

# BİLYELİ DEĞİRMENLERDE SÜRTÜNME VE AŞINMA KONTROLÜ: HİDROSTATİK YAĞLAMA SİSTEMLERİNDE AKÜMÜLATÖR DESTEKLİ ÇÖZÜMLER

**Önder ÖZER**  
**Emircan DEMİRBAŞ**  
**Cüneyt ERKUŞ**  
**Fikret DALKIRAN**

## ÖZET

Maden öğütme işlemlerinde bilyeli değirmenler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin yüksek yük altında çalışması nedeniyle kaymalı yataklarda sürtünme ve aşınma en önemli problemdir. Bu alanda, sürtünme ve aşınmayı minimize etmek amacıyla hidrodinamik ve hidrostatik yağlama gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Hidrolik güç ünitesi, hidrostatik yatak yağlama sisteminde bir yağ filmi oluşturmaktadır. Oluşturulan bu yağ filmi sayesinde yatak ile mil arasında gerçekleşen sürtünme en aza indirilmektedir. Ancak, bilyeli değirmenlerde meydana gelebilecek elektrik kesintisi gibi ani duruşlarda, yağlama sisteminin durmasına rağmen bilyeli değirmen kendi atalet momentiyle bir süre daha dönmeye devam etmektedir. Bunun sonucunda yatak üstündeki yağ basıncı düşerek temas yüzeylerindeki aşınma ve hasar riskini artırmaktadır. Bu çalışmada, yağlama sisteminde meydana gelebilecek ani duruş kaynaklı sorunlara önlem olarak hidrolik akümülatör sistemi ile çözüm üretilmesi ele alınacaktır. Ayrıca, yağlama sistemine yerleştirilecek sensörler ile basınç, sıcaklık, akış ve yağdaki su oranı gibi parametreler anlık olarak ölçülebilecek ve takip edilebilecektir. Sunulan bu çözümler ile yağlama sisteminin kontrolü sağlanarak makine ömrünün uzatılması hedeflenmektedir. Böylece, maden öğütme gibi ülke ekonomisi için önemli olan sektörlerde verimliliğin artırılacağı değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaymalı Yatak Yağlama, Yağlama, Bilyeli Değirmen, Akümülatör

## ABSTRACT:

Ball mills are widely used in mineral grinding processes. Due to the high loads these systems operate under, friction and wear in sleeve bearings constitute the most critical problem. To minimize friction and wear in this field, various methods such as hydrodynamic and hydrostatic lubrication are employed. In a hydrostatic bearing lubrication system, the hydraulic power unit generates an oil film, which minimizes friction between the journal and the bearing surface. However, during sudden stoppages (e.g., power outages), the lubrication system halts while the ball mill continues rotating due to its moment of inertia. Consequently, oil pressure on the bearing drops, increasing the risk of wear and damage on contact surfaces. This study addresses this issue by proposing a hydraulic accumulator system as a preventive measure against sudden lubrication system failures. Additionally, sensors integrated into the lubrication system will enable real-time monitoring of parameters such as

pressure, temperature, and flow rate. These solutions aim to enhance lubrication system control and extend machinery service life. Thus, it is anticipated that efficiency in economically critical sectors like mineral grinding can be improved.

**Key Words:** Sleeve Bearing Lubrication, Lubrication, Ball Mill, Hydraulic Accumulator

## 1. GİRİŞ

Bilyeli değirmenler, maden cevherlerinin öğütülmesinde yaygın olarak kullanılan temel ekipmanlardan biridir. Bu makineler, yüksek çalışma yükleri altında faaliyet gösterdiklerinden, kaymalı yataklarında ciddi düzeyde sürtünme ve aşınma sorunlarıyla karşılaşmaktadır [1]. Özellikle ağır hizmet tipi sanayi uygulamalarında kullanılan yataklar; yüksek statik ve dinamik yükler altında çalışmakta olup, bu da yatak yüzeylerinde plastik deformasyon ve yüzey yorulmasına bağlı aşınma problemlerine yol açabilmektedir. Sürtünmeyi ve aşınmayı en aza indirmek amacıyla literatürde hidrodinamik [2] ve hidrostatik [3] yağlama sistemleri gibi çeşitli gelişmiş yağlama yöntemleri önerilmektedir. Özellikle hidrostatik yatak yağlama sistemleri, harici bir hidrolik güç ünitesi vasıtasıyla mil ile yatak arasında kararlı bir yağ filmi oluşturularak doğrudan metal-metal temasını önlemekte ve bu sayede sürtünmeyi önemli ölçüde azaltmaktadır [4]. Hidrostatik yataklar, yüksek yük taşıma kapasitesi ve düşük sürtünme katsayısı gibi avantajları nedeniyle ağır sanayi makinelerinde ve yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir [5].

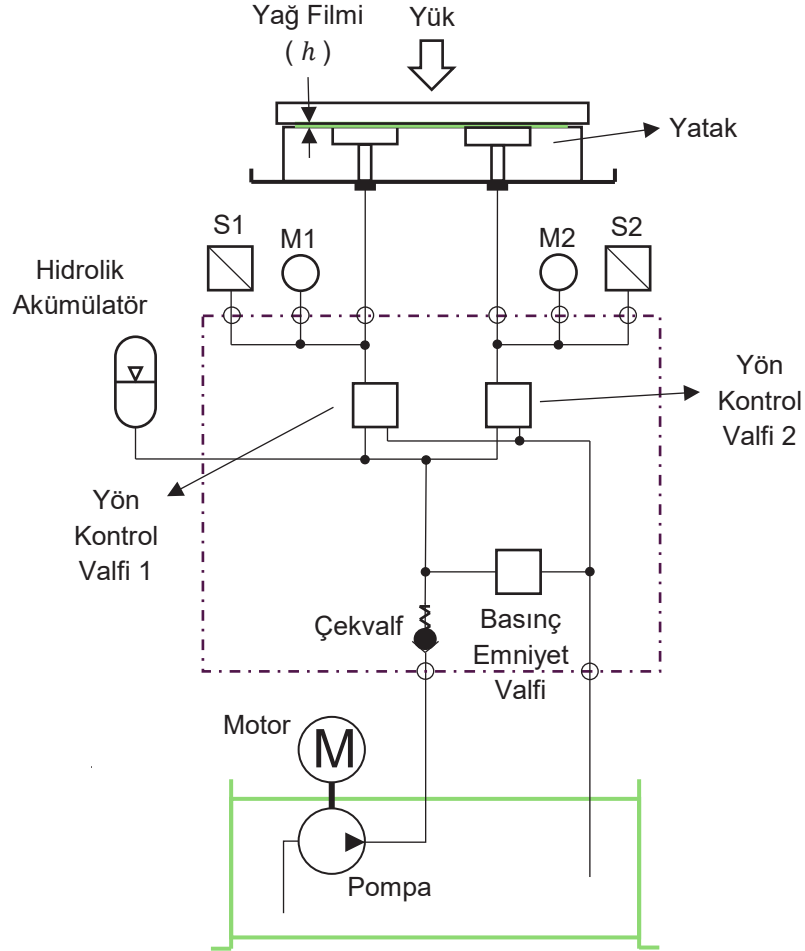
Ancak, bilyeli değirmenlerin çalıştığı zorlu endüstriyel ortamlarda elektrik kesintisi gibi beklenmedik duruşlar önemli bir risk teşkil etmektedir. Yağlama sisteminin ani durması halinde, değirmen yüksek atalet momenti nedeniyle dönmeye devam etmekte ve yağ basıncının hızla düşmesiyle birlikte yataklarda metal-metal teması gerçekleşebilmektedir. Bu durum, yatak yüzeylerinde geri dönüşü olmayan aşınma ve yapısal hasar riskini artırmaktadır. Özellikle yüksek ataletli sistemlerde bu tür durumların daha ciddi sonuçlara yol açtığı bilinmektedir.

Bu çalışmada, hidrostatik yağlama sistemlerinin ani duruşlardan kaynaklı olası arızalara karşı korunmasını sağlamak amacıyla, sistemin güvenilirliğini artıran çeşitli önlemler önerilmektedir. Bu önlemlerden biri olarak, ani elektrik kesintisi gibi durumlarda devreye girerek yağ filminin sürekliliğini sağlayan hidrolik akümülatör destekli bir sistem sunulmaktadır. Akümülatörler, ani elektrik kesintisi gibi duruşlarda devreye girerek yağ filminin sürekliliğini sağlayacak ve böylece temas yüzeylerinde oluşabilecek hasar riski en aza indirilecektir [6].

Ek olarak, sistemin işlevselliğini artırmak ve arıza öncesi bakım kabiliyeti kazandırmak amacıyla, basınç, sıcaklık, debi ve yağdaki su oranı gibi kritik parametreleri izleyen sensörler entegre edilecektir. Bu veriler, Endüstri 4.0 altyapısı aracılığıyla gerçek zamanlı takip edilecek ve bu sayede kestirimci bakım uygulamaları mümkün hale gelecektir [7]. Sunulan bu yaklaşım ile yağlama sisteminin performansı optimize edilirken bilyeli değirmenlerin servis ömrünün uzatılması ve enerji yoğun sektörlerde operasyonel verimliliğin artırılması hedeflenmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

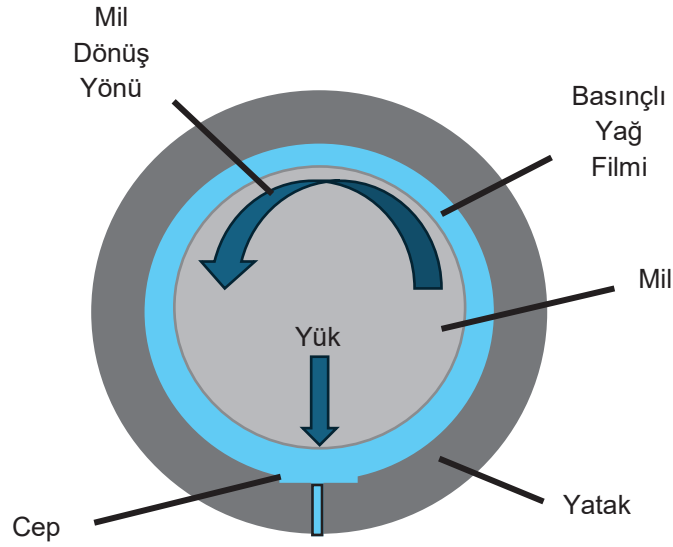
Bu çalışmada, referans olarak alınan bir bilyeli değirmen uygulamasındaki hidrostatik yatak yağlama sistemine dayanarak, sistemin ani duruşlara karşı güvenliğini artırmaya yönelik bir çözüm önerisi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, olası enerji kesintisi ya da ani duruş sırasında yağ basıncının sürekliliğini sağlamak amacıyla uygun özelliklere sahip bir akümülatör seçilmiş ve sisteme entegre edilmiştir. Sistemin genel şematik yapısı Şekil 1'de sunulmaktadır.



**Şekil 1.** Hidrostatik Yatak Yağlama Sisteminin Basitleştirilmiş Devre Şeması

Şekil 1'de, bilyeli değirmenlerde kullanılan hidrostatik yatak yağlama sistemine ait basitleştirilmiş bir devre şeması yer almaktadır. Bu sistem, elektrik motoru tahrikli bir pompa, hidrolik yağ tankı, basınç hattına entegre edilmiş balonlu tip bir akümülatör [8] ve çeşitli kontrol valfleri ile sensörlerden (S) oluşmaktadır.

Şekil 2’de gösterildiği üzere, yağ, sistem içerisinde yatak yüzeyinde bulunan ceplere yönlendirilmekte; burada oluşturduğu basınç sayesinde mil ile yatak yüzeyleri arasında bir yağ filmi oluşmakta ve bu sayede yüzeyler fiziksel temastan korunmaktadır [9]. Özellikle ani duruşlar ve enerji kesintileri gibi beklenmeyen durumlar karşısında bu yağ filminin sürekliliği kritik öneme sahiptir. Bu nedenle sistem tasarımında temel amaç, söz konusu durumlar sırasında yağ basıncının korunarak yüzeyler arasındaki yağ filminin devamlılığını sağlamaktır. Bu doğrultuda, sistem devre dışı kaldığında akümülatörün sınırlı bir süre boyunca basınç desteği sağlayarak metal-metal temasını önlemesi ve böylece yüzey aşınmasının engellenmesi hedeflenmiştir [10]. Devre üzerinde yerleştirilen manometreler (M) ve sensörler (S), sistemin farklı noktalarındaki basınç ve sıcaklık değerlerinin izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede sistem koşulları gerçek zamanlı olarak takip edilebilmekte ve olası arızalara karşı önleyici bakım stratejileri geliştirilebilmektedir.



Şekil 2. Hidrostatik Yatak Yağlama Sisteminin Şematik Gösterimi

Sürtünme performansı, özellikle sürtünme ve enerji kaybı açısından değerlendirildiğinde, mil ile yatak yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvveti ( $F_f$ ) Denklem 1’de [11] gösterildiği üzere:

$$F_f = \mu A \frac{u}{h} \quad (1)$$

Burada:  $\mu$ , yağın viskozitesini;  $A$ , temas yüzey alanını;  $u$ , bağıl yüzey hızını;  $h$  ise yağ filmi kalınlığını ifade etmektedir. Bu sürtünme kuvveti, sistemde belirli bir enerji kaybına neden olmakta olup, bu durum sürtünme gücü ( $P_f$ ) ile temsil edilmektedir [11].

$$P_f = \mu A \frac{u^2}{h} \quad (2)$$

Yağ filmi kalınlığının ( $h$ ) ani bir duruş senaryolarında sıfıra yaklaşması, teorik olarak sürtünme kuvveti ve dolayısıyla enerji kaybının dramatik şekilde artmasına yol açabilmektedir. Bu durum, yatak yüzeylerinde ani sıcaklık artışları ve kalıcı hasar riski yaratmaktadır. Dolayısıyla, sisteme entegre edilen akümülatör yalnızca basınç desteği sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda yağ filmi sürekliliğini muhafaza ederek olası yüzey hasarlarının önüne geçmektedir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Referans sistemin tasarımında ihtiyaç duyulan pompa debisi 44 lt/dk olarak belirlenmiştir. Yağlama sistemi dört ayrı hat üzerinden çalıştığı için, bu debi her hatta eşit olarak dağıtılmaktadır. Hat başına düşen debi lt/sn olarak hesaplandığında:

$$Q = \frac{44}{4} = 11 \text{ lt/dk} \Rightarrow Q = \frac{44}{60} \approx 0,733 \text{ lt/sn} \quad (3)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Ani duruş yaşandığında her hattın yaklaşık 25 saniye boyunca yağ beslemeye devam etmesi hedeflenmektedir. Bu durumda hat başı gerekli hacim:

$$V = 0,733 \left( \frac{\text{lt}}{\text{sn}} \right) \times 25(\text{sn}) = 18,325 \text{ Litre} \quad (4)$$

olarak belirlenmiştir. Toplamda ise sistemin 25 saniyelik süre boyunca ihtiyacı olan toplam yağ hacmi 14,66 litre olmaktadır.

Bu gereksinim doğrultusunda, her bir hattın 18,325 L yağ ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede akümülatörler seçilmiştir. Sistemde dört adet akümülatör kullanılmasıyla birlikte, ani duruş senaryolarında yağ basıncının korunması, yağ filmi sürekliliğinin sağlanması ve yatak yüzeylerinde meydana gelebilecek metal-metal temasının önlenerek aşınma risklerinin minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Referans sistem tasarımına uygun akümülatör seçiminde ön şarj basıncı  $p_0 = 60$  bar, maksimum sistem basıncı 150 bar ve minimum çalışma basıncı 65 bar olarak belirlenmiştir.

Sistemde kullanılacak akümülatörlerin güvenli çalışma koşullarını sağlayabilmesi için, gerekli minimum hacim değerinden daha yüksek bir depolama kapasitesine sahip olmaları tercih edilmiştir. Bu kapsamda, her biri nominal gaz hacmi 15 L ve efektif gaz hacmi 14,5 L olacak şekilde akümülatörler seçilmiştir. Sistemde kullanılan basınç değerleri dikkate alınarak akümülatörün sağlayabileceği efektif yağ hacmi aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$\Delta V = V_0 \left( \frac{p_0}{p_1} - \frac{p_0}{p_2} \right) \quad (5)$$

$$\Delta V = 14,5 \left( \frac{60}{65} - \frac{60}{150} \right) \approx 7,58 \text{ Litre} \quad (6)$$

Her bir yağlama hattının ani duruş sırasında 4,575 litre yağ ihtiyacı bulunduğundan, seçilen akümülatörler ile ihtiyaç duyulan yağ miktarı karşılanacaktır. Bu nedenle, dört adet akümülatör kullanılarak sistemin ani duruşlarda yağ basıncını koruması, yağ filmini sürekliliğini sağlaması ve yatak yüzeylerinde oluşabilecek metal-metal teması ile aşınma risklerini etkin şekilde önlemesi amaçlanmıştır.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, bilyalı değirmenlerde kullanılan hidrostatik yağlama sistemlerinde meydana gelebilecek ani duruşlar sırasında yağ filmi sürekliliğinin korunmasına yönelik bir çözüm önerisi geliştirilmiştir. Referans olarak alınan sistemde 44 L/dk debili bir pompa kullanılmış ve dört ayrı yağlama hattı üzerinden çalışan sistemin, her bir hattı için 25 saniye süreyle yağ akışının sürdürülebilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda toplam 18,3 L yağ hacmi ihtiyacı hesaplanmış ve bu ihtiyacı karşılamak amacıyla nominal gaz hacmi 15 L olan dört adet akümülatör sistem tasarımına entegre edilmiştir.

Yapılan hesaplamalar ve sistem kurgusu doğrultusunda, seçilen akümülatörlerin ani basınç düşüşü senaryolarında yeterli hidrolik destek sağlayarak yağ filmi kalınlığının korunmasında etkili olduğu görülmüştür. Böylece, metal-metal temasına bağlı yüzey aşınması riski önemli ölçüde azaltılmıştır. Buna ek olarak, sisteme entegre edilen basınç, sıcaklık ve akış sensörleri yardımıyla sistemin kritik parametreleri gelecek zamanlı olarak izlenebilmiş, bu da operasyonel güvenliğin ve sistemin izlenebilirliğinin artırılmasına olanak tanımıştır.

Elde edilen bulgular, akümülatör destekli bu çözümün, hidrostatik yağlama sistemlerinin ani duruşlar karşısında performansını artırdığını ve yatak yüzeylerinin korunmasına önemli ölçüde katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Söz konusu yaklaşım, ağır hizmet koşullarında çalışan sistemlerde yağlama sürekliliğinin sağlanması açısından uygulanabilir ve etkili bir strateji olarak değerlendirilebilir.

#### SEMBOL ADLANDIRMALARI

M: Manometre

S: Sensör

$F_f$ : Sürtünme Kuvveti ( N )

$\mu$ : Viskozite ( N·s/m<sup>2</sup> )

A: Yüzey Alanı ( m<sup>2</sup> )

u: Hız ( m/s )

h: Yağ Filmi Kalınlığı ( m )

V: Hacim ( L )

p: Basınç ( P )

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, HİPAŞ Hidrolik ve Pnömatik A.Ş. Tasarım Merkezi bünyesinde yürütülen AGTMPR146457 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] H. Baş, "Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, c. 12, sy 3, ss. 877-887, 2022.
- [2] G. Öncü ve E. Durak, "2-STATİK YÜKLÜ RADYAL KAYMALI YATAKLARDA HİDRODİNAMİK YAĞLAMANIN ANALİZİ", *Mühendis. Bilim. Ve Tasar. Derg.*, c. 9, sy 1, ss. 167-175, 2021.
- [3] Z. Liu, Y. Wang, L. Cai, Y. Zhao, Q. Cheng, ve X. Dong, "A review of hydrostatic bearing system: researches and applications", *Adv. Mech. Eng.*, c. 9, sy 10, s. 1687814017730536, 2017.
- [4] M. Michalec, J. Foltýn, P. Svoboda, I. Krupka, ve M. Hartl, "Performance and stability comparison of hydrostatic bearing pad geometry optimization approaches", *Forsch. Im Ingenieurwesen*, c. 89, sy 1, ss. 1-10, 2025.
- [5] X. Li, X. Wang, M. Li, Y. Ma, ve Y. Huang, "5-The research status and progress of heavy/large hydrostatic thrust bearing", *Adv. Mech. Eng.*, c. 6, s. 982584, 2014.
- [6] M. Gölcü, "6-ENDÜSTRİYEL HİDROLİKTE BİRİKTİRİCİLER VE KULLANIM DEVRELERİ", *Pamukkale Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, c. 8, sy 1, ss. 9-17, 2011.
- [7] S. Turkyılmaz, "7-ENDÜSTRİ 4.0 VE ENDÜSTRİYEL NESNELERİN İNTERNETİ: UYGULAMA, FIRSAT VE ZORLUKLAR-LİTERATÜR TARAMASI", *Doğuş Üniversitesi Derg.*, c. 25, sy 2, ss. 153-172, 2024.
- [8] V. Zhuk, O. Verbovskiy, ve I. Popadiuk, "Experimental regulating parameters of bladder-type hydraulic accumulator", *Int. J. Appl. Mech. Eng.*, c. 27, sy 1, ss. 232-243, 2022.
- [9] E. SOLMAZ, F. C. BABALIK, ve F. ÖZTÜRK, "DAİRESEL HİDROSTATİK EKSENEL KAYMALI YATAKLARDA ÇOKLU KRİTER TABANLI TASARIM OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARİ".
- [10] G. K. Costa ve N. Sepehri, "Hydraulic accumulators in energy efficient circuits", *Front. Mech. Eng.*, c. 9, s. 1163293, 2023.
- [11] B. J. Hamrock, "Fundamentals of fluid lubrication", NASA, 1991.

## ÖZGEÇMİŞ

### Önder ÖZER

2001 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2004 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2005 yılında HİPAŞ Hidrolik ve Pnömatik A.Ş. firmasında çalışmaya başlamış; burada Proje Mühendisi ve Üretim Sorumlusu gibi görevlerde bulunmuştur. Halen aynı firmada Endüstriyel ve Mobil Sistemler Uygulama Müdürü olarak görev yapmaktadır.

### **Emircan DEMİRBAŞ**

2024 yılında Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Mezuniyetinin ardından aynı yıl HiPaş Hidrolik ve Pnömatik A.Ş. firmasında çalışmaya başlamış, Tasarım Merkezinde Tasarım Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

### **Cüneyt ERKUŞ**

1995 yılında Anadolu Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2000 yılında HiPAŞ Hidrolik ve Pnömatik A.Ş.'de Makine Mühendisi olarak çalışma hayatına adım atmıştır. Halen aynı firmada Genel Müdür Yardımcısı olarak görevini sürdürmektedir.

### **Fikret DALKIRAN**

1969 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Türkiye'de hidrolik ve pnömatik alanlarında faaliyet gösteren ilk mühendislerden biridir. İki dönem boyunca İstanbul Sanayi Odası üyesi olarak görev yapmış, ayrıca AKDER Akışkan Gücü Derneği'nin 9. Dönem Yönetim Kurulu Başkanlığı'nı üstlenmiştir. 1992 yılında HIPAS Hidrolik ve Pnömatik A.Ş.'yi kurmuştur. 2017 yılında T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı onayı ile Türkiye'nin 52. Tasarım Merkezi'ni kurmuştur.