



## Pim Disk Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı

### Manufacturing and Design of the Pin-On Disk Wear Test Ring

Ahmet Enes Saraç<sup>1\*</sup>, Ertuğrul Durak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260 Isparta, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 01/01/2024

Kabul / Accepted: 22/01/2024

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

#### Öz

Farklı çalışma şartlarında malzemelerin sürtünme katsayısı, aşınma ve yağlama gibi tribolojik özelliklerinin belirlenmesi için birçok model test sistemleri mevcuttur. Bu makalede Pim-Disk Aşınma Test Düzeneginin (PDATD) ASTM G-99 standartları referans alınarak tasarımı ve üretimi amaçlanmıştır. Test düzeneginde farklı yağlama şartları, yük, hız, farklı yağ sıcaklıkları gibi parametrelerin ayarlanabilmesi imkânına sahip olmasına özen gösterilmiştir. Deney düzeneginde uygulanan yükün test numunesine aynı şiddetle etki etmesi için yükleme kolu ayarlanabilir şekilde tasarlanmıştır. Kol mekanizmasında kolun serbest hareket etmesi için yuvarlanmalı yatak ve uygun boşluklu geçme sınıfları seçilmiştir. Yükleme kolundaki gerilme ve şekil değişimleri için sonlu elemanlarla ve analitik analizler yapılmıştır. Test numuneleri kolayca monte edilebilecek şekilde pabuç ve vida bağlantıları disk üzerinde kullanılmıştır. PDATD’de karşı eleman olarak hem pim hem de küresel elemanlar kullanılma imkânı vardır. Karşı elemandaki sıcaklık değişimi ve yağlı deney şartlarında sıcaklık ölçüm için uygun termokupllar deney setine monte edilmiştir. Ayrıca çalışmada diskin dönmesini sağlayan tahrik motorunun elektrik akım değerleri ölçüm için gerekli elektronik kart bağlantısı da eklenerek sürtünme kuvveti ile ilişkisi incelenmeye çalışılmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

“Pim Disk Aşınma Test Cihazı, sürtünme katsayısı, aşınma, yağlama”

#### Abstract

Many model test systems are used to determine the tribological properties of materials such as friction coefficient, wear and lubrication under different operating conditions. In this paper, the design and manufacturing of the Pin on Disk wear test apparatus (PDATD) is aimed with reference to ASTM G-99 standards. Care has been taken to ensure that parameters such as different lubrication conditions, load, speed, and different oil temperatures can be adjusted in the test setup. The loading arm is designed to be adjustable so that the load applied in the experimental setup affects the test sample with the same load intensity. In the loading arm mechanism, a rolling bearing and appropriate spaced fit classes are selected to allow the arm to move freely. Finite element and analytical method analyzes were carried out for stress and deformation changes in the loading arm. Gripping and screw connections were used on the disk so that the test samples could be easily mounted. It is possible to use both pin and spherical elements as counter surface elements in the PDATD. Thermocouples suitable for temperature change in the opposite element and temperature measurement under oily test conditions were mounted on the test rig. In addition, in the study, the current values of the drive motor that enables the rotation of the disk were added to the electronic card connection required for measurement, and its relationship with the friction force was tried to be studied.

#### Key Words

“Pin on Disk Wear Test Rig, friction coefficient, wear, lubrication”

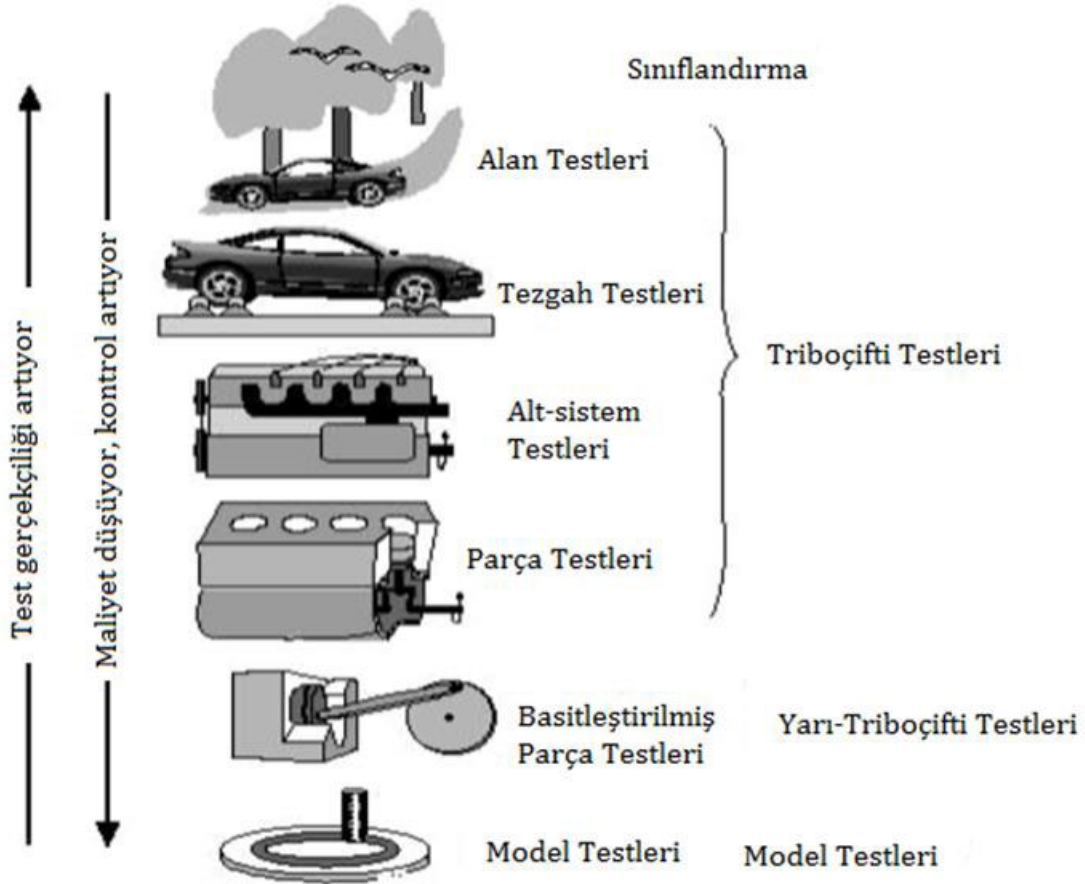
## 1. Giriş

Triboloji teriminin kökeni Yunanca kayma anlamına gelen “tribos” sözcüğünden gelmektedir. Triboloji, birbirleri ile etkileşim halinde olan ve yüzeyleri birbirine göre bağıl harekette bulunan cisimler arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarını inceleyen bilim dalıdır. Triboloji biliminin temel amacı ise birbirlerine temas eden yüzeyler arasındaki sürtünmenin kontrol edilmesi ve yönetilmesi üzerinedir (Soydan & Ulukan, 2013). Kayma işlemi sırasında üretilmiş olan ısı ve artık parçaları çalışma ortamından uzaklaştırmak, kayma yüzeylerindeki sürtünme ve aşınmayı azaltmak için iki katı kayma yüzeyi arasına sıvı, katı veya gaz yağlama maddelerinin ilavesiyle yapılan işleme yağlama adı verilmektedir.

Yağlama prosesleri;

- Cisimlerin temas geometrisi,
- Kayma yüzeylerinin yüzey kalitesi ve tekstür yapısı,
- Temas yükü,
- Basınç,
- Sıcaklık,
- Yuvarlanma ve/veya kayma hızı,
- Çevre şartları,
- Kullanılan yağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri,
- Malzemenin yapısı,
- Yüzeye yakın tabakanın özelliği gibi birçok faktöre bağlı olabilmektedir (Sharma vd., 2008; Sharma vd., 2009; Başoğul, Y., 2014).

Triboloji testleri birçok şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Tribolojik test metodlarının en uygun sınıflandırması gerçekçilik derecesine göre değerlendirmek mümkündür. Genellikle testlerde yüksek derecede bir gerçekçilik amaçlanmaktadır. Maliyet, test zamanı ve test koşullarının kontrolünün hassasiyeti veya bilimsel bir çalışmadan beklenen performansta dikkate alınmalıdır. Birçok değerlendirmede, bir uygulamanın simülasyonu yüksek önceliğe sahip olmamaktadır. DIN 50 322 Alman Endüstriyel Standartları dikkate alınarak tribolojik testleri (tribotest) Şekil 1’deki gibi sınıflandırmak mümkündür (Bhushan, 2001; Başoğul, 2014).



Şekil 1. Tribotestlerin gerçekçilik derecesine göre sınıflandırılması (Bhushan, 2001, Başoğul, 2014)

Doğada çeşitli temas, sürtünme ve aşınma olayları gerçekleşmektedir. Triboloji çalışmaları ise doğadaki sürtünme, aşınma durumlarını standart test sistemleri vasıtasıyla taklit etmektedir. Lineer, döner veya karşılıklı hareket mekanizmasına sahip aşınma test cihazlarında, sürtünme katsayısını etkileyen parametreleri şu şekilde sıralamak mümkündür.

- Numune yüzeyine etki eden normal kuvvet,
- Yağlayıcı cinsi ve miktarı,
- Yüzeylerin kayma hızı,
- Deney yapılan ortamın atmosfer özellikleri,
- Numunelerin yüzey kaliteleri,
- Numunelerin sertlik başta olmak üzere mekanik özellikleri,
- Test cihazındaki sensör ve veri toplayıcıların hassasiyeti,
- Test cihazındaki tasarım ve malzemeden kaynaklı kusurlar

Aşınma test düzeneğinde, deney parametreleri değiştirilerek, yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı, aşınma ve yüzey pürüzlülüğü gibi çıktılar incelenmektedir. Bu verilerin doğruluğunun sağlanmasında test sisteminin rijitliği, alınan verilerin doğruluğunu direkt olarak etkilemektedir. Dişli çarklar, kaymalı ve yuvarlanmalı yataklar gibi makine elemanları arasında birbirleri ile sürekli temas ederek yüzeylerinde zamanla aşınma meydana gelmektedir. Ekipmanların yağlanması, mekanik parçalar arasında sürtünme ve aşınmadan koruyucu önemli bir rol üstlenmektedir (Li vd., 2024).

PDATD'de ucu düz veya yuvarlatılmış bir pim veya küresel bilya ile genellikle düz dairesel bir disk numunesi birbirlerine dik olacak şekilde konumlandırılmaktadır. Merkezden kaçık konumda bir tutucu ile pim tutularak sabitlenir. Test düzeneğinde genellikle disk kendi merkezi etrafında dönerek dairesel bir kayma yolu oluşturmaktadır. Pim numunesi diske dik olarak tutulur ve yük kolu veya kaldıraç mekanizması üzerine deney yükü bağlanarak kayma testleri gerçekleştirilir (ASTM-G99).

Kashani vd., 2010 yılında yaptıkları bir çalışmada polimer malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi için düz halka tipinde çok yönlü bir sürtünme aşınma aparatı tasarlamışlardır. Üretilen tribometre, deney yükünün ve kayma hızının geniş bir aralıkta sürekli olarak değiştirilebileceği şekilde tasarlanmıştır. Deney cihazında çelik bir plaka üzerinde polyamid 6 ve poliasteal malzemelerinin sürtünme aşınma karakteristiği incelenerek çalışma sonucunda sürtünme katsayısı çıktılarının 0.3 mertebesinde olduğu tespit edilerek literatür ile uyumluğu vurgulanmıştır.

Hidalgo vd. (2022) ASTM-G99 standardındaki parametreleri inceleyerek PDATD tasarımları gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, tasarlanan konsept tasarımda teknik gereksinimlerin önceliğini konsept-fonksiyon matrisinde belirleyerek piyasadaki benzer tribometre tasarımları ile karşılaştırmışlardır. Kendi geliştirdikleri PDATD tasarımlarında çeşitli güç aktarım ve deney yükü uygulama metotları geliştirilerek oluşturulan tasarımların mekanik özelliklerini sayısal olarak karşılaştırmışlardır. Üç farklı konsept üzerinde gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarına göre maksimum yer değiştirme miktarı 0,0047 mm ile 0.0087 mm aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Zurowski vd. (2021) PDATD sürtünme aşınma test düzeneğinde yapılan testlerde, kayma yüzeyi üzerindeki aşınmış malzemenin kayma esnasında sürekli olarak bölgeden uzaklaştırılmasını sağlayacak bir tasarım geliştirmişlerdir. Ölçüm başlığında yapılan tasarım değişikliği sayesinde deney sırasında aşınmış numunedeki boyut değişiklikleri telafi edilebilmektedir. Bakır, demir esaslı ve alüminyum malzemeden pim numuneler çalışmada kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yapılan belirsizlik tahmini hesaplamalarında standart PDATD'e göre % 60 ila % 80 daha küçük belirsizlik aralığı sağlandığı gözlemlenmiştir.

Sürtünmenin ölçülmesinde: konum, kuvvet ölçümü ve yer değiştirme sensörleri ile birlikte test sisteminin dinamikleri birbirlerini etkileyen parametrelerdir. Test cihazı ve numuneler tamamen rijit olmadığı için gerçekleşen yer değiştirme ve titreşim miktarları sürtünme sonuçlarını etkileyecektir. Sürtünmenin ölçülmesinde en iyi yapabileceğimiz şey bu parametreleri tanımak ve minimize etmektir (Lampaert vd., 2003).

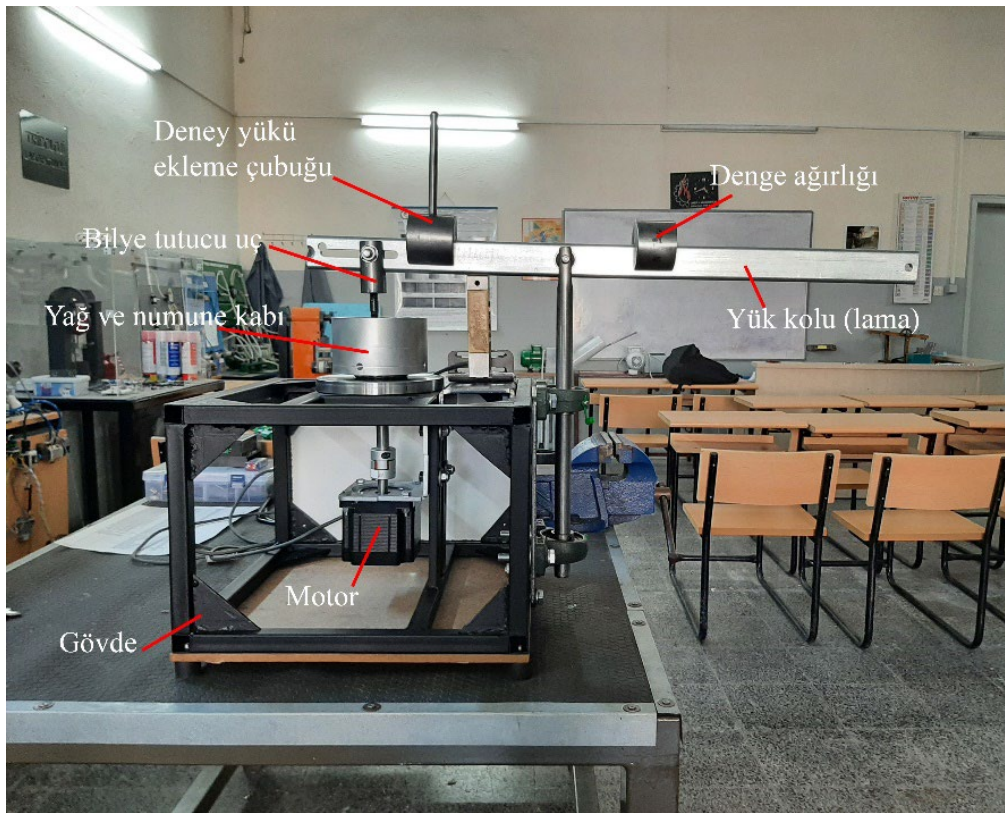
Disk tipi tribometre test aracındaki bu pimin tasarımında Hatamura tasarım metodolojisi kullanılmaktadır. Hatamura'ya göre tasarım metodolojisi, tasarım sürecinin yürütülmesinde formüle edilen adımlardır. Tasarım aşamasının yapılmasındaki adımlar; kullanıcı gereksinimlerinin belirlenmesi, spesifikasyonların yapılması, işlevsel seviyenin, kavramsal seviyenin ve bileşen seviyesinin belirlenmesidir (Rosa Putra Cupu vd., 2022).

Bu çalışmanın amacı; yüksek lisans tezinde kullanılacak bir Pim-Disk Aşınma Test Düzeneğinin (PDATD) ASTM G-99 standartları referans alınarak tasarımı ve üretimi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

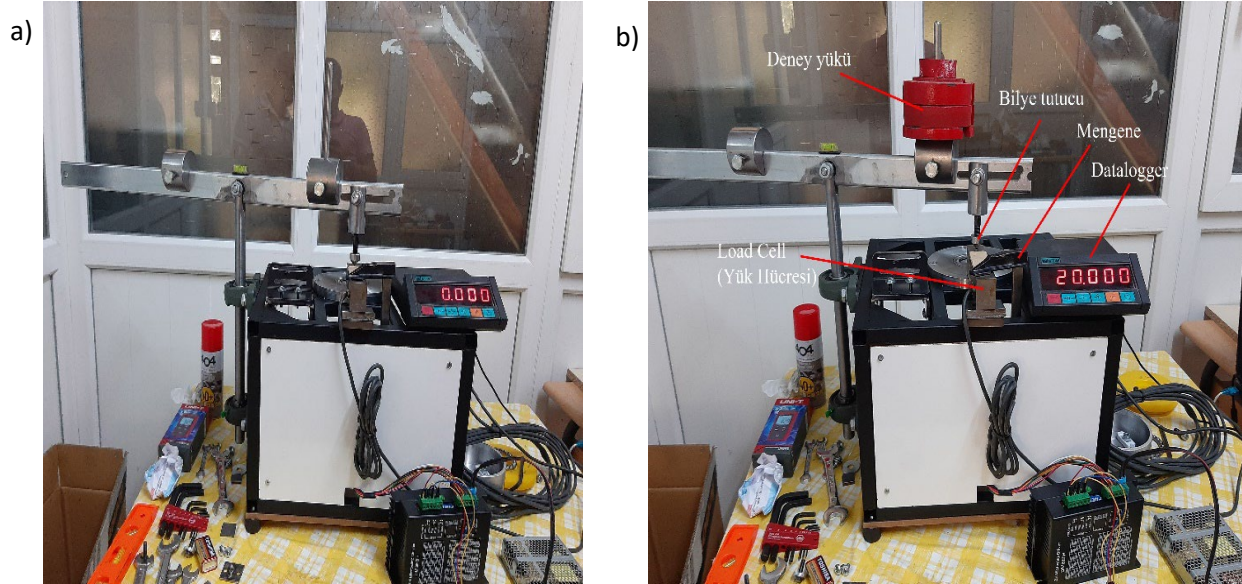
### 2.1 Test sistemi üzerinde tepki kuvvetlerinin ölçülmesi

ASTM G-99 standartlarına göre tasarlanan PDATD Şekil 2.'de gösterilmektedir. Deney düzeneğinde kuru, sıvı veya karışık sıvı yağ filmlili farklı yağlama şartları ile birlikte farklı yük, hız ve yağ sıcaklıkları gibi parametrelerin ayarlanabilmesine sahip olmasına özen gösterilmiştir. Deney düzeneğinde uygulanan yükün test numunesine aynı şiddetle etki etmesi için yükleme kolu ayarlanabilir ve hareketli denge ağırlıklarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Kol mekanizmasında kolun serbest hareket etmesi için bağlantı bölgelerinde teması önleyecek şekilde uygun boşluklu ve yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiştir. Yükleme kolundaki gerilme ve şekil değişimleri için sonlu elemanlarla ve analitik metotlarla analizler yapılmıştır. Farklı boyutlarda test numuneleri kolayca monte edilebilecek şekilde ayarlanabilir pabuçlar vida bağlantıları disk üzerinde tasarlanmıştır. Karşı eleman olarak hem pim hem de küresel eleman geometrisine uygun bağlama aparatı tasarlanmıştır. Yüksek lisans tezinde kullanılacak PDATD cihazında küresel bilye kullanılacağından bu çalışmada küresel bilye karşı yüzey olarak seçilerek gerilme analizleri bu model için yapılmıştır. Karşı elemandaki sıcaklık değişimi ve yağlı deney şartlarında sıcaklık ölçüm için uygun termokupllar deney setine monte edilmiştir. Ayrıca çalışmada diskin dönmesini sağlayan tahrik motorunun akım değerleri ölçüm için gerekli elektronik kart bağlantısı da test düzeneğine eklenmiştir. Frekans değiştirici elektronik kartlarla disk hızı istenilen hıza ayarlanabilmekte ve o anki dakikadaki devir sayısı ekranda görülebilmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan test düzeneği tasarımı

Çalışmada uygulanan yük ile test numunesine temas bölgesindeki yük değeri SSP tipi Esit marka yük hücresi bağlanarak kuvvet ölçümü yapılmıştır(Şekil 3). Sistemde bilye ucuna etki edebilecek istenmeyen yükler, denge yükü kullanılarak nötralize edilmiştir. Sistemde deney yükü uygulanmadan önce bilye üzerindeki yük indikatörde 0 N değeri gözlemlenirken, ağırlık çubuğuna eklenen 27 N yükün bilye ucunda 20 N tepki kuvveti olduğu ölçülmüştür. PDATD birinci yazarın Yüksek lisans çalışması için tasarlanıp üretilmiş olup bu tez çalışmasındaki yağlama şartları için küresel bilye üzerinde 20 N etki edecek şekilde belirlenmiştir. Bu nedenle PDATD cihazında tezde maksimum 27 N yük seçilmesine rağmen makalede 2 ve 3 katı yük durumu için de analizleri de yapılmıştır.



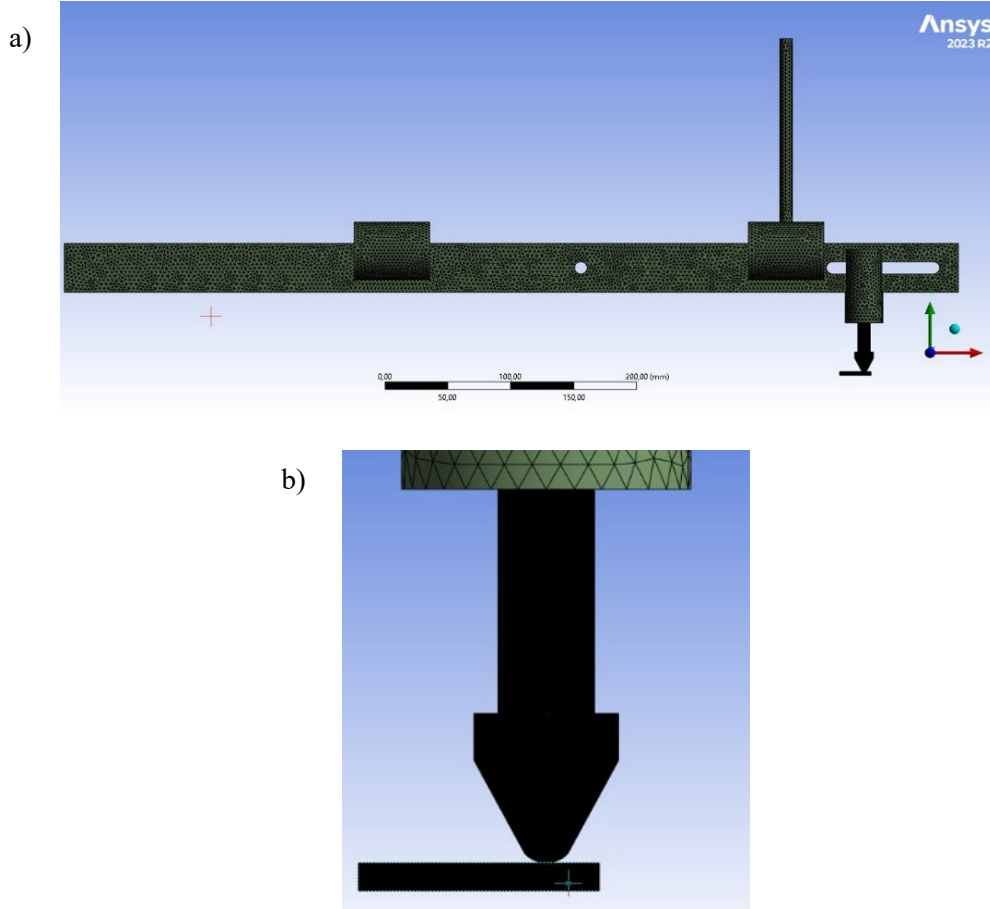
Şekil 3. (a) Test sisteminin dengeye alınması; (b) 27 N deney yükünün bilye ucunda oluşturduğu tepki kuvvetinin ölçülmesi

## 2.2 PDATD'deki Yükleme Kolunun Gerilme Analizi

Tasarımı ve üretimi tamamlanan PDATD sistemindeki parçaların merkezdeki yatak eksenine göre mesafeleri cihaz üzerinden alınarak sistemin yapısal analitik analizi yapılmıştır. PDATD yükleme levhası, denge ağırlığı, test yük çubuğu parçalarının 3 boyutlu modelleri SolidWorks programında çizildikten sonra Step 214 dosya formatında kaydedilmiştir. Parça modeli Ansys Static Structural aracına aktarılmıştır. Gerçek sistemde St-37 çelik levha üzerinden bilye parçası üzerine yük aktarıldığı için yazılım üzerinde “Structural Steel” olarak malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. İlgili malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Yapılan analizlerde sistemdeki parçaların ağırlıkları dikkate alınmıştır. Analiz programında 27 N, 54 N ve 81 N yüklerin bilye ucundaki tepki kuvveti 20 N, 40 N ve 60 N olacak şekilde analizler yapılmıştır. Şekil 4’de görülen bilye ucunda ve kare numune üzerinde “body sizing” mesh yöntemi kullanarak 5 mm’den 0,09 mm’ye kadar 27 farklı mesh parametresi uygulanarak her bir deney yükü için gerilme, gerinim, yer değiştirme ve mesnet tepki kuvvetleri incelenmiştir.

**Tablo 1.** Ansys Static Structural malzeme özellikleri

Yapı Çeliği Mekanik Özellikleri	
Yoğunluk	7850 kg/m <sup>3</sup>
Young Modülü	200 GPa
Akma Dayanımı	250 MPa
Çekme Dayanımı	450 MPa
Poisson Oranı	0,3



**Şekil 4. (a)** Test sistemi yükleme levhası mesh görünümü; **(b)** Bilye tutucusu ve numune mesh görünümü.

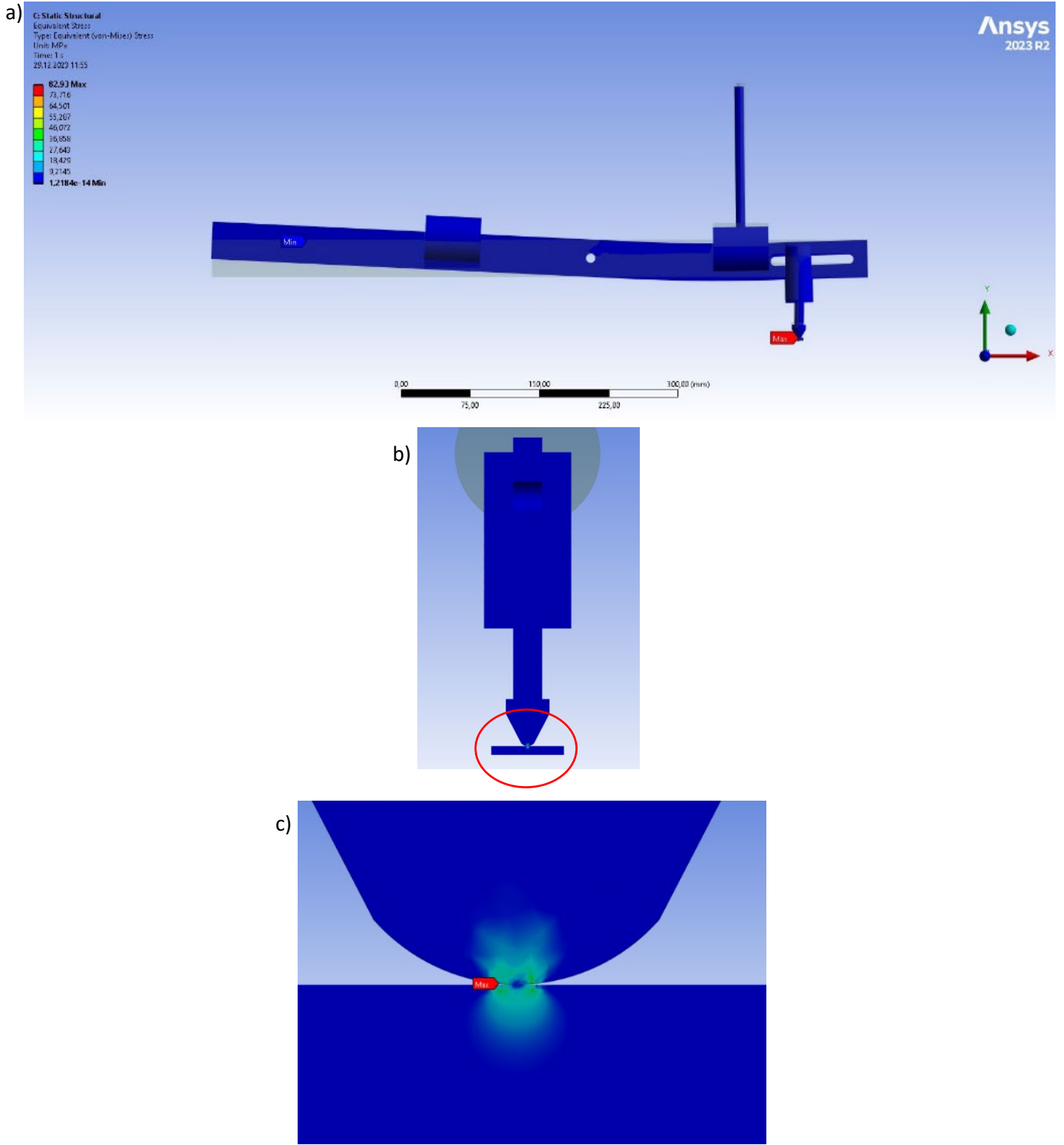
Test sisteminde yükleme levhasına etki eden yük, yük çubuğu üzerindeki düzlemsel yüzey üzerinde bileşenler cinsinden  $-y$  yönünde olacak şekilde uygulanmıştır. Küresel bilye ucundaki kare numune ise arka tarafından sabit mesnet (Fixed Support) olacak şekilde sisteme tanımlanmıştır. Yükleme levhasının bağlandığı uç, deney düzeneğinde bir pim vasıtasıyla rulmandan geçirilerek yataklanmaktadır. Analiz sisteminde ise “Cylindrical Support” komutu kullanılarak yatağın radyal ve aksenal yönde hareketi sabitlenerek teğetsel yöndeki hareketleri serbest bırakılmıştır.

### 3. Tartışma ve Bulgular

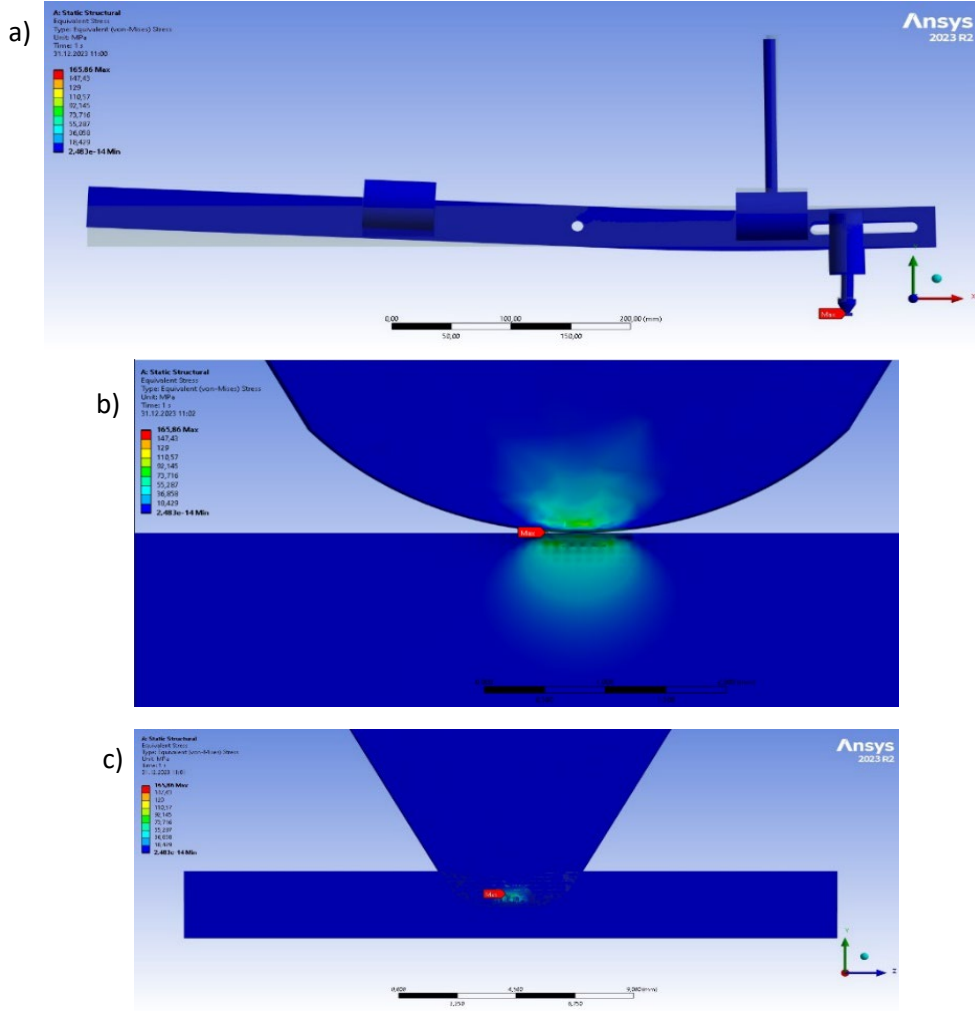
Temas eden çiftler arasındaki ara yüzdeki gerilim alanını hesaplamak için bir Sonlu Eleman programı kullanılır ve daha sonra, elde edilen yükleme çözümlerinin koşulları altında düğümlerdeki aşınmayı tahmin etmek için bir aşınma denklemi uygulanmaktadır (Soni vd., 2023).

PDATD yükleme levhasındaki gerilme ve yer değiştirme miktarları incelenmiştir. PDATD yükün aktarılması ve kollardaki gerilme ve şekil değişimlerinin emniyet sınırları içerisinde olup olmadığını görmek için yapılan analitik mukavemet hesapları ve Ansys Static Structural modülündeki hesaplar karşılaştırılmıştır. (Tablo 2-3)

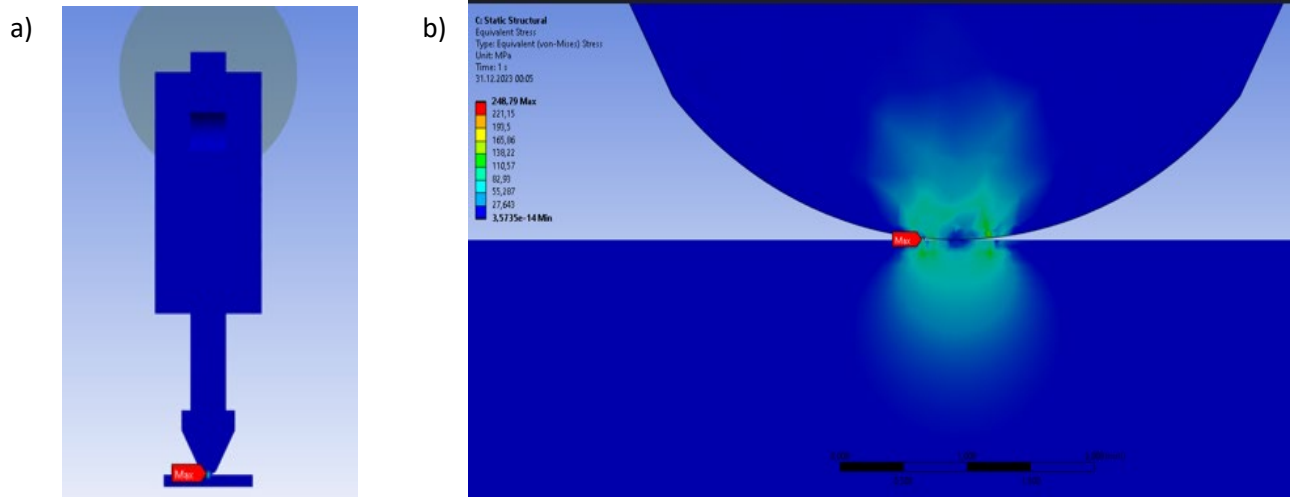
Çalışmada 3 farklı yük için çeşitli mesh boyutları kullanılarak maksimum gerilme analizleri yapılmıştır. Ayrıca analiz sonuçlarındaki yer değiştirme sonuçlarına göre tasarımın rijitlik modülü ( $k = \text{Yük}[\text{N}] / \text{Şekil değişimi} [\text{mm}]$ ) hesaplanmıştır. Rijitlik modülü bir cismin elastik bir deformasyona karşı koyduğu direncin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Yapılan gerilme analizlerine göre, seçilen yüklerdeki yataklarda ve yükleme levhasında oluşan gerilmeler Şekil 5.'te gösterilmektedir. Düşük gerilme sonucunda sistem elastik bölgede kalmaktadır ve oldukça düşük deformasyonlar gözlemlenmektedir. Oluşan gerilmenin büyük bir çoğunluğu bilye ucu ve numune arasında gerçekleşmektedir. İki cismin birbirine göre temas şekli noktasal olduğu için maksimum gerilme noktası bilye ucunda ortaya çıkmaktadır. (Şekil 5-6-7)



Şekil 5. (a) 27 N deney yükü altında sistemde oluşan gerilmeler; (b) Küresel bilye tutucu ve kesit görünümü; (b) Küresel bilye ucunda oluşan gerilme



Şekil 6. (a) 54 N Deney yükü altında sistemde oluşan gerilmeler; (b) Küresel bilye tutucu ve kesit görünümü; (c) Küresel bilye ucunda oluşan gerilme.



Şekil 7. (a) Küresel bilye tutucu ve kesit görünümü; (b) 81 N deney yükü altında sistemde oluşan gerilmeler.

PDATD sistemindeki yükleme levhasındaki gerilme ve yer değiştirme Statik analiz programından 3 farklı deney yükü için program çıktıları Tablo 2.'de ifade edilmiştir.



Tablo 2. Ansys analiz programı sonuçları

Deney Yüğü	Mesh Dügüm Sayısı	Mesh Boyutu (mm)	Maksimum Gerilme (MPa)	Toplam Deformasyon (mm)	Maksimum Gerinim (mm/mm)	Yatak Tepki Kuvveti (N)	Bilye Tepki Kuvveti (N)	Ucu Tepki Kuvveti (N)
27 N	12922261	0.09	82.93048	0.00229	0.00062	7.062	19.9376	
54 N	12922261	0.09	165.86096	0.00457	0.00125	14.124	39.8751	
81 N	12922261	0.09	248.79145	0.00686	0.00187	21.187	59.8128	

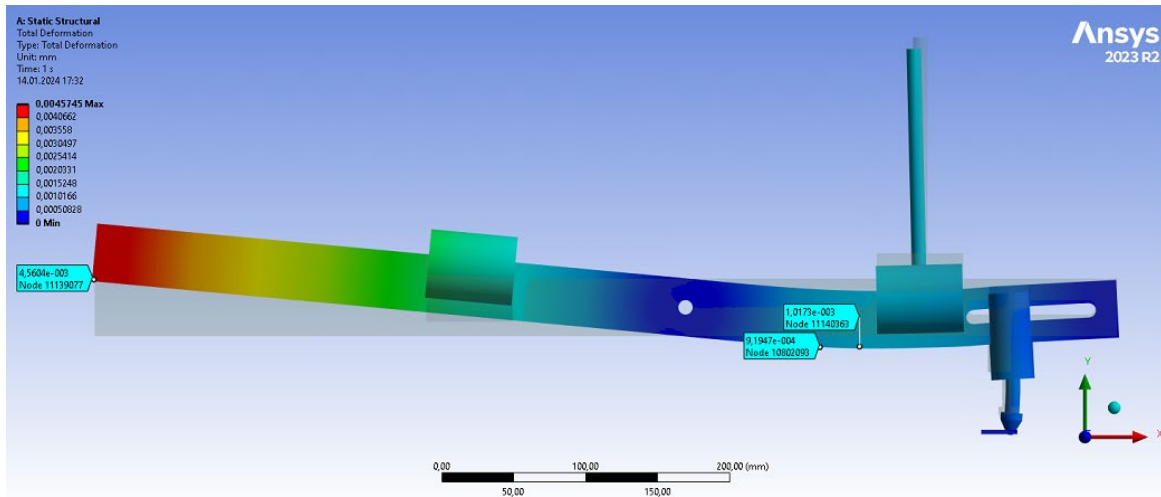
Mesnetin sol tarafındaki sehim miktarı ( $\Delta L$ ), sağ tarafındaki sehimin miktarı ( $Y_{maks}$ ) ve yatak merkezine göre uzaklığı ( $X_m$ ) olup elde edilen sonuçlar Tablo 3.'te verilmektedir. Tablo 3'teki a mesafesi yatak ve deney yüğü eklemeye çubuğu arasındaki uzaklığı, b mesafesi ise küresel bilye ucu ile deney yüğü eklemeye çubuğu arasındaki mesafeyi belirtmektedir. PDATD düzeneğinin elde edilen mukavemet hesapları Tablo 3.'te gösterilmektedir.

Tablo 3. PDATD düzeneğinin sisteminin mukavemet hesaplamaları

Deney Yüğü (N)	$\Delta L$ (mm)	$X_m$ (mm)	$Y_{maks}$ (mm)	Yatak Tepki Kuvveti (N)	Bilye Ucundaki Tepki Kuvveti (N)	P (N)	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	I $((10 \cdot 40^3)/12)$ (mm)	L (mm)
27	0.00172	124.87	-0.00052	6.94	20.06	27	163	62	200000	53333	225
54	0.00343	124.87	-0.00105	14.38	39.62	54	163	62	200000	53333	225
81	0.00515	124.87	-0.00157	21.82	59.18	81	163	62	200000	53333	225

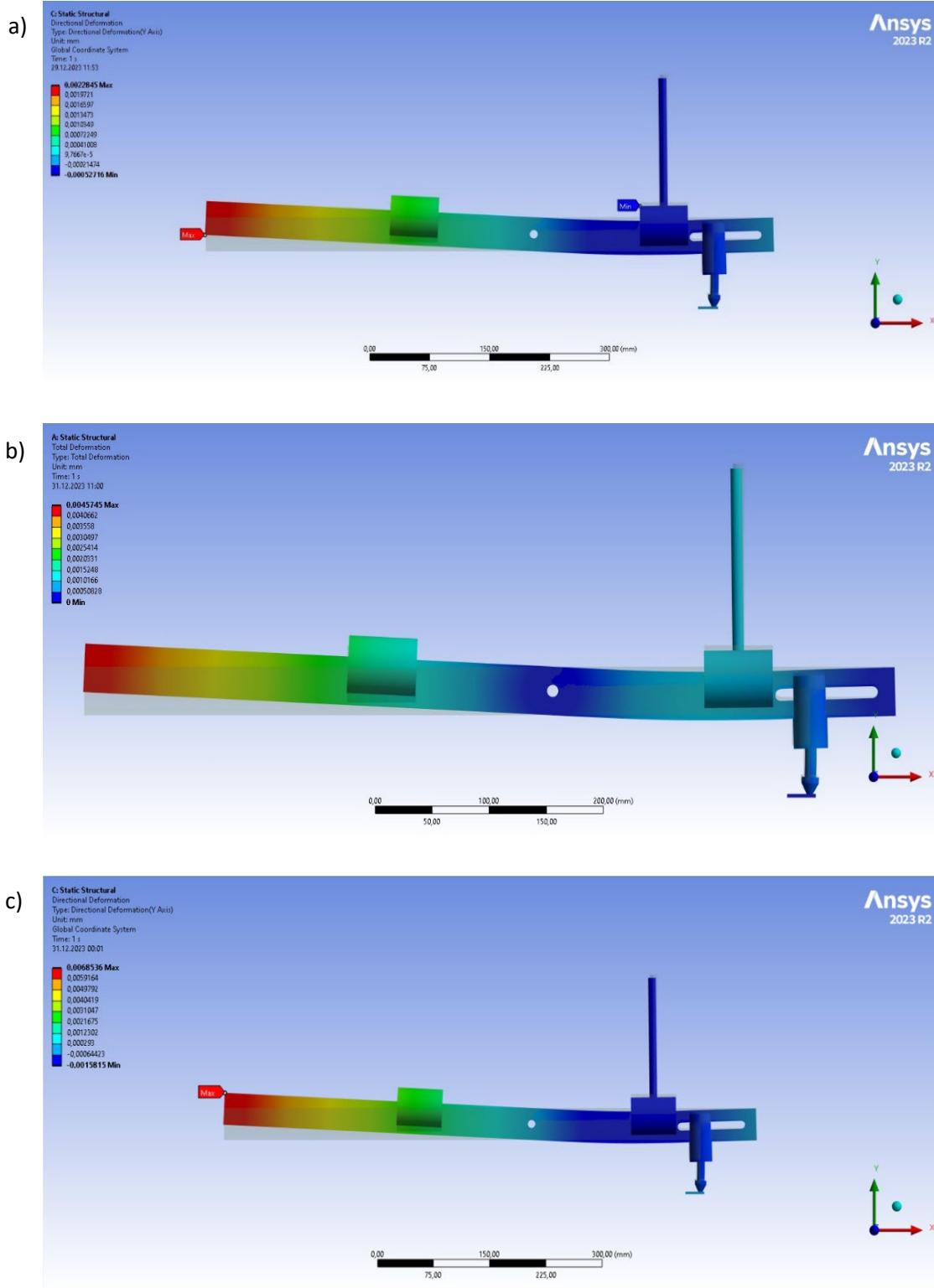
Aşınma test düzeneğinde, PDATD yükleme levhası üzerindeki yatağa y ekseninde etki eden tepki kuvvetleri oldukça düşük kalarak eklenen test yüğü sonucunda oluşacak gerilmelerin büyük bir kısmını bilye ucuna aktarmaktadır. Bu sebeple yükleme levha üzerinde oluşan kesme ve eğilme gerilmeleri elastik bölge içerisinde kalmaktadır.

Analiz sonuçları incelendiğinde yatağın sağ tarafından uygulanan test yükünün, yük kolunu sağ tarafta aşağıya eğerken sol kısmını yukarı yönlü olarak yer değiştirmeye zorladığı görülmüştür. Tablo 3.'te ifade edilen mesnetin sol ve sağ kısmındaki deformasyon miktarı ( $\Delta L$ ,  $Y_{maks}$ ); Ansys Static Structural programı üzerinde "probe" aracı kullanarak kontrol edildiğinde mukavemet hesabı ile elde edilen sonuçların analiz sonuçlarına ölçümlere yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8). Oluşan deformasyon miktarı, sistem ile yapılacak olan aşınma deneylerini etkilemeyecek kadar küçük miktarlarda olduğundan sistemin güvenli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Probe aracı ile deformasyon miktarı ölçümü

Şekil 9'da sistemde uygulanan 3 farklı yük için değişen mesh çözümlerindeki gerilme, gerinim, mesnet tepkileri ve şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Bilgisayar sisteminin izin verdiği limitler dahilinde 0.09 mm'ye kadar mesh değerleri düşürülmüştür. Sonuçlar irdelendiğinde yer değiştirme, mesnet reaksiyon kuvvetleri, gerinim değerleri mesh ile genel olarak büyük değişimler göstermezken; küresel bilye ucundaki noktasal temas alanında mesh değerleri düştükçe maksimum gerilme değerlerinin artışında büyük değişimler gözükmektedir.



Şekil 9. (a) Toplam Deformasyon (27 N); (b) Toplam Deformasyon (54 N); Toplam Deformasyon (81 N)

Statik analiz programında yapılan analiz sonuçlarının çeşitli mesh parametreleri kullanılarak elde edilen sonuçları 3 farklı yük için Tablo 4-5-6'da verilmektedir. Mesh boyutu küçüldükçe bilye ucundaki noktasal temas sebebiyle ortaya çıkan gerilme daha açık bir şekilde gözlemlenmektedir.

Tablo 4. 27 N DeneY YüKü İÇin Mesh Bağımsızlığı Analizi

Mesh Boyutu	Eşdeğer Gerilme Maksimum	Eşdeğer Gerilme Ortalama	Maksimum Toplam Deformasyon	Eşdeğer Elastik Gerinim Maksimum	Toplam Yatak Reaksiyon Kuvveti	Bilye Ucu Reaksiyon Kuvveti
mm	MPa	MPa	mm	mm mm <sup>-1</sup>	N	N
5	2.19195	0.02606	0.00187	0.00002	7.06096	20.15926
4.5	2.25373	0.02613	0.00187	0.00001	7.06134	20.15325
4	2.30075	0.02615	0.00187	0.00002	7.06144	20.15742
3.5	2.17144	0.02629	0.00187	0.00002	7.06196	20.15041
3	2.26008	0.02646	0.00188	0.00002	7.06215	20.15020
2.5	2.23962	0.02697	0.00188	0.00002	7.06230	20.15038
2	2.13968	0.02791	0.00188	0.00002	7.06321	20.14503
1.9	2.25984	0.02837	0.00188	0.00002	7.06414	20.13754
1.8	2.22372	0.02874	0.00188	0.00001	7.06388	20.13957
1.7	1.95922	0.02907	0.00188	0.00001	7.06434	20.13805
1.6	2.01313	0.02954	0.00187	0.00001	7.06280	20.14801
1.5	2.08309	0.03031	0.00189	0.00001	7.06597	20.12522
1.4	2.22055	0.03145	0.00189	0.00002	7.06574	20.12681
1.3	2.51539	0.03217	0.00189	0.00002	7.06652	20.12363
1.2	3.39393	0.03379	0.00191	0.00002	7.06987	20.11008
1.1	3.04029	0.03551	0.00192	0.00003	7.07208	20.10094
1	3.66855	0.03686	0.00191	0.00002	7.06947	20.11750
0.9	3.67843	0.03994	0.00193	0.00004	7.07466	20.08933
0.8	4.56983	0.04401	0.00195	0.00004	7.07717	20.08358
0.7	4.74710	0.04886	0.00196	0.00004	7.07966	20.07897
0.6	6.98836	0.05610	0.00196	0.00005	7.08117	20.07092
0.5	7.00332	0.06528	0.00199	0.00005	7.08538	20.06073
0.4	10.11512	0.07517	0.00200	0.00008	7.08765	20.05481
0.3	13.29249	0.08517	0.00204	0.00010	7.09326	20.04047
0.2	21.72235	0.09162	0.00210	0.00022	7.10298	20.02107
0.1	54.96931	0.08358	0.00225	0.00048	7.12697	19.97346
0.09	82.93048	0.08101	0.00229	0.00062	7.13279	19.96264

Tablo 5. 54 N DeneY YüKü İÇin Mesh Bağımsızlığı Analizi

Mesh Boyutu	Eşdeğer Gerilme Maksimum	Eşdeğer Gerilme Ortalama	Maksimum Toplam Deformasyon	Eşdeğer Elastik Gerinim Maksimum	Toplam Yatak Reaksiyon Kuvveti	Bilye Ucu Reaksiyon Kuvveti
mm	MPa	MPa	mm	mm mm <sup>-1</sup>	N	N
5	4.38389	0.05212	0.00374	0.00004	14.12193	40.31851
4.5	4.50747	0.05226	0.00374	0.00003	14.12268	40.30651
4	4.60149	0.05229	0.00375	0.00003	14.12288	40.31485
3.5	4.34287	0.05259	0.00375	0.00003	14.12392	40.30082
3	4.52016	0.05293	0.00375	0.00003	14.12430	40.30040
2.5	4.47925	0.05394	0.00375	0.00003	14.12459	40.30077
2	4.27937	0.05581	0.00376	0.00003	14.12642	40.29005
1.9	4.51969	0.05675	0.00376	0.00004	14.12827	40.27508
1.8	4.44744	0.05749	0.00376	0.00003	14.12776	40.27914
1.7	3.91844	0.05814	0.00376	0.00003	14.12867	40.27610
1.6	4.02625	0.05909	0.00375	0.00002	14.12559	40.29603
1.5	4.16617	0.06062	0.00378	0.00003	14.13194	40.25043
1.4	4.44110	0.06290	0.00378	0.00004	14.13149	40.25361
1.3	5.03077	0.06434	0.00378	0.00004	14.13305	40.24726

**Tablo 5 (Devam).** 54 N Deney Yüğü İçin Mesh Bağımsızlığı Analizi

1.2	6.78786	0.06757	0.00382	0.00005	14.13975	40.22016
1.1	6.08058	0.07102	0.00384	0.00006	14.14417	40.20187
1	7.33711	0.07373	0.00382	0.00004	14.13893	40.23499
0.9	7.35686	0.07988	0.00386	0.00008	14.14933	40.17866
0.8	9.13966	0.08801	0.00389	0.00009	14.15434	40.16715
0.7	9.49420	0.09772	0.00393	0.00008	14.15932	40.15795
0.6	13.97672	0.11220	0.00393	0.00010	14.16234	40.14184
0.5	14.00664	0.13056	0.00399	0.00010	14.17076	40.12147
0.4	20.23025	0.15034	0.00401	0.00016	14.17531	40.10962
0.3	26.58497	0.17035	0.00407	0.00020	14.18652	40.08094
0.2	43.44469	0.18323	0.00420	0.00045	14.20597	40.04214
0.1	109.93862	0.16715	0.00450	0.00095	14.25394	39.94692
0.09	165.86096	0.16202	0.00457	0.00125	14.26559	39.92529

**Tablo 6.** 81 N Deney Yüğü İçin Mesh Bağımsızlığı Analizi

Mesh Boyutu	Eşdeğer Gerilme Maksimum	Eşdeğer Gerilme Ortalama	Maksimum Toplam Deformasyon	Eşdeğer Elastik Gerinim Maksimum	Toplam Yatak Reaksiyon Kuvveti	Bilye Ucu Reaksiyon Kuvveti
mm	MPa	MPa	mm	mm mm <sup>-1</sup>	N	N
0.09	248.79145	0.24302	0.00686	0.00187	21.39838	59.88793
0.1	164.90793	0.25073	0.00675	0.00143	21.38091	59.92038
0.2	65.16703	0.27485	0.00630	0.00067	21.30895	60.06321
0.3	39.87746	0.25552	0.00611	0.00031	21.27977	60.12141
0.4	30.34537	0.22551	0.00601	0.00024	21.26296	60.16443
0.5	21.00996	0.19584	0.00598	0.00015	21.25615	60.18220
0.6	20.96508	0.16831	0.00589	0.00015	21.24351	60.21276
0.7	14.24130	0.14658	0.00589	0.00012	21.23897	60.23692
0.8	13.70949	0.13202	0.00584	0.00013	21.23150	60.25073
0.9	11.03528	0.11982	0.00579	0.00012	21.22399	60.26799
1	11.00566	0.11059	0.00573	0.00006	21.20840	60.35248
1.1	9.12087	0.10652	0.00576	0.00009	21.21625	60.30281
1.2	10.18179	0.10136	0.00573	0.00007	21.20962	60.33023
1.3	7.54616	0.09651	0.00568	0.00006	21.19957	60.37088
1.4	6.66166	0.09435	0.00566	0.00006	21.19723	60.38042
1.5	6.24926	0.09093	0.00566	0.00004	21.19791	60.37565
1.6	6.03938	0.08863	0.00562	0.00004	21.18839	60.44404
1.7	5.87765	0.08722	0.00565	0.00004	21.19301	60.41415
1.8	6.67116	0.08623	0.00564	0.00004	21.19163	60.41871
1.9	6.77953	0.08512	0.00564	0.00006	21.19241	60.41261
2	6.41905	0.08372	0.00563	0.00005	21.18963	60.43508
2.5	6.71887	0.08091	0.00563	0.00005	21.18689	60.45115
3	6.78024	0.07939	0.00563	0.00005	21.18645	60.45061
3.5	6.51431	0.07888	0.00562	0.00005	21.18588	60.45124
4	6.90224	0.07844	0.00562	0.00005	21.18433	60.47227
4.5	6.76120	0.07840	0.00561	0.00004	21.18403	60.45976
5	6.57584	0.07817	0.00561	0.00006	21.18289	60.47777

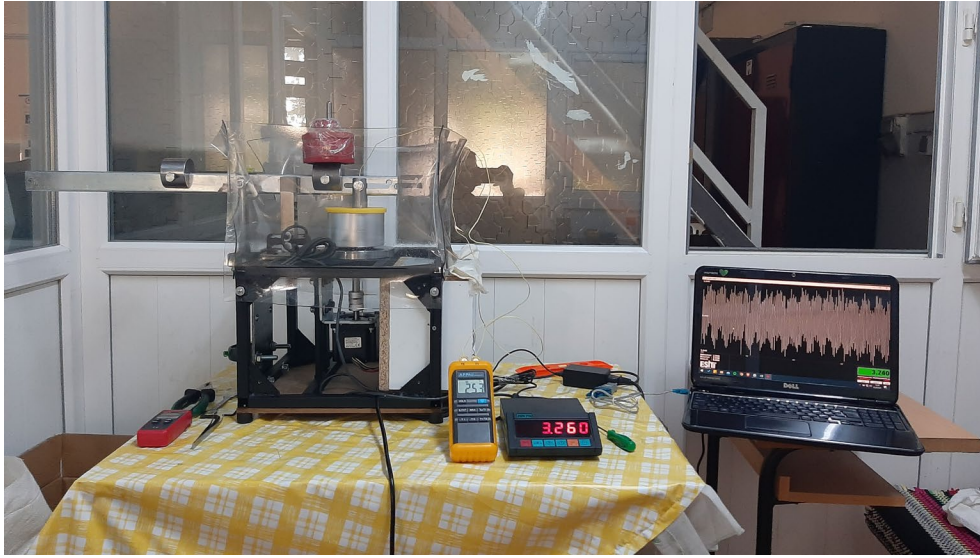
Uygulanan her test yükü için 0,09 mm mesh parametresindeki yer değiştirme parametreleri ele alındığında rijitlik modülü sonuçları Tablo 7’de görülmektedir. Elde edilen rijitlik oranları ve yer değiştirme miktarları ele alındığında, sistemin rijit ve kararlı olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 7. Deformasyon Miktarı Ve Rijitlik Oranı**

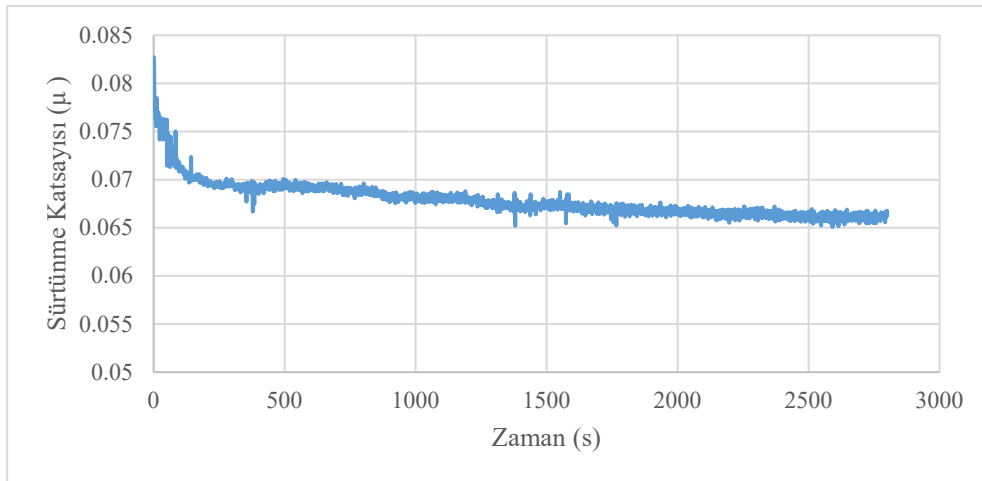
Uygulanan Deneysel Yükü (N)	27	54	81
Maksimum Yer Değiştirme (mm)	0.00229	0.004575	0.00686
Rijitlik Oranı	11790.39	11804.5	11804.5

Sürtünme katsayısı karmaşık bir fiziksel arka plana sahip olduğundan, genellikle deneysel olarak ve çoğunlukla üç ana etkileyici parametrenin bir fonksiyonu olarak karakterize edilmektedir. Bunlar sıcaklık, kayma hızı ve normal kuvvet olarak tanımlanmaktadır (Hoiç vd., 2016).

Yüksek lisans çalışması kapsamında hazırlanan PDATD örnek yağlı ortamdaki görünümü ve anlık veriler Şekil 10’da gösterilmektedir. Test düzeneği motor devri ve deney yükü değiştirilerek sürtünme katsayısındaki değişimi gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır. Test çıktıları olarak: bilye sıcaklığı, sürtünme katsayısı, motorun çektiği akım ölçülmeye çalışılmıştır. PDATD’den alınan örnek sürtünme katsayısı sonuçları Şekil 11’de verilmiştir.

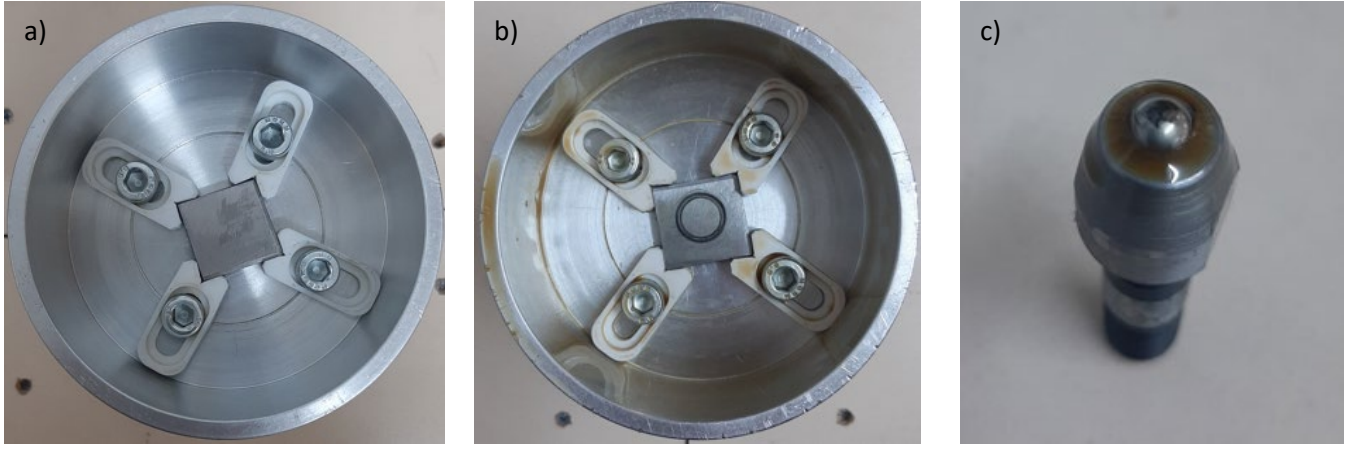


**Şekil 10. PDATD sürtünme katsayısı ölçümü**



**Şekil 11. Örnek kesme sıvısı numunesinin test düzeneğinden alınan sürtünme katsayısı verileri**

Tasarlanıp imalatı gerçekleştirilen PDATD’de 15x15mm ve 25x25mm aralığındaki numunelerin aşınma deneylerini gerçekleştirebilmektedir. Şekil 12’de örnek yapılan testlerde kullanılan test öncesi ve test sonrası numune ve aşındırıcı küresel bilye fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 12. (a) Aşınma öncesi numune; (b) Aşınma sonrası numune; (c) Aşındırıcı küresel bilye

PDATD test sırasında numune ve karşı aşındırıcı yüzeyde oluşacak temas ile birlikte oluşan sürtünme kuvveti ile elektrik motoru elektrik akım değeri arasındaki ilişki incelenmiştir. Sistem çalışırken elektrik motorundaki akım değişimleri incelendiğinde yüklü ve yüksüz durumda çok büyük bir değişim olmadığı, tasarımı ve imalatı yapılan PDATD’de seçilen Step tipi motorun uygun olmadığı, diğer motor tiplerinin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada ASTM-G99 standardına göre tasarlanan PDATD tasarım, imalat, yükleme levhası gerilme gerinim ve yer değiştirme analizleri ve örnek sürtünme test sonuçları verilmiştir.

- Tasarımı ve imalatı yapılan PDATD ile farklı yağlama şartlarında farklı malzeme çiftlerinde, temas geometrilerinde, farklı yüklerde ve hızlarda sürtünme katsayısının test süresince ölçülebildiği ve test verilerin depolandığı görülmüştür.
- PDATD yükleme levhası analiz sonuçları incelendiğinde 27 N deney yükü altında 0.002 mm, 81 N yük altında ise 0.007 mm deformasyon miktarının mesnetin sağ uç kısmında olduğu gözlemlenmiştir.
- Analiz sonuçları incelendiğinde yük kolunun kesitinde 2-5 MPa aralığında gerilme olduğu görülmektedir. Ortaya çıkan gerilme St-37 malzeme için elastik deformasyon bölgesinde yer almaktadır. Analiz edilen elemanlarda emniyet katsayısının yaklaşık 50 kat olduğu hesaplanmıştır.
- Küresel bilye ucunda ortaya çıkan gerilmenin 248.79 MPa mertebesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgede noktasal temas gerçekleştiği için ortaya çıkan gerilme de yüksek çıkmaktadır.
- Mukavemet hesapları ve analiz sonuçları irdelendiğinde tasarlanan sistemin rijit kalarak minimum miktarda deformasyon gerçekleştiği görülmektedir.
- Yüzeyde deney sırasında sürtünme kuvveti ile elektrik motoru elektrik akım arasındaki ilişki incelenmiştir. Sistem çalışırken elektrik motorundaki akım değişimleri incelendiğinde yüklü ve yüksüz durumda çok büyük bir değişim olmadığı, çalışmada seçilen step tipi motorun uygun olmadığı, diğer motor tiplerinin sistemde kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.
- Bundan sonraki çalışmalarda parça boyutları ve tasarımında optimizasyon yapılarak daha hafif ve benzer mukavemet değerlerini sağlayan tasarımlar yapılabilir. Üretimi kolay ve daha hafif malzeme kullanılması sonucunda daha düşük maliyete sahip test cihaz üretimi gerçekleştirilebilir. Ayrıca yeterli hassasiyetli konum algılayıcılarla aşınma izi PDATD eklenerek aşınma özellikleri test boyunca izlenebilir hale getirilebilir.

#### Referanslar

ASTM G99-23 Standards - Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus, <https://www.astm.org/standards/g99>

Başoğul, Y., 2014. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanmış AA6082 Alaşımının Farklı Yağlama Şartlarında Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 213s, Isparta.)

Hidalgo, B.D.A. et al. (2022). Design of Pin on Disk Tribometer Under International Standards. In: Deepak, B.B.V.L., Parhi, D., Biswal, B., Jena, P.C. (eds) Applications of Computational Methods in Manufacturing and Product Design. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0296-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0296-3_6)

Hoić, M., Hrgetić, M., & Deur, J. (2016). Design of a pin-on-disc-type CNC tribometer including an automotive dry clutch application. Mechatronics, 40, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.10.016>

- Kashani, M. R., Behazin, E., & Fakhar, A. (2011). Construction and evaluation of a new tribometer for polymers. *Polymer Testing*, 30(3), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.01.003>
- Lampaert, V., Al-Bender, F. & Swevers, J. Experimental Characterization of Dry Friction at Low Velocities on a Developed Tribometer Setup for Macroscopic Measurements. *Tribology Letters* 16, 95–105 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000009719.53083.9e>
- Li, Z., Guan, Q., Liu, S., Bao, J., Ding, H., & Wang, W. (2024). Friction-reducing and anti-wear performance of sio2-coated tin nanoparticles in gear oil. *Wear*, 538–539, 205219. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205219>
- Niklas Axén, Sture Hogmark, Staffan Jacobson, 2001, “13 Friction and Wear Measurement Techniques”, in *Modern Tribology Handbook*, Ed. Bhushan, B., 13, pp 5,6, 2001CRC Press LLC, Columbus, Ohio.
- Rosa Putra Cupu, D., & Adeka Putra, O. (2022). Design of pin on disc tribometer test equipment using the HATAMURA method. *The Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace -Science and Engineering- (JOMase)*, 66(1), 20–26. <https://doi.org/10.36842/jomase.v66i1.257>
- Sharma B.K., Adhvaryu A., Erhan S.Z., 2009. Friction and Wear Behavior of Thioether Hydroxy Vegetable Oil. *Tribology International*, 42, 353–358.
- Sharma B.K., Doll K.M., Erhan S.Z., 2008. Ester Hydroxy Derivatives of Methyl Oleate: Tribological, Oxidation And Low Temperature Properties. *Bioresource Technology* 99, 7333–7340.
- Soni, A., Kumar Das, P., Kumar, S., Mishra, V., Pagare, A., Kumar, D., & kumar, S. (2023). Tribological characterizations and numerical simulations of thermoplastic composites in pin-on-disc configuration. *Materials Today: Proceedings*, 79, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.231>
- Soydan, Y.; Ulukan, L., (2013). *Temel Triboloji Sürtünme Aşınma Yağlama Bilimi ve Teknolojisi*, Kopisan Yayın Evi
- Žurowski, W., Zepchło, J., Kanaśka, D., & Rucki, M. (2021). Concept and assessment of the novel design of Tribological Tester. *Measurement*, 170, 108724. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108724>