

# TRIBOLOJİ

## Enerji ve Doğal Kaynakları Daha Verimli Kullanmanın Yolu mu?

Dr. Tuncay Baydemir [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Sanayideki teknolojik gelişmelere, üretim kapasitelerinin artmasına ve makineleşmeye bağlı olarak enerji, hammadde ve çevre sorunları giderek artıyor; insanlık her geçen gün enerji, hammadde ve çevre krizlerine daha da yaklaşıyor. Bu yüzden, temel hedefleri yüzeylerdeki sürtünmeyi kontrol altına alma, aşınmaları azaltma ve yağlama sistemlerini iyileştirme olan triboloji alanındaki gelişmeler günümüzde daha da büyük önem arz ediyor. Öyle ki endüstrideki teknolojik gelişmelerle birlikte, üretim yöntem ve çeşitliliğinin artmasına bağlı olarak, triboloji çalışmalarının hedef kapsamı zamanla genişleyerek yeni malzeme ve kaplama teknolojileri ile enerji ve malzeme tasarrufu yapılması, enerjinin verimli kullanılması, zararlı emisyonların ve atıkların azaltılması, biyolojik ve doğa dostu yağlama sistemlerinin geliştirilmesi, şok emiliminin sağlanması ve çevre/gürültü kirliliğinin azaltılması gibi konularda çeşitlenerek pek çok yeni triboloji dalının ortaya çıkmasına neden oldu.









Prof. H. Peter Jost (1921-2016)  
yaptığı üstün nitelikli çalışmalarla  
tribolojinin öncü kurucusu  
kabul ediliyor.



Society of Tribologists and Lubrication Engineers



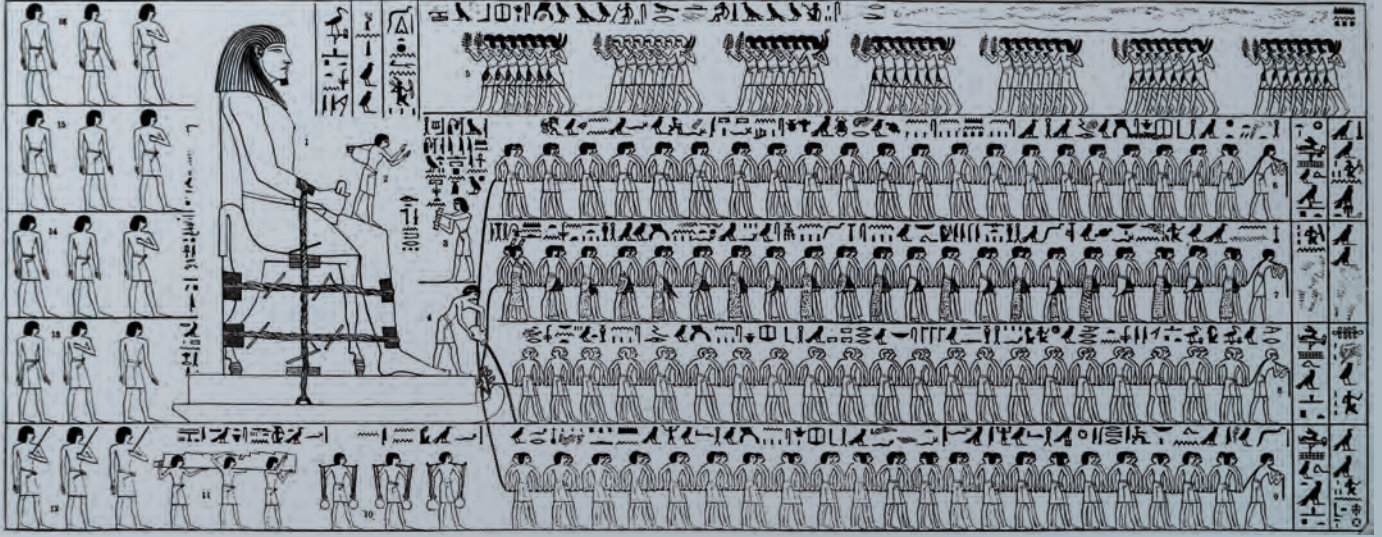
**T**riboloji, görece hareket hâlindeki etkileşimli yüzeylerin sürtünme, aşınma ve yağlama ilkelerini inceleyen bilim ve mühendislik alanıdır. Makinelerde birbirine temas eden hareketli yüzeylerde oluşan sürtünme, küresel enerji kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasının önünde büyük bir engel oluşturuyor. Öyle ki küresel enerji kaynaklarının yaklaşık üçte biri yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin üstesinden gelmek için harcıyor. Yine bu yüzeylerde meydana gelen aşınmalar da malzeme israfı ve mekanik performans kaybının başlıca nedeni olarak gösteriliyor. Bu yüzden triboloji alanındaki gelişmeler ve teknolojik uygulamalar enerji ve malzeme tasarrufu ile birlikte sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşıyor.

Günümüzde yüksek hızlarda çalışan makinelerin bileşenleri aşırı sürtünmelere, yüksek oranda aşınmalara ve zorlanmalara maruz kalıyor. Sonuçta enerji sarfiyatı artıyor, bu bileşenlerin kullanım ömürleri kısalıyor, üretim standartlarının korunması ve üretim güvenilirliği azalıyor. Bu nedenle yüksek teknolojilerin kullanıldığı alanlarda sürtünme ve aşınmanın olumsuz etkilerini en aza indirmek gerekiyor.

## Triboloji de Nereden Çıktı?

Triboloji teriminin kökeni Yunancada sürtünme anlamındaki “tribos” kelimesinden geliyor. Triboloji üzerine yapılan kapsamlı araştırmalar Leonardo da Vinci'nin sürtünme yasaları üzerine yaptığı çalışmalara dayanıyor. Ancak terim ilk kez 1966 yılında İngiliz makine mühendisi Prof. H. Peter Jost tarafından Birleşik Krallık Eğitim ve Bilim Bakanlığı için hazırlanan bir raporda ortaya atıldı. Triboloji disiplininin kurucusu olarak anılan Jost, yayımladığı bu raporla sürtünme, aşınma ve oksitlenmenin Birleşik Krallık ekonomisine olan zararlarını açık bir şekilde ortaya koydu. Teknolojik ve ekonomik açılardan önemi bu sayede daha da iyi anlaşılan triboloji alanında o günlerden bu yana pek çok disiplinler arası araştırma yapıyor.





Eski bir Mısır kabartmasını betimleyen görselde oldukça büyük bir heykelin taşınması sırasında sürtünmeyi azaltmak ve kızıağı daha kolay hareket ettirmek için yere yağlayıcı sıvı döküldüğü görülüyor.

## Tarihte Triboloji

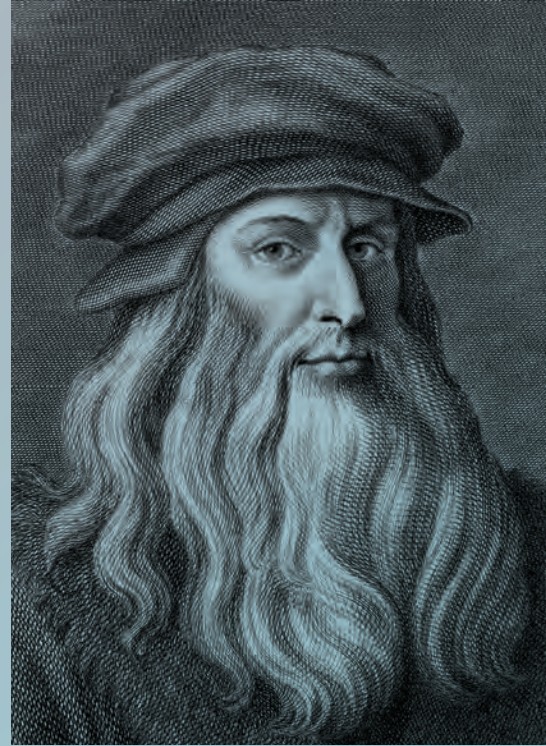
Triboloji tarih boyunca sürekli değişen ve gelişen bir alandır. Kavramın ortaya çıkışı Jost'un 1966'daki raporuna dayansa da çok eski çağlarda bile tribolojinin bazı prensiplerinin kullanıldığı biliniyor.

Bazı bilim insanlarına göre, tarih öncesi dönemlerde odun parçalarını birbirine sürterek ateş yakmak tribolojinin ilk uygulamaları kabul edilebilir. Erken uygarlık dönemi MÖ 3500 ile 900 yılları arasında, ağır nesnelere ve anıtları hareket ettiren sürtünmeyi azaltmak için hayvansal yağ ve bitüm ile yağlama yapıldığını, ayrıca silindirik ahşap parçalar kullanıldığını gösteriyor.

MÖ 2000 yılına ait bazı Mısır kabartmalarında da dev taşlar ve heykeller kızaklarla taşınırken ön tarafta sıvı (yağlayıcı) döken insanlar görülüyor.

MÖ 900 ile MS 400 yılları arasında kaymalı yataklar ve dişlilerde önemli gelişmeler kaydedildi. Makaralı rulmanların ilk tasarımlarının ortaya çıkması da bu döneme rastlıyor. Bu dönemde yağlayıcı olarak bitkisel ve hayvansal yağlardan faydalandı, ayrıca belirli malzemelerin birlikte kullanılmasının sürtünme ve aşınmayı azaltacağı biliniyordu.

Orta Çağ döneminde triboloji alanında bir durgunluk gözlemlendiğini söylemek mümkün. Yine de Çin'de geliştirilen metalik rulmanlar dönemin en önemli gelişmesi olarak sayılıyor.



Leonardo da Vinci (1452-1519) ilk tribolojist olarak da biliniyor.



İtalyan bilgin ve sanatçı Leonardo da Vinci'nin çizimine bağlı kalınarak inşa edilen bilyeli rulman

1450'den 1600'e kadar süren Rönesans Dönemi, tribolojik gelişmelere sahne olsa da yeni teorilerin pratiğe aktarılması tam anlamıyla gerçekleşmedi. Bu dönem triboloji alanında makine bileşenleri, sürtünme ve aşınmayla ilgili pek çok çalışma ve buluşlarla adından söz ettiren Leonardo da Vinci'nin dönemi olarak değerlendiriliyor ve bu nedenle Leonardo da Vinci ilk bilinen tribolojist (sürtünme bilimi uzmanı) olarak da anılıyor. Özellikle sürtünmeyi azaltmak için yaptığı kafesli bilyeli rulman en ünlü çizimlerinden biri olarak kabul ediliyor.

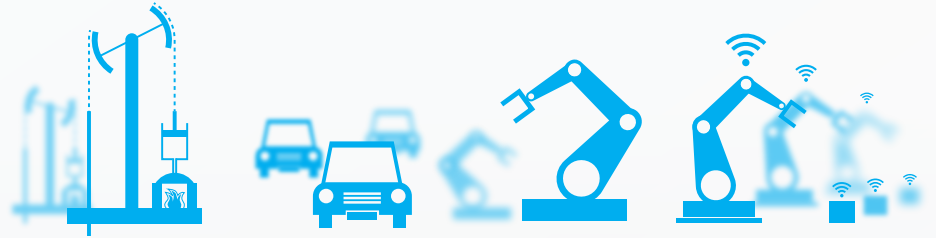
1600-1750 yılları arasında makine yatakları ve dişliler alanında önemli gelişmeler gerçekleşti. Temel geometrik prensipler tanımlandı ve yağlayıcı uygulamaları giderek daha önemli hâle geldi. Robert Hooke (yuvarlanma sürtünmesi ilişkileri), Isaac Newton (akışkanlardaki iç sürtünmenin tanımı, viskozite), Guillaume

Amontons (deneysel çalışmalar ve sürtünme yasaları) ve Leonhard Euler (sürtünmeye analitik yaklaşım ve sürtünme katsayısı) başta olmak üzere çeşitli bilim insanları yaptıkları çalışmalarla triboloji alanına çok önemli katkılarda bulundular.

Sanayi devrimleri ile birlikte tribolojinin önemi de sürekli bir şekilde arttı. Günümüze kadar olan süreçte sanayi ve triboloji alanlarında birbirlerine uyumlu şekilde önemli gelişmeler kaydedildi.

## Tribolojinin Temelleri

Tribolojiyi daha iyi anlamak için sürtünme, aşınma ve yağlama süreçlerinin daha iyi anlaşılması gerekiyor. Sürtünmeyi temas hâlindeki iki yüzeyin arasındaki bağıl harekete karşı olan direnç olarak tanımlayabiliriz. Birbiri ile temas hâlinde bulunan ve izafi kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki fonksiyon yüzeyi arasında sürtünme mevcuttur. Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü,



### Birinci Sanayi Devrimi 1750-1850

- ▶ Makineleşme
- ▶ Su gücü
- ▶ Buhar gücü
- ▶ Buhar motoru
- ▶ İlk mekanik dokuma tezgâhi (1784)

- Sürtünme üzerine çalışmalar
- Dişliler ve yataklar
- Mineral yağlar
- Yağlayıcı formülasyonları
- Coulomb sürtünme yasaları (1781)

### İkinci Sanayi Devrimi 1850-1950

- ▶ Seri üretim
- ▶ Elektrik
- ▶ Mezbahalarda kullanılan ilk üretim bandı (1870)

- Sürtünme-aşınma-yağlama ilişkileri
- Hidrodinamik basınç gelişimi
- Balatalı yataklar
- Yağlarda katkı maddeleri
- Reynolds yağlama teorisi (1886)

### Üçüncü Sanayi Devrimi 1950-2000

- ▶ Bilgisayar ve otomasyon
- ▶ Elektronik bilimi
- ▶ Ticari üretimde ilk programlanabilir mantık denetleyicileri (1969)

- Triboloji terimi (1966)
- Elastohidrodinamik yağlama
- Hesaplamalı ve deneysel triboloji
- Yapışma ve aşınma teorileri
- Temas mekaniği ve yüzey tribolojisi
- Mikro ve nanotriboloji
- Düşük sürtünmeli yataklar
- Yeni malzemeler ve kaplamalar
- Reoloji
- Biyotriboloji

### Dördüncü Sanayi Devrimi 2000'den günümüze

- ▶ Siber fiziksel sistemler
- ▶ Artırılmış gerçeklik
- ▶ İnternet ve bulut teknolojileri
- ▶ Endüstri 4.0 (2011)

- Bahsi geçen tüm alanlarda daha fazla gelişme
- Yeşil triboloji
- Uzay tribolojisi
- Süper yağlama
- Tribotronik (2008)



temas hâlindeki cisimlerin malzeme, geometri ve yüzey özelliklerinin yanı sıra ortam koşullarına da bağlıdır.

Enerji ve malzeme verimliliğini üst düzeye çıkarmak için sürtünmeyi en aza indirmek genellikle istenen bir durumdur. Sürtünme kuvveti genel olarak yük ve yüzey pürüzlülüğü ile artar ve bir yağlayıcı kullanılarak azaltılabilir.

Aşınma, genellikle yüzeylerin birbirini üzerindeki kayma hareketi nedeniyle oluşan malzeme kaybına deniyor. Genel olarak sürtünmenin artmasına ve makine bileşeni arızasına yol açacağı için sistem bileşenlerindeki aşınma istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle bir yağlayıcı kullanarak aşınmanın da sürtünme gibi en aza indirilmesi amaçlanır.

En yaygın iki aşınma modelinin birincisinde daha sert bir malzeme daha yumuşak malzemenin aşınmasına neden olurken diğerinde ise temas hâlindeki iki yüzeyin birinden diğerine malzeme transferi gerçekleşir.

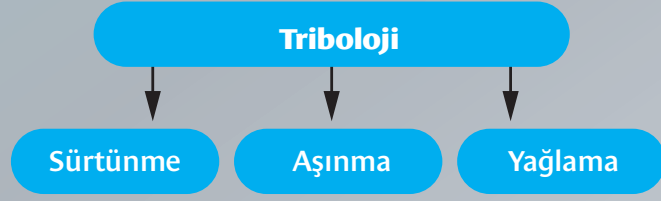
Mekanik bileşenlerde yaygın olarak görülen bir diğer aşınma türü ise yüzey yorulmasıdır. Bu aşınma türü yüzey altı gerilimleri ile malzemede çatlaklara yol açar ve bu çatlaklar zamanla yüzeye doğru büyür. Sonuçta yüzeyde

oyuklar oluşur ve malzeme aşınır. Sistemlerdeki farklı bileşen ve koşullara bağlı olarak darbe ve erozyona bağlı aşınmaların yanı sıra kimyasal aşınma ve elektrik arki aşınmaları da görülebilir.

Yağlama, temas hâlindeki hareketli yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltan bir film katmanı oluşturarak sürtünme ve aşınmanın kontrol edilerek en aza indirgenmesine deniyor. Yağlayıcı filmin katı, sıvı ve hatta gaz olduğu uygulamalar bulunuyor. Yağlayıcılar sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemenin yanında, sıcaklık ve kirleticileri ara yüzden uzaklaştırmak ve ekipmanı korozyondan korumak gibi başka önemli işlevleri de yerine getirebiliyor.

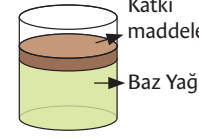
Yağlanmış yüzeylerdeki sürtünme daha az olmasına rağmen yine de sürtünmenin varlığından söz etmek mümkün. Bu sürtünmenin büyüklüğü kullanılan akışkanın viskozitesine yani akmaya karşı olan direncine ve çalışma koşullarına bağlı. Stribeck eğrisi; bağıl hız, yük ve viskozitenin sürtünme üzerine etkilerini açıklamak için kullanılabilir. Bu eğride sınır, karma ve hidrodinamik yağlama bölgeleri bulunur. Düşük hız, düşük

viskozite ya da ağır yüklerde akışkan yükü destekleyemez ve doğrudan yüzey-yüzey teması



gerçekleşir. Sınır yağlama denilen bu bölgede sürtünme azalması görülse de yine de yüksek bir sürtünme kuvveti mevcuttur. Yüksek hız, yüksek viskozite ya da hafif yük durumunda sıvı iki yüzeyi tamamen ayırır ve buna tam film ya da hidrodinamik yağlama bölgesi denir. Bu bölgede sürtünme, hem hız ve viskozitenin artışına hem de yükün azalmasına bağlı olarak artar. Sınır ve tam film yağlama arasında, ara yüzeyin bazı bölümleri sıvı ile tamamen ayrılır, diğer bölgelerde ise tam olarak ayrılmayan karma yağlama bölgesi bulunur. Çeşitli makine bileşenleri işlem sırasında bir veya daha fazla yağlama rejiminde çalışabilir.

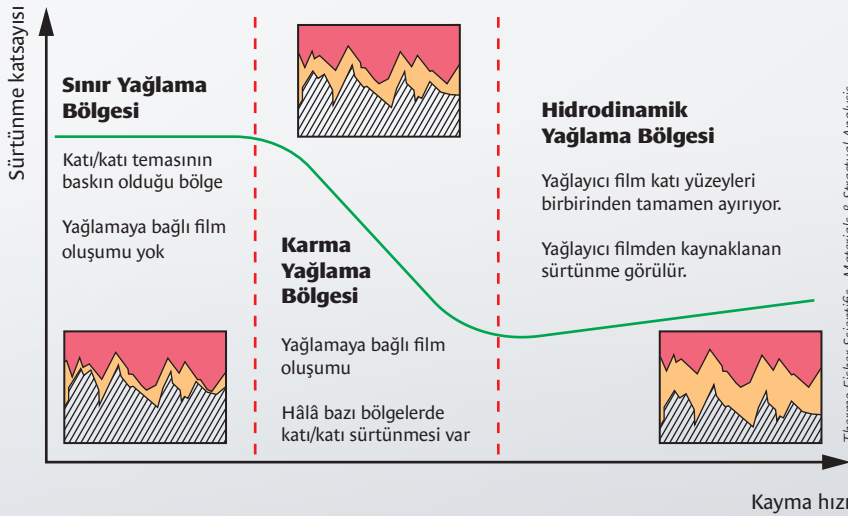
Yağlayıcılar çok çeşitli uygulamalara göre geliştirilebiliyor. Geliştirilen formülasyonlarda genel olarak bir veya daha fazla mineral veya sentetik bazlı yağ kullanılıyor. Bu baz yağlar ham petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yanı sıra bitkisel veya hayvansal kaynaklı olabiliyor. Daha sonra bu yağların performansı kimyasal katkı maddeleri kullanılarak güçlendiriliyor. Çeşitli çalışma koşullarında sınır sürtünmesini en aza indirmek, kimyasal kararlılığı artırmak ve kirlenmeyi azaltmak için kullanılan katkı maddeleri genellikle toplam yağ hacminin %0,1 ile %30'u arasında olacak şekilde ekleniyor.



- Sürtünme düzenleyiciler
- Aşınma önleyiciler
- Antioksidanlar
- Deterjanlar
- Akma noktası baskılayıcılar
- Viskozite düzenleyiciler
- Dağıtıcılar
- Pas ve korozyon önleyiciler
- Köpük önleyiciler

Sıvı yağlayıcılar son derece etkili olmaları bakımından yaygın olarak kullanılıyor. Ancak sıvı yağlayıcıların kullanılmasının uygun olmadığı ve yüklerin hafif olduğu bazı durumlarda yağlama işlemi gazlar kullanılarak gerçekleştirilebiliyor. Örneğin havalı yataklarda basınçlı hava ile oluşturulan ince bir film tabakası düşük sürtünmeli bir arayüz sağlayabiliyor. Diğer bir yağlayıcı türü olan katı yağlayıcılar ise katmanlı yapıları dolayısıyla tercih edilebiliyor.

Uygun yağlayıcı seçilirken öncelikle tribolojik sistemin tam olarak tanımlanması gerekiyor. Hareketin tipi, yüzeylerin fiziksel ve kimyasal yapıları, çalışma hızı, çalışma sıcaklığı, yük ve çalışma koşulları ile çalışma sürecinde sistemde oluşabilecek ısı ya da kirlenme gibi çok çeşitli parametrelerin iyi analiz edilmesi sistem için en uygun yağlayıcının geliştirilmesinde son derece önemli.



Tribolojik veriler genel olarak sürtünme katsayısının kayma hızının bir fonksiyonu olarak gösterildiği Stribeck eğrisi ile gösteriliyor. Bu eğri temelde üç bölgeden oluşuyor.

- Sınır yağlama bölgesinde yağlama filmi oluşmamış hâldedir ve kati/kati teması baskındır. Sürtünme katsayıları yüksektir.
- Karma yağlama bölgesinde ortalama kayma hızına sahip iki yüzey arasında bir yağlayıcı film oluşmaya ve sürtünme katsayısı düşmeye başlar.
- Hidrodinamik yağlama bölgesinde yüksek kayma hızına sahip iki yüzey yağlama filmi ile birbirinden tamamen ayrılır. Artık kati/kati etkileşimi yoktur. Sürtünme katsayısı kayma hızı ile birlikte artış gösterir.

# Disiplinler Arası Çalışmalarla Şekillenen Triboloji Her Yerde

Triboloji; fizik, kimya, makine mühendisliği, malzeme bilimleri, yağlama teknolojileri, iş ekonomisi, iş yönetimi ve endüstriyel yöntemler gibi pek çok alandan bilginin kullanıldığı disiplinler arası bir bilim dalı. Tüm sanayi dallarında büyük önem taşıyan triboloji;

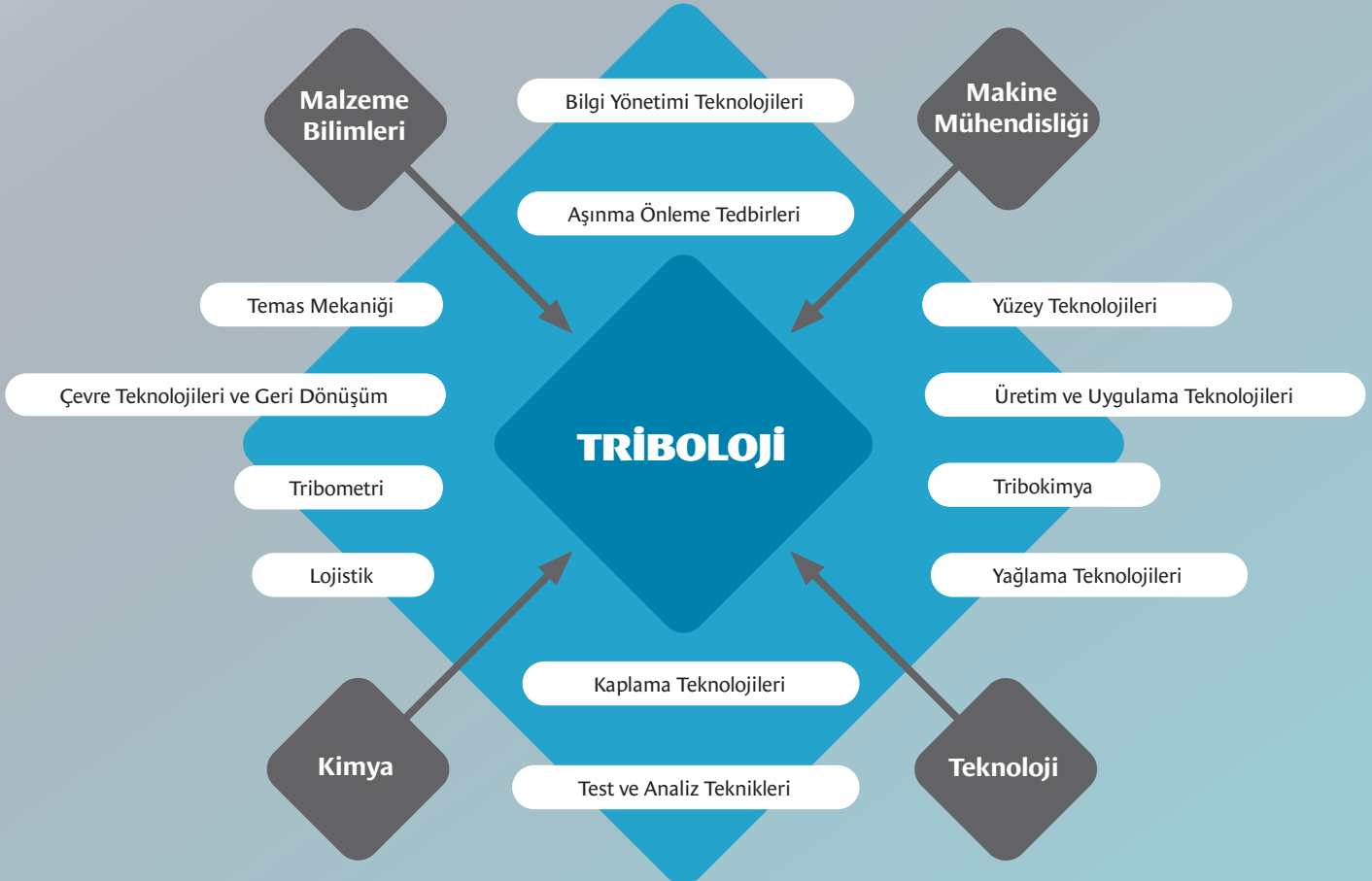
havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri başta olmak üzere mühendislik, tıp, tekstil, optik ve mikroelektronik gibi pek çok endüstri kolunda çok çeşitli uygulamalar buluyor.

## Tribolojinin Çeşitli Endüstri Kollarındaki Uygulamaları

Tribolojinin tarihsel gelişimine bakıldığında; genel olarak rulmanlar, dişliler, miller, frenler ve contalar gibi yuvarlanma veya kayma hareketi yapan bileşenlere

uygulandığı görülüyor. Çok çeşitli makinelerde kullanılan tüm bu bileşenlerin verimliliğini artırmaya ve kullanım ömürlerini uzatmaya odaklanan girişimlerden elde edilen başarılar süreç içerisinde yapılan yeni araştırmalarla birlikte daha iyi tribolojik uygulamaların geliştirilmesine zemin hazırlıyor.

Tribolojik uygulamalar makro ölçekten nano ölçeğe kadar çeşitlilik gösterebiliyor. Geleneksel anlamda ulaşım ve imalat sektörlerine odaklı triboloji çalışmalarının son zamanlarda farklı alanlarda da kritik öneme sahip olduğu ortaya kondu.







çalışmaları oral, oküler, yapay eklem uygulamaları ve kardiyovasküler triboloji gibi alanlara ayrılıyor.

Oral triboloji ağız ve diş sağlığıyla ilgili tribolojik çalışmaları kapsıyor. Yaşlılığa veya çeşitli rahatsızlık ve kazalara bağlı olarak kişi kısmi veya tam diş ve damak protezlerine ihtiyaç duyabiliyor. Dayanıklı protezler geliştirilmesi için aşınma mekanizmalarının araştırılması gerekiyor. Oral triboloji çalışmaları insan yaşamını olumsuz etkileyecek olası aşınmaların nedenlerini ve nasıl kontrol altına alınabileceğini ortaya koymak adına önem taşıyor.

Oküler triboloji gözle ilgili tribolojik çalışmaları kapsıyor. Göz kapaklarının kornea üzerindeki sürekli hareketi, yapay mercek ve kontak lenslerin aşınmasına neden oluyor. Bu aşınmanın önlenmesi için daha gelişmiş malzemeler kullanılması ve uygun yağlama mekanizmaları gerekiyor. Bu alanda yapılan çalışmalar daha iyi lens ve merceklerin üretilmesini, daha etkili yağlama mekanizmaları sayesinde aşınmaların önüne



## Biyolojik Sistemler ve Triboloji

Tribolojinin biyolojik sistemlerdeki önemini ortaya koymak adına, biyotriboloji terimi ilk defa Duncan Dowson ve Verna Wright tarafından 1970 yılında kullanıldı. Genel anlamda biyotriboloji, tribolojinin biyolojik sistemlerle olan ilişkisini çeşitli yönleriyle ortaya koyan çalışma alanıdır.

İnsanlardaki kemik ve kıkırdak yapıların yatak yüzeyleri yeterli yağlanmadığında zamanla aşınmaya uğrar ve çeşitli rahatsızlıklara neden olur. Bu rahatsızlıkları engellemenin ve gerekli tedavileri uygulayabilmenin yolu biyotribolojideki gelişmelerden geçiyor. İnsan sistemlerinde triboloji

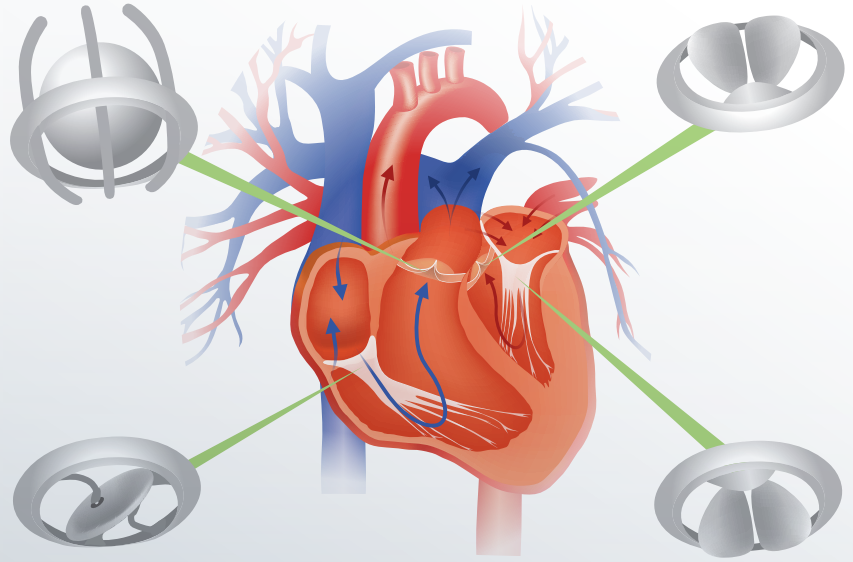


## Klasik Triboloji

Klasik triboloji; enerji, malzeme ve üretim verimliliğini sağlamak üzere diğer üretim aşamaları ile birlikte dişliler, rulmanlar, kaymalı yataklar, kavramalar, frenler ve tekerlekler gibi makine parçalarının sürtünme ve aşınma süreçleri ile yağlama yöntemlerine odaklanıyor.

geçilmesini, sonuç olarak kişilerin yaşam kalitesinin yükselmesini sağlıyor.

Yapay eklemlerin tribolojisi de bir diğer önemli biyotriboloji kolu. Hareketli eklemlerde, eklemler arasında yağlama görevini gerçekleştiren ve bu sayede eklemlerin sürtünmesini azaltarak aşınmalarını engelleyen sıvılar bulunuyor. Doğal eklemler zamanla veya bazı rahatsızlıklara bağlı olarak aşınabiliyor ve kişinin yaşam kalitesini olumsuz etkileyebiliyor. Hareketli eklemler üzerine yapılan tribolojik çalışmalar, sürtünme, aşınma ve yağlama mekanizmalarının anlaşılmasına; böylece yapay eklemler için uygun malzeme ve üretim süreçlerinin geliştirilmesine yardımcı oluyor. Bu amaçla şimdiye kadar çeşitli metal üzeri metal, polimer üzeri metal, seramik üzeri seramik, polimer üzeri seramik ve metal üzeri seramik yapay eklemler başarılı bir şekilde geliştirildi.



Mekanik kalp kapakçıkları; plastik, karbon ve metal gibi malzemelerden üretiliyor ve amaca göre farklı yapılarda tasarlanabiliyor.

Kalp kapakçıkları zarar görmüş hastalara da mekanik (metal, plastik, karbon vb.) veya biyoprotez (insan veya hayvan dokusu) kalp kapakçıkları takılabiliyor. Ancak mekanik kapakçıklardaki kontrolsüz sürtünme ve aşınma istenmeyen sonuçlara hatta ölümlere yol açabiliyor. Bunların engellenmesi için tribolojik çalışmalar büyük önem arz ediyor. Mekanik

kapakçıklarla karşılaştırıldığında, biyoprotez kapakçıklarda sürtünme ve aşınma çok daha az olduğu için bunlar üzerine çok fazla tribolojik çalışma bulunmuyor.

Ayrıca ventriküler yardımcı cihazlarda da biyotriboloji önemli bir rol oynuyor. Kalp odacıklarında bir sorun olduğunda kullanılan pompaları oluşturan parçaların tribolojik incelenmesi, uygun malzemelerin kullanılmasıyla sürtünme ve aşınmanın azaltılmasına yardımcı oluyor. Böylece pompaların uzun vadede işlevlerini sorunsuz ve eksiksiz bir şekilde yerine getirmesi sağlanıyor.

Tüm bunlara ek olarak deri, saç, kemik ve hücre gibi insan vücudunun çok çeşitli kısımları; çeşitli tıbbi cihaz ve malzemeler; bazı hayvan ve bitkiler de çeşitli triboloji araştırmalarının konusu.







## Okyanus Tribolojisi

Açık deniz makinelerinin bileşenleri; aşırı yük, zorlu hava koşulları ve titreşimin yanı sıra tuzlu hava ve suya maruz kalıyor. Tribolojinin bu dalı da deniz ve okyanus ortamındaki sürtünme, aşınma ve yağlama araştırmalarını kapsıyor. Makine bileşenlerindeki arızalar bu tür ortamlarda diğerlerine göre daha fazla görülüyor. Deniz ve okyanus sularının aşındırıcı özellikte olması makinelerin mekanik



parçalarının yüzeylerinde pürüzlere yol açıyor. Ayrıca yağlamanın etkisi zamanla azalıyor, bu da sürtünmeyi ve dolayısıyla enerji sarfiyatını artırıyor.

Diğer yandan, deniz suyunun aşındırıcı özelliği yüzünden doğaya zararlı maddeler salınıyor ve ekolojik denge bundan olumsuz etkileniyor. Bu nedenle okyanus ve deniz suyu ortamlarında kullanılmak üzere polimerler, metaller, alaşımlar ve bunların farklı kombinasyonları hakkında çeşitli tribolojik araştırmalar yapılıyor. Bu çalışmalar sayesinde zorlu koşullar altında bile daha az sürtünmeye ve aşınmaya uğrayan malzemeler geliştirilebiliyor. Böylece makine bileşenlerinin korunması ve enerji sarfiyatının azaltılması amaçlanıyor.

## Üretimde Triboloji

Üretim işlemlerinde kullanılan metal işleme sıvıları üzerine yapılan çalışmaları kapsayan üretim tribolojisi alanı; tormalama, frezeleme, taşlama ve delme gibi işlemlerde soğutma ve yağlama amacıyla kullanılan sıvılar üzerine yoğunlaşıyor. Kullanılan metal işleme sıvılarının çoğu, iyi soğutma ve yağlama özelliklerine sahip mineral yağlar. Üretim sisteminin verimliliğini artıran bu yağların en büyük dezavantajı biyobozunur ve geri dönüştürülebilir olmamaları. Yılda yaklaşık 320.000 ton mineral yağ kullanıldığı ve bunun büyük kısmının atık hâline geldiği göz önüne alındığında, mineral yağlar yerine daha çevreci ve etkili alternatiflerin geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkıyor. Bitkisel

yağlar iyi bir alternatif olarak gözükse de yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme eğilimleri kullanımlarını sınırlandırıyor. Sürtünme ve aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılması ile birlikte soğutma ve yağlama işlevlerini en az miktarda kullanımla gerçekleştirecek yağlayıcıların geliştirilmesi için araştırmalar devam ediyor.

## Otomotiv Sektörü ve Triboloji

Kaynakları verimli kullanmak ve zararlı kimyasal madde emisyonlarını kontrol altına almak amacıyla hükümetler çeşitli yasa ve yönetmelikleri birbiri ardına uygulamaya koyuyorlar. Bu yeni düzenlemeler otomobil endüstrisini enerji tasarrufu sağlayan çevre dostu araçlar geliştirmeye zorluyor.

Bu amaçla otomobillerde sürtünme ve aşınmayı azaltıcı motor yağları geliştirilmesi için sürekli olarak araştırmalar yapılıyor. İstatistikler Amerika Birleşik Devletleri otomotiv sektöründeki sürtünme ve aşınmaların azaltılmasıyla yapılacak tasarrufların yılda 20 milyar doları bulabileceğini gösteriyor.

Otomobillerdeki tribolojik kısımlar; motor, şanzıman, çekiş tahriki, aktarma organları

ve yardımcıları kapsıyor. Bu kısımlar farklı otomobil türlerine göre çeşitlilik gösterebiliyor. Otomobil parçaları üzerine yapılan tribolojik çalışmalar daha uygun bileşenlerin kullanılmasına olanak sağlıyor. Ayrıca daha iyi performansa sahip ve çevre dostu yağlayıcıların geliştirilmesi sayesinde sürtünme ve aşınmaların azaltılmasının yanı sıra enerji ve malzeme tasarrufu da mümkün oluyor.

Batarya, yakıt hücresi veya hibrit sistemlerle çalışan elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarını azaltmak ile temiz ve sağlıklı bir çevre sağlamak adına içten yanmalı motorlara uygun bir alternatif olarak görülüyor. Sadece binek araçlarda değil, ağır hizmet araçlarında da kullanılan teknoloji çok önemli avantajlar sunuyor.

Elektrikli araçlar enerji tüketimi açısından yüksek derecede verimli olsa da bu verimliliğin daha fazla artırılması mümkün. Ancak bunu gerçekleştirmek için aşılması gereken bazı zorluklar bulunuyor. Bu zorluklardan bir tanesi enerji kaybına neden olan sürtünmeler. Yapılan bir çalışmaya göre, elektrikli araca sağlanan enerjinin yaklaşık %57'si sürtünmeye bağlı enerji kayıplarının üstesinden gelmek için kullanılıyor. Bu kayıpların %1'i elektrik motorunda, %3'ü şanzımanda, %41' yuvarlanma direncinde, %12'si de frenlerde gerçekleşiyor.

Elektrikli araçlarda, üzerinde çalışılan kritik tribolojik bileşenler temel olarak konfor ve güvenlik cihazları (klima sistemi, silecekler gibi), direksiyon sistemi, elektrik motoru, şanzıman, sabit



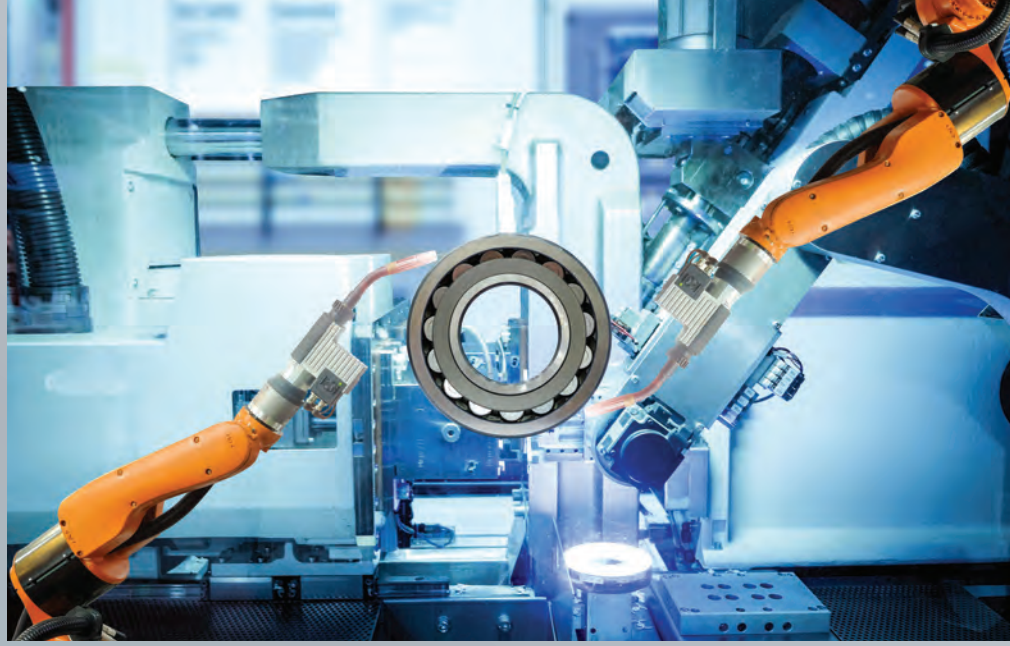


hız mafsalı, süspansiyonlar, tekerlekler, tekerlek rulmanları, mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) ve kinematik enerji geri kazanım sisteminden oluşuyor. Her bir sistemdeki farklı tribolojik bileşenler önemli miktardaki enerjiyi sürtünme yüzünden kaybediyor. Elektrikli araçlar üzerine yapılan triboloji çalışmaları bu araçların daha verimli ve çevre dostu olmalarını sağlamak adına büyük önem taşıyor.

## Triboloji 4.0

Tribolojideki son teknolojiler endüstriyel bileşenlerin veya sistemlerin hem tasarım aşamasında hem de çalışmaları (izleme, sürtünme-aşınma-yağlama problemlerine dayalı düzeltici eylemler) sırasında önemli bir yere sahip. Makine elemanlarının verimliliği, performansı ve kullanım ömrü, doğru bir tribolojik tasarımla önemli ölçüde artırılabilir.

Endüstri 4.0 uygulamalarında tribolojinin büyük katkıları rahatlıkla görülüyor. Hatta bu etkileşim “Triboloji 4.0” teriminin ortaya çıkmasına neden oldu. Çeşitli endüstriyel alanlarda tribolojik verilerin iletimi internet ve kablosuz bağlantılar gibi bilgi ve iletişim teknolojileri aracılığıyla gerçekleşiyor. Günümüzde endüstrinin temel teknolojileri ve tribolojinin farklı etkileşimleri de bulunuyor.



Tribolojinin elektronik (sensörler, akıllı makineler) ve bilişim (bilgisayarlar, internet, nesnelerin interneti, kablosuz veri iletimi) alanları ile etkileşimi günümüz teknolojileriyle birlikte oldukça güçlü durumda. Sensörler yardımıyla hem makinelerin aşınma durumu hem de yağlayıcılar hakkında güvenilir bilgiye kolaylıkla erişilebiliyor. Tribolojinin elektronik bileşenlerle olan bu güçlü bağlantısı da “tribotronik” terimi ile ifade ediliyor.

Bir makine çalışırken sorunların en kısa sürede tespit edilmesi arıza süresinin ve maliyetlerin azaltılması bakımından çok önemli. Günümüzde kullanılan akıllı tribolojik sistemler aşınma, sürtünme, yağlama durumu, titreşim ve sıcaklık gibi pek çok veriyi izleyebiliyor; bu verilere göre sistem performansını

iyileştirmek adına gerekli değişiklikleri ve ayarlamaları yapabiliyor. Böylece kontrol, değerlendirme ve harekete geçerek gerekli düzenlemeleri yapma mekanizmaları sağlıklı bir şekilde yürüyor.

## Bazı Veriler İşığında Genel Değerlendirme

Gelişmiş toplumlarda çok çeşitli endüstriyel faaliyetlerin enerjiyi verimli kullanan ve çevre dostu olarak sürdürülebilir kılınması gerekiyor. Sürtünme ve aşınma; ulaşım, imalat, enerji üretimi ve konut gibi sektörlerde enerji tüketimi, maliyet ve sera gazı emisyonlarını artıran önemli etmenler. Yapılan son araştırmalarda elde edilen verilere göre, dünyanın toplam enerji tüketiminin yaklaşık



% 23'ü yani 119 exajoule (1 exajoule =  $1 \times 10^{18}$  J)'lük kısmı tribolojik temaslardan kaynaklanıyor. Bu enerjinin % 87'lik kısmı sürtünmeyi yenmek için, %13'lük kısmı da aşınmış parça ve yedek ekipmanı yeniden üretmek için harcanıyor.

Dünya genelinde kullanılan araç, makine ve diğer ekipmanlardaki sürtünmenin azaltılması ve aşınmanın engellenmesi için geliştirilen yüzey, malzeme ve yağlama teknolojileri ile enerji kayıplarının 8 yıllık süreçte %18, 15 yıllık süreçte ise %40 azaltılabileceği öngörülüyor. En büyük orandaki enerji tasarrufu ulaşım sektöründe öngörülürken bunu sırasıyla enerji üretimi, imalat ve konut sektörleri izliyor.

Gelişmiş triboloji teknolojilerinin küresel seviyede uygulanmasının sera gazı emisyonlarında da önemli ölçüde azalmaya yol açması bekleniyor. Karbondioksit gazı emisyonlarının kısa vadede yılda 1,5 milyon ton, uzun vadede ise 3 milyon ton azaltılabileceği öngörülüyor. Tüm bunlarla

birlikte uzun vadede yapılacak tasarrufun yaklaşık 970 milyar avroya ulaşacağı anlamına geliyor.

Çok sayıda hareketli ve birbirine temas eden yüzeyin bir arada bulunduğu, gelişmiş ve karmaşık makineler ile üretim teknolojilerindeki tüm bileşenlerin sorunsuz, güvenilir ve uzun ömürlü olması, temas yüzeylerinde oluşan sürtünme ve aşınmanın ne kadar iyi kontrol edildiğine bağlı. Bu nedenle triboloji araştırmaları çevre dostu malzemeler ve teknolojiler geliştirilmesi ve enerji ile hammadde kaynaklarının verimli kullanılması adına büyük önem taşıyor. Sonuç olarak, triboloji alanında geliştirilen yeni teknolojiler ile bunların endüstriye entegrasyonu enerji verimliliği ve sürdürülebilir bir toplum için önemini korumaya devam ediyor. ■

## Kaynaklar

- Farfan-Cabrera, L.I., "Tribology of electric vehicles: A review of critical components, current state and future improvement trends", *Tribology International*, 138, ss.473-486, 2019.
- Findik, F., "Latest progress on tribological properties of industrial materials", *Materials and Design*, 57, ss.218-244, 2014.
- Anand, A., Haq, M.I.U., Vohra, K., Raina, A., Wani, M.E., Role of Green Tribology in Sustainability of Mechanical Systems: A State of the Art Survey", *Materials Today: Proceedings*, 4, ss.3659-3665, 2017.
- Shah, R., Woydt, M., Huq, N., Rosenkranz, A., "Tribology meets sustainability", *Industrial Lubrication and Tribology*, 73/3, ss.430-435, 2021.
- Akça, H., İyibilgin, O., Gepek, E., "Biyomalzemelere ile İmplant Üretimi Sürecinin Biyotriboloji Yönünden Değerlendirilmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, ss.667-692, 2020.
- Dašić, P., Franek, F., Assenova, E., Radovanović, M., "International standardization and organizations in the field of tribology", *Industrial Lubrication and Technology*, 55/6, ss.287-291, 2003.
- Ciulli, E., "Tribology and Industry: From Origins to 4.0", *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5/55, 2019.
- Holmberg, K., Erdemir, A., "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emission", *Friction*, 5(3), ss.263-284, 2017.
- Shafi, W.K., Raina, A., Haq, M.I.U., Khajuria, A., "Interdisciplinary aspects of Tribology", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Cilt 5, Sayı 2, ss.5-8, 2018.
- Nosonovsky, M., Bhushan, B., "Green tribology: principles, research areas and challenges", *Philosophical Transactions of Royal Society A*, 368, ss.4677-4694, 2010.
- Zhang, X., Zhang, Y., Jin, Z., "A review of the bio-tribology of medical devices", *Friction* (2021). <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0512-6>
- Zhang S., "Green tribology: Fundamentals and future development", *Friction*, 1(2) ss.186-194, 2013.
- <https://faculty.ucmerced.edu/amartini/tribology.shtml>
- <https://www.machinerylubrication.com/tribology-31340>
- <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf>