığı, aksine yüzey basıncı ve parça geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği hipotezi test edilmiştir. Çalışmanın deneysel aşamasında, MTS test cihazına entegre edilen özel tasarım bir deney düzeneği vasıtasıyla numuneler; 3 MPa ve 5 MPa olmak üzere iki farklı yüzey basıncına maruz bırakılmıştır. Veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla deneyler tekrarlanabilir setler halinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın nümerik aşamasında ise Autoform yazılımı kullanılarak deneysel koşullar sanal ortamda modellenmiş; basınç dağılımı ve sürtünme çıktıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, formsuz (düz) numune durumunda simülasyon verileri ile deneysel sonuçların yüksek hassasiyetle örtüştüğünü ortaya koymuştur. Buna karşın, farklı formlu kesitlerde yapılan deneylerde simülasyon sonuçlarının deneysel verilerden önemli ölçüde saptığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma; basınca ve geometriye bağlı sürtünme katsayısının, güncel sonlu elemanlar analizi (SEA) yazılımları tarafından modellenen ideal durumlar ile gerçek fiziksel çıktılar arasında farklar yarattığını, dolayısıyla daha gelişmiş sürtünme modellerinin kullanımının bir zorunluluk olduğunu kanıtlamaktadır. Çalışmanın sonuçları, doğru sürtünme modellemesinin analiz doğruluğunu artırırken, deneme-yanılma süreçlerini kısalttığını ve üretim maliyetlerini optimize ettiğini göstermektedir. **Anahtar Kelimeler:** Sürtünme Katsayısı, Proses Parametreleri, Sonlu Elemanlar Analizi, CR4 Çeliği

ABSTRACT

In this study, using 0.73 mm thick CR4 grade sheet metal, the hypothesis that the friction coefficient is not a constant value but varies depending on surface pressure and part geometry was tested. In the experimental phase, samples were subjected to two different surface pressures 3 MPa, and 5 MPa using a specially designed apparatus integrated into an MTS testing machine. To ensure data reliability, experiments were conducted in repeatable sets. In the numerical phase, the experimental conditions were modeled in a virtual environment using Autoform software, and pressure distribution and friction outputs were analyzed comparatively. The findings revealed that for flat (undeformed) samples, the simulation data and experimental results overlapped with high precision. Conversely, in experiments conducted with different formed sections, simulation results deviated significantly from the experimental data. This study proves that pressure- and geometry-dependent friction coefficients create discrepancies between the ideal scenarios modeled by current finite element analysis (FEA) software and actual physical outputs. Consequently, the use of more advanced friction models is a necessity. The results demonstrate that accurate friction modeling increases analysis precision, shortens trial-and-error processes, and optimizes production costs.

Keywords: Friction Coefficient, Process Parameters, Finite Element Analyses, CR4 Steel

GİRİŞ

Endüstriyel imalatın temel yapı taşlarından biri olan sac metal şekillendirme; düz metal levhaların (sac), mühendislik gereksinimlerini karşılayacak işlevsel parçalara dönüştürüldüğü stratejik bir üretim sürecidir. Presler ve bu iş için özel olarak tasarlanmış kalıplar vasıtasıyla yürütülen bu süreç, metalin plastik deformasyon kabiliyetinden yararlanılarak, malzemenin kontrollü bir şekilde biçimlendirilmesi esasına dayanır. Sunduğu yüksek üretim hızı ve esneklik sayesinde bu yöntem, modern sanayinin birçok kolunda vazgeçilmez bir konuma sahiptir.

Şekillendirme mekaniğinin temelinde, malzemenin elastik (geri yaylanma) ve plastik (kalıcı şekil değiştirme) davranışları arasındaki hassas denge yer alır. Oldukça karmaşık fiziksel fenomenleri barındıran bu yapı; malzeme bilimi, mekanik mühendisliği, proses tasarımı ve kalıp teknolojileri gibi farklı disiplinlerin entegrasyonunu zorunlu kılar. Üretim maliyetlerinin minimize edilmesi ve ürün kalitesinin maksimize edilmesi, ancak bu disiplinlerin uyumlu çalışmasıyla mümkündür. Sac metal şekillendirme süreçleri; malzeme özellikleri, makine parametreleri ve tribolojik koşulların (sürtünme, aşınma vb.) etkileşiminden doğan çok bilinmeyenli bir problemdir. Üretim esnasında oluşan aşırı gerilmeler, yorulma ve kontrolsüz plastik deformasyonlar hem kalıp ömrünü kısaltmakta hem de parça kalitesini tehdit etmektedir (Avallone vd., 2006).

Sac metal şekillendirme süreçlerinde karşılaşılan problemlerin anlaşılması ve çözülmesi adına yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, özellikle otomotiv endüstrisinde büyük öneme sahiptir. Otomotiv sektörü, sac metal şekillendirme teknolojilerinin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Bu sektörde, araçların dış ve iç saclarının üretilmesi sırasında birçok farklı şekillendirme işlemi uygulanmaktadır. Bu süreçlerde, üretim sırasında meydana gelen gerilme, deformasyon, malzeme akışı ve yüzey hataları gibi faktörlerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda sac şekillendirme işlemleri sırasında, kullanılan metalin mekanik özellikleri, kalıp geometrisi ve uygulanan kuvvetler, üretilen parçanın nihai kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu süreçte en önemli parametrelerden biri ise sürtünme koşullarıdır (Halliday vd., 2014).

Sürtünme, iki yüzeyin birbiriyle temas ettiği her durumda ortaya çıkan bir direnç kuvvetidir ve sac metal şekillendirme sürecinde büyük bir rol oynar. Özellikle yüksek tonajlı işlemler sırasında, sürtünme katsayısının değişimi, malzemenin akış davranışını, kalıp ömrünü ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Sürtünme katsayısının kontrol edilmesi, üretim süreçlerinde enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda aşınma ve malzeme deformasyonunu minimize etmeye yardımcı olur. Bu nedenle, sac metal şekillendirme operasyonlarında sürtünme koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve modellenmesi büyük bir mühendislik problemidir (Serway ve Jewett, 2018).

Sürtünme, birbiriyle temas hâlinde olan iki yüzey arasında oluşan ve bir yüzeyin diğerine göre hareketine veya hareket etme eğilimine karşı koyan kuvvettir. Mekanik sistemlerde sürtünme, sistemin verimini düşürebilecek bir direnç olarak görülse de birçok uygulamada işlevsellik için zorunludur. Sürtünme kuvveti, genellikle yüzeyler arasındaki normal kuvvet ile yüzey özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan sürtünme katsayısının çarpımıyla ifade edilmektedir, bu ifade Denklem 1'de verilmiştir. Burada F_s sürtünme kuvveti, (μ) sürtünme katsayısı ve N normal kuvvettir. Bu ifade, Coulomb sürtünme modeli olarak bilinir ve mühendislik hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hibbeler, 2016; Meriam, 2012; Bauwens 2013).

$$F_s = \mu \cdot N \quad (1)$$

Sürtünme olgusuna dair ilk sezgisel yaklaşımlar Antik Yunan filozoflarına kadar uzansa da bu fiziksel fenomenin sistematik bir mühendislik disiplini çerçevesinde ele alınması 15. yüzyılda Leonardo da Vinci'nin deneysel çalışmalarıyla başlamıştır. Da Vinci, döneminin ötesinde bir öngörüyle, sürtünme kuvvetinin temas eden yüzey alanından bağımsız olduğunu ve normal kuvvetle (yüzeye dik baskı) doğrudan orantılı bir ilişki içerisinde bulunduğunu öne sürmüştür. 17. yüzyıla gelindiğinde Guillaume Amontons, bu gözlemleri klasik sürtünme yasaları olarak matematiksel bir zemine oturtmuş; 18. yüzyılda ise Charles-Augustin de Coulomb, statik ve kinetik sürtünme arasındaki ayrımı netleştirerek kuramı derinleştirmiştir (Dowson, 1998; Hutchings, 2016). Sürtünme kuvveti sabit değildir ve çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Sürtünme kuvvetini başlıca etkileyen unsurlar, yüzey pürüzlülüğü, malzeme cinsi, yağlama koşulları, normal kuvvet, hareket hızı ve sıcaklıktır (Persson, 2013; Bowden, 2003).

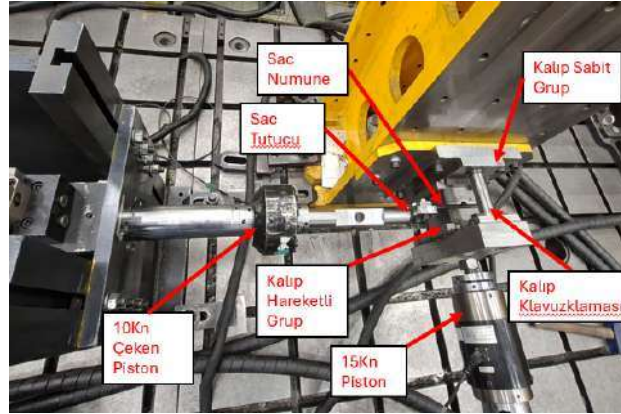
Sonuç olarak, sürtünmenin sac metal şekillendirmedeki önemi sadece direnç kuvvetiyle sınırlı kalmayıp; geri esneme tahmini, boyutsal hassasiyet ve seri üretim sürdürülebilirliği gibi çok boyutlu mühendislik problemlerinin merkezinde yer almaktadır. Modern sonlu elemanlar analizi (FEA) yazılımlarında doğru sürtünme modellerinin kullanılması, sanal ortamdaki simülasyonların gerçek üretim sonuçlarıyla örtüşmesi adına kritik bir öneme sahiptir (Williams, 2005; Stolarski,2000).

YÖNTEM

Bu çalışmada, sac şekillendirme süreçlerindeki sürtünme etkisinin, farklı basınçlarda ve farklı geometriler ile olan ilişkisini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Bu sayede, üretim süreçlerinde karşılaşılan olası deformasyon ve kalite sorunlarına karşı çözüm önerileri geliştirilmesi beklenmektedir. Bu amaçlar doğrultusunda sac kalıpcılığı prosesinde sürtünme parametresini inceleyerek, sac şekillendirme işlemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik SEA programında ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma, sac kalınlığı 0.73 mm olan CR4 kalitesine sahip düşük

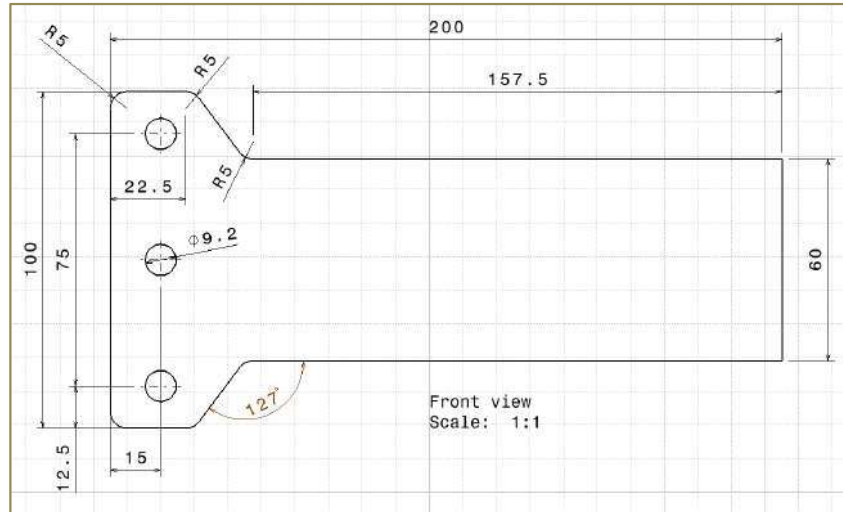
karbonlu bir çelik malzemenin, Hill48 malzeme modeli ile modellenerek Autoform yazılımı ile 3 ve 5 MPa basınçlar altında farklı geometrilere sahip plakalar arasında sürtünme davranışının incelenmesinin sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, deneysel çalışmalar için sürtünme test düzeneği kullanılarak sürtünme etkilerinin ölçülmesi, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Tüm deneyler, bir hidrolik test cihazı olan MTS marka cihaz ile iki adet piston kullanılarak yapılmıştır. Şekil 1’de hidrolik test cihazında kurulan test düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 1. Sürtünme test düzeneği

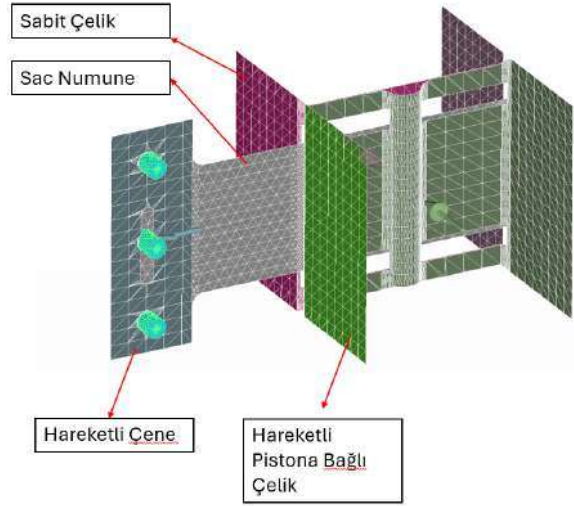
Deneylerde kullanılan CR4 malzeme Şekil 4.4’te gösterildiği gibi 0.73 mm x 60 mm x 200 mm olarak kullanılmıştır. Çektirme çeliklerinin sacı kaçırma riskinden kaynaklı Ø10 mm 3 adet delik delinmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan numune ebatları

Deneyler sabit sac ebatları (0.73 mm x 60 mm x 200 mm), sabit blok (100x100), sabit hareketli baskı (100x100 mm), sabit çektirme hızı (25 mm/s), hareketli çekme kursu (10 mm), ve değişken üst tampon kuvvetiyle (16.2 kN / 27 kN) gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise tüm deneysel sonlu elemanlar analizleri ile sayısal olarak da hesaplanmıştır. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi Autoform ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem geometrisi Catia CAD yazılımı ile sac malzeme hariç kalıp geometrisinin rijit cisim olarak kabul edilmesinden dolayı yüzey olarak modellenmiştir. Elde edilen yüzeyler Autoform yazılımına aktarılarak ilk olarak ağ yapısı elde edilmiştir. Elde edilen ağ yapısı Şekil 3'te ve sonlu elemanlar analizlerine ait hesaplama parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Autoform'da kullanılan çeliklerin ağ yapıları

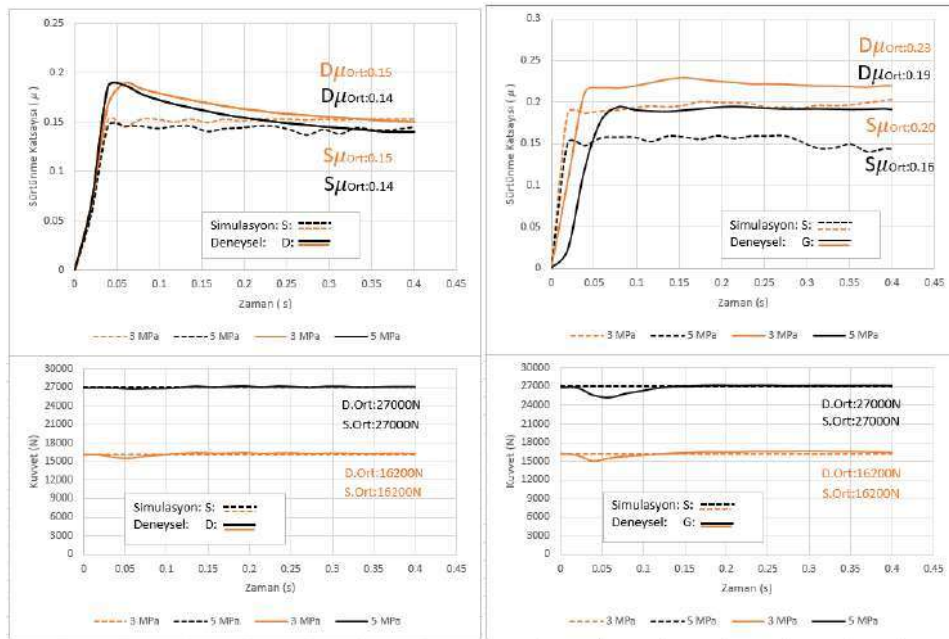
Tablo 1. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan eleman ve ağ yapısı parametreleri

	Parametre	Değer
Kalıp	Eleman Toleransı	0.04
	Eleman Maksimum Yan Uzunluk	10 mm
	Minimum Eleman Boyutu	0.31
	Ana Eleman Boyutu	40 mm
	Başlangıç Maksimum Eleman Boyutu	20 mm

Son adım olarak da sonlu elemanlar modeli çözülmüştür. Sonuçlar sürtünme katsayısı, geometriye ve temas basıncı açısından değerlendirilmiştir.

BULGULAR

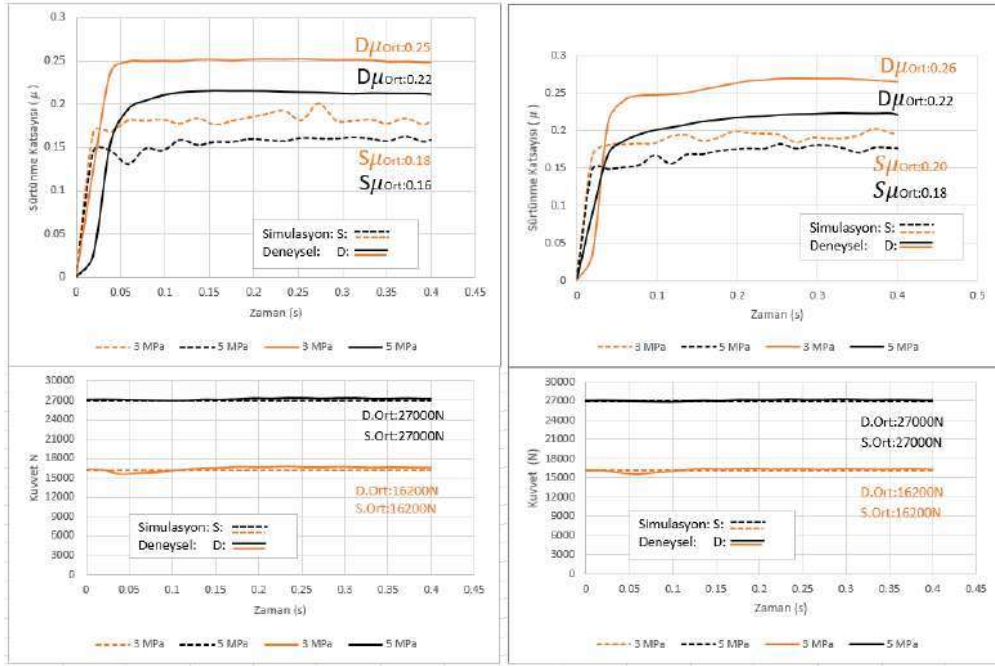
Deneyel olarak hidrolik test cihazında gerçekleştirilen testlerin numerik olarak aynı parametrelerle sonlu elemanlar analizi programında uygulaması yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde Sürtünme katsayısı üst tampon kuvveti değişkenleri (16000N ~ 3 MPa / 27000N ~ 5 MPa) ile geometriye bağlı değişkenlerinin etkisi deneyel ve numerik olarak karşılaştırılması birlikte yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 4. Deneyel ve sayısal sonuçların kıyaslanması (a) Formsuz kalıp (b) Basamak kalıp



Şekil 5. Deneysel ve sayısal sonuçların kıyaslanması (a) Dairesel kalıp (b) Dikdörtgen kalıp

TARTIŞMA

Bu çalışmada, sac metal şekillendirme simülasyonlarında kritik bir parametre olan sürtünme katsayısının, yalnızca yüzey basıncına değil, parça geometrisine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda sürtünme katsayısı genellikle sabit kabul edilse de özellikle formlu yüzeylerde gerçekleşen malzeme akışı ve yüzey etkileşimleri, analiz doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir.

Çalışma kapsamında 0.73 mm kalınlığındaki CR4 malzeme kullanılarak hem deneysel hem de nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Deneyler iki ana kategoride ele alınmıştır: Formsuz (düz) yüzey testleri ve geometrik formlu (basamak, dairesel ve dikdörtgen) yüzey testleri. Her iki durumda da numuneler 3 MPa ve 5 MPa basınç değerlerine maruz bırakılmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; düz ve formsuz yüzeylerde gerçekleştirilen testlerde, 3 ve 5 MPa basınç değerlerinin tamamında, nümerik analiz sonuçları ile deneysel verilerin birebir örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, basit temas koşullarında mevcut sürtünme modellerinin yeterli doğrulukta çalıştığını ve basınç değişimini doğru simüle edebildiğini kanıtlamaktadır.

Ancak, sacın basamak, dairesel ve dikdörtgen formlu çelikler üzerinden akmaya zorlandığı geometrik testlerde durum farklılaşmaktadır. Geometrinin devreye girdiği bu testlerde, simülasyon programı sabit veya basınca bağlı modeller kullansa dahi, deneysel sonuçlarla nümerik çıktılar arasında belirgin sapmalar tespit edilmiştir. Deneysel verilerde, geometrik engellerin (köşeler, yarıçaplar) malzeme üzerinde yarattığı ekstra deformasyon ve yüzey pürüzlülük değişimi sürtünme direncini artırırken, simülasyon ortamının bu geometrik etkileşimi tam olarak yansıtamadığı görülmüştür.

SONUÇ

Sonuç olarak; sac metal simülasyonlarında hata payını minimize etmek için sadece basınca duyarlı modellerin yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Analiz doğruluğunun artırılması ve özellikle karmaşık kalıplarda deneme sürelerinin kısaltılması için, geometriye ve deformasyon moduna bağlı değişen, geliştirilmiş sürtünme modellerinin kullanılması gerektiği ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

Avallone, E. A., Baumeister, T., & Sadegh, A. (2006). Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. McGraw-Hill.

Bauwens, J. P. (2013). Introduction to Tribology. John Wiley & Sons.

Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). The Friction and Lubrication of Solids. Oxford University Press.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). Fundamentals of Physics. John Wiley & Sons.

Hibbeler, R. C. (2016). Engineering Mechanics: Statics. Pearson.

Meriam, J. L., & Kraige, L. G. (2012). Engineering Mechanics: Statics. Wiley.

Persson, B. N. (2013). Sliding Friction: Physical Principles and Applications. Springer Science & Business Media.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). Physics for Scientists and Engineers. Cengage Learning.

Stolarski, T. A. (2000). Tribology in Machine Design. Butterworth-Heinemann.

Williams, J. A. (2005). Engineering Tribology. Cambridge University Press.