

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# MANYETİK POZİSYON SENSÖRÜNE SAHİP SCARA ROBOTUNUN MODELLENMESİ VE SENSÖRÜN ANALİZİ

MODELING OF SCARA ROBOT WITH MAGNETIC  
POSITION SENSOR AND ANALYSIS OF THE SENSOR

**Yazarlar (Authors):** Selim Beriş<sup>ID\*</sup>, Kubilay Taşdelen<sup>ID</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Beriş S., Taşdelen K., "Manyetik Pozisyon Sensörüne Sahip Scara Robotunun Modellenmesi ve Sensörün Analizi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(3): 353-361, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1308447

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# MANYETİK POZİSYON SENSÖRÜNE SAHİP SCARA ROBOTUNUN MODELLENMESİ VE SENSÖRÜN ANALİZİ

Selim Beriş<sup>a,b</sup>\*, Kubilay Taşdelen<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

<sup>b</sup>FEKA Otomotiv Mamülleri Sanayi ve Ticaret A.Ş., TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [selimberis@gmail.com](mailto:selimberis@gmail.com)

(Geliş/Received: 01.06.23; Düzeltme/Revised: 07.08.23; Kabul/Accepted: 15.08.23)

## ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, manyetik pozisyon sensörlü bir enkoderin oluşturulması ve bunun 3 eksenli bir SCARA robotuna entegre edilmesidir. Geliştirilen pozisyon enkoderi, 12-bit çözünürlüğe sahiptir. Enkoder; motor adım çözünürlüğü, sensör-enkoder mesafesi, sürücü sıcaklığı ve yazılım değişken tipleri gibi farklı sistem parametreleri altında deneysel yollarla analiz edilmiştir. Enkoder, motor mili üzerine yerleştirilen mıknatısları algılayarak konum bilgisini elde etmektedir. Elde edilen veriler, farklı motor hızlarında ve çözünürlüklerde analiz edilerek doğruluğu değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında, step motor performansı üzerinde sürücü sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Ardından, motor mili üzerine yerleştirilen mıknatıs ve sensör arasındaki mesafe değişiminin konum hataları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, yazılım algoritmasının doğruluğu da test edilerek algoritmadan kaynaklanabilecek olası sorunlar incelenmiştir. Yapılan deneyler, manyetik konum sensörlerinin hassas konumlandırma için robotik uygulamalarda potansiyel olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak, elde edilen sonuçlar, bu enkoderlerin dış etkenlerden etkilenebileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, sistem tasarımı aşamasında enkoder parametrelerinin, konumu ve hassasiyeti gibi faktörlerin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** SCARA Robot Kol, Manyetik Enkoder, Step Motor, Pozisyon Kontrolü.

## MODELING OF SCARA ROBOT WITH MAGNETIC POSITION SENSOR AND ANALYSIS OF THE SENSOR

### ABSTRACT

The main aim of this study is to create an encoder equipped with magnetic position sensor and integrate it into a 3-axis SCARA robot. The developed position encoder has a resolution of 12 bits. The encoder has been analyzed experimentally under different system parameters such as motor step resolution, sensor-encoder distance, driver temperature, and software variable types. The encoder obtains position information by detecting magnets placed on the motor shaft. The accuracy of the obtained data is analyzed at different motor speeds and resolutions. Within the scope of this study, the effect of driver temperature on the performance of the stepper motor has been investigated. Subsequently, the position error impact of changes in the distance between the sensor and the magnet placed on the motor shaft has been evaluated. Additionally, the accuracy of the software algorithm has been tested, and possible issues arising from the algorithm have been examined. The conducted experiments have shown that magnetic position sensors have the potential to be used for precise positioning in robotic applications. However, the obtained results have revealed that these encoders can be affected by external factors. Therefore, it has been concluded that encoder parameters, such as position and accuracy, should be taken into consideration during the system design phase.

**Keywords:** SCARA Robot Arm, Magnetic Encoder, Stepper Motor, Position Control.

## 1. GİRİŞ

Çoğunlukla otomotiv, beyaz eşya ve elektronik endüstrilerinde kullanılan robot kollar, beşeri faktörlerden dolayı ortaya çıkabilecek verimsizlik, hat durması ve kalite sorunlarının önüne geçmede önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle ticari anlamda fabrika verimliliğinde artışa sebebiyet vermeleri dolayısı ile endüstriyel kuruluşların vazgeçilmez demirbaşları haline gelmişlerdir [1].

Robot kol kavramı, otonom bir biçimde kontrol edilebilen ve çok eksenli yapılarıyla birden fazla amaç/iş doğrultusunda kullanılabilen elektromekanik cihazlardır.

Bir robot kol eksen yapısıyla sınırlı olmak koşulu ile serbestçe hareket edebilmektedir. Tek başlarına kullanılacakları gibi, büyük bir otomasyon yapısının da bir parçası olabilmektedirler. Günümüzde robot kollar, endüstriyel sahalar ile sınırlı kalmayıp neredeyse hayatın her alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bunlara örnek olarak; yemek endüstrisi, biyoteknoloji ve inşaat gösterilebilir [2-3].

Robot kollar, hali hazırda kullanılan geri bildirim sistemleri içerisinde yer alan disk yapıları oldukça maliyetli bir yapıya sahiptirler [4]. Gerek içlerinde yer alan disk sistemlerinin üretim zorlukları, gerekse işletme sırasında sistem içerisinde dış faktörlerden dolayı meydana gelebilecek bozulmalar sebebiyle alternatif çözümler aranmaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen ve analiz edilen manyetik pozisyon sensörü, geleneksel geri bildirim sistemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir.

Çalışma kapsamında 12-bit çözünürlüğe sahip bir manyetik pozisyon sensörü geliştirilmiştir. Sensör, yine bu çalışma kapsamında geliştirilen 3 eksenli SCARA robot kolu eksenleri üzerine yerleştirilerek, çeşitli ortam ve sensör koşullarında alınan geri bildirimler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Edinilen bilgi setleri anlamlı tablolar haline getirilerek sensörün farklı koşullardaki davranışı analiz edilmiştir.

Manyetik pozisyon sensörleri ile alakalı son yıllarda önemli çalışmalara imza atılmıştır. Bu alanda yapılan bir çalışma kapsamında 6 adet hall sensörüne sahip manyetik enkoder geliştirilmiştir [5].

Bir diğer çalışma kapsamında özgün bir manyetik pozisyon sensörü geliştirilmiştir. Geliştirilen sensör, ortam sıcaklıklarından etkilenmeyen stabil bir çıkış sergilemiştir [6].

Manyetik pozisyon sensörleri, açısız hareket uygulamasının yanı sıra lineer hareket algılama sistemlerinde de kullanılmaktadırlar.

Bu konu ile alakalı yapılan bir çalışmada, bir akıllı aktüatörün manyetik sensör kullanılarak pozisyon tahmini gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan deney düzeneğinde pistonun lineer bir düzlemde yaptığı hareket anlık olarak sonar sensörü ile izlenip ortaya çıkan değerler birbirleriyle karşılaştırılmıştır [7].

Manyetik pozisyon sensörlerinin bir diğer kullanım çeşidi, döner alana yerleştirilen bir mıknatıs serisi ile donatılmış disk ve mıknatısların eksenine merkezlenmiş 1 adet sensörden oluşmaktadır. Mıknatıs diskinin kendi eksenini etrafında dönmesi ile birlikte manyetik alanda değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler sensör tarafından okunarak dijital sinyallere dönüştürülmekte ve pozisyon kontrol yazılımı yardımı ile anlamlı birer veri olarak işlenmektedir [8-9].

Günümüzde manyetik enkoderlerin, diğer geri bildirim sistemlerine nazaran daha yüksek doğrulukta ölçümler yapabildiği görülmektedir [10].

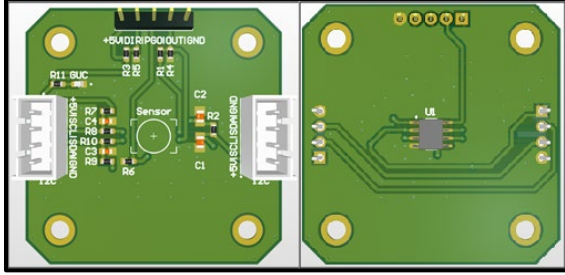
Bu alanda yapılan bir başka deneyde, bir uzay robotu için çeşitli sensörler ile donatılmış eklem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda, motor shaftı üzerine 1 adet manyetik enkoder, eklem üzerine 1 adet dijital potansiyometre ve tork sensörü entegre edilerek tüm bu sensörlerden gelen veriler geliştirilen hata tespit algoritması ile kontrol edilmiştir [11].

Yapılan bir tez çalışması sırasında bir adet redüktör tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarlanan redüktör farklı torklarda yüklere maruz bırakılarak mekanik yapıdaki kaçıklıklar gözlemlenmişlerdir. Eklem eğimlerinin gözlemlenebilmesi adına redüktör yapısına 1 adet manyetik enkoder yerleştirilmiştir. Yerleştirilen manyetik enkoderden alınan bilgiler doğrultusunda, motor yükünün ve motor hızının doğrudan bir ilişkisi olduğu bu

duruma bağlı olarak motor salınımlarında artışlar olabileceği gözlemlenmiştir [12].

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada, 12-Bit pozisyon ölçüm çözünürlüğüne sahip, AS5600 parça kodlu pozisyon sensörüne sahip manyetik geri bildirim sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geri bildirim sistemi baskı devre kartı Şekil 1'de gösterilmektedir.



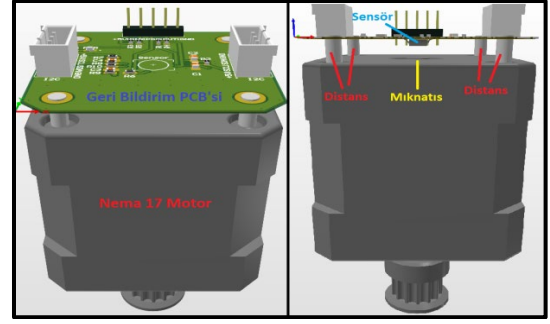
Şekil 1. Geri bildirim sistemi PCB tasarımı görüntüsü.

Sensör, verilerini I<sup>2</sup>C haberleşme protokolü ile ana kontrolcü sistemine aktarmaktadır. Ana kontrolcü merkezinde ATmega328p mikrodenetleyicisi bulunmaktadır. Bu mikrodenetleyici ile bilgisayar arasındaki bağlantı UART haberleşme protokolü üzerinden gerçekleştirilmektedir. Haberleşme akışı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Pozisyon bilgilerinin bilgisayar ortamına aktarılma şeması.

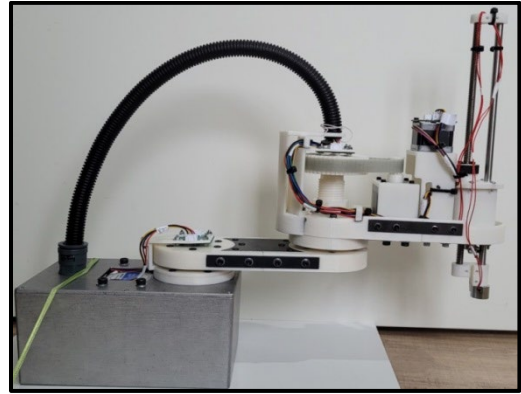
Tasarlanan manyetik geri bildirim sensörü üretilerek, çeşitli parametre değişikliklerine karşı performansı ve tepkisi incelenmiştir. Endüstriyel kullanımına örnek olması adına SCARA robot kolu üzerine monte edilmiştir. Manyetik sensör ile donatılan SCARA robot kolu, yine bu çalışma kapsamında tasarlanmıştır ve üretilmiştir. Step motor üzerine monte edilmiş örnek bir geri bildirim sensörü görüntüsü Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Geri bildirim sistemi ve motor montaj yapısı.

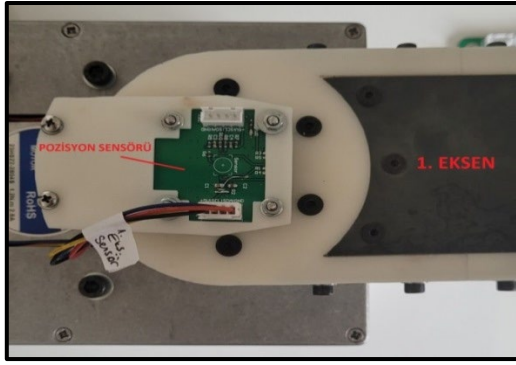
Çalışma kapsamında geliştirilen SCARA robot kolu 3 eksenli oluşmaktadır. Eksenlerden ilk ikisi döner hareket, 3. Eksen lineer hareket sergilemektedir. Geliştirilen robot kol Şekil 4'te gösterilmektedir.

Robot kol ve manyetik sensör çiftlerini uyumlu bir şekilde işletilebilmek adına 1 adet ana kontrolcü geliştirilmiştir.



Şekil 4. SCARA robotu üretim görüntüsü.

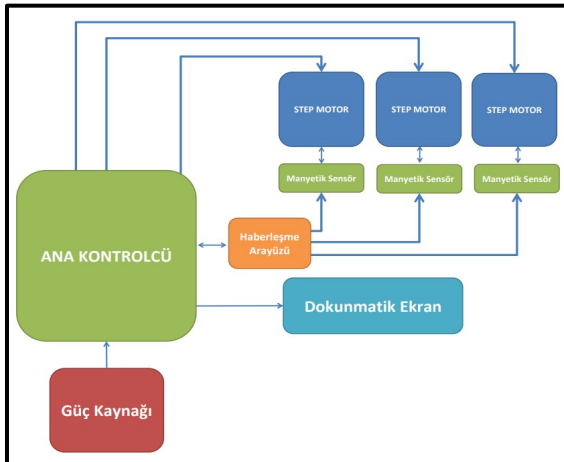
İlk iki ekseninde yer alan motorlar ile eklemlerin dönüş hareketini sağlayan kasnaklar arasındaki dişli oranının 1:5 olması sebebiyle eklem pozisyonu bilgisini sağlayan manyetik enkoderli pozisyon sensörü devreleri Şekil 5'te gösterildiği gibi eklem eksenlerine merkezlenmiştir. Pozisyon sensörleri sabit olmakla birlikte, karşılık mıknatısları döner eklemin merkezine yerleştirilerek geri bildirim akışı sağlanmıştır.



Şekil 5. Pozisyon sensörü eklem yerleşimi.

Çalışmada ele alınan tüm sistemlerin yönetimi, Merkezinde ATmega328p Mikrodenetleyicisi bulunan ana sistem kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilmektedir. Ana kontrolcüye motor sürücü sistemi de entegre edilmiştir. Robot kolun her bir eksenine step motorlar yerleştirilmiş ve bu step motorlara 1'er adet manyetik sensöre sahip geri bildirim devresi monte edilmiştir.

Motorlar da dâhil olmak üzere tüm sistem beslemesi 1 adet güç kaynağı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Sistem diyagramı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Robot kol sistem diyagramı.

Eksenlerde bulunan her 3 motorun da besleme ucu ana kontrolcüye bağlanmaktadır. Dokunmatik ekran ve Motorlara entegre edilmiş manyetik geri bildirim PCB'lerinin besleme ve pozisyon bilgisini aktarmasında kullanılan haberleşme uçları da ana kontrol kartına bağlanmaktadır. Son olarak güç kaynağı ana kontrol kartına bağlanarak sistemin çalışması sağlanmaktadır.

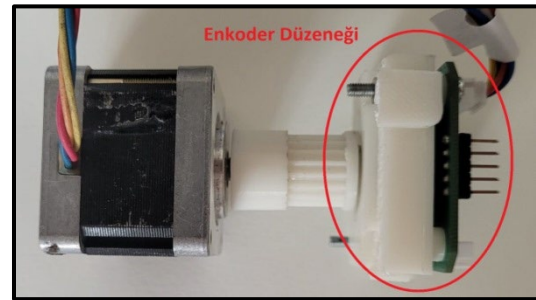
### 3. BULGULAR

Robot eksenlerinde bulunan step motorlar farklı adım/s hızlarında sürülmektedirler. Ana kontrolcüden gönderilen adım verisinin frekans doğruluğu motor çalışma sürelerinin düşürülebilmesi ve doğru motor kontrolünün yapılabilmesi adına önem arz etmektedir. Ayrıca eksen motorlarının sürülmesinde aktif rol oynayan iki ana bileşen olarak A4988 motor sürücüsü ve AS5600 manyetik pozisyon sensörüne sahip enkoderin çeşitli parametrelerde ölçülmesi açısal hatanın analiz edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple çeşitli ölçümler ve deneyler yapılmıştır.

#### 3.1. Motor Sürücü Çözünürlüğünün Pozisyon Doğruluğuna Etkisi

Sensör değerlerinin ölçülmesi için bir step motoru üzerine enkoder düzeneği akuple edilmiştir. Enkoder düzeneği tasarımı gerçekleştirilen manyetik sensör kartı ve mıknatıs çiftini içermektedir.

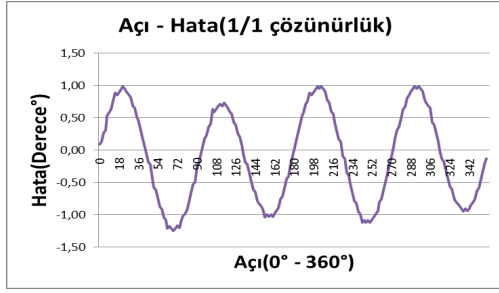
Enkoder ve motor, bir düzlem üzerine sabitlenerek çalışma süresince yapılacak tüm deneylerde sensör ve motor mili açısının değişmemesi sağlanmıştır. Yerleştirilen düzenek Şekil 7'de gösterilmektedir.



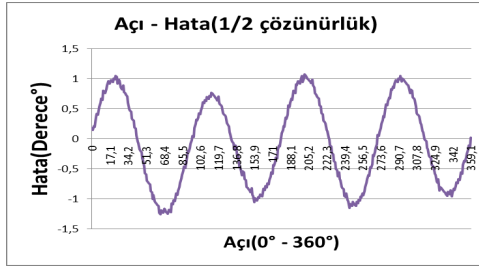
Şekil 7. Enkoder pozisyon ölçüm düzeneği.

Yapılan ölçüm deneylerinde step motoru sürmede kullanılan A4988 motor sürücüsü sırasıyla 1/1, 1/2, 1/4, 1/8 ve 1/16 çözünürlüklerinde sürülerek deney düzeneği yardımı ile step motora 0 dereceden 360 dereceye ulaşana kadar birer adım atırılmıştır. Ölçülen açı değerleri seri haberleşme aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılarak toplamda 6200 örnekleme alınmıştır.

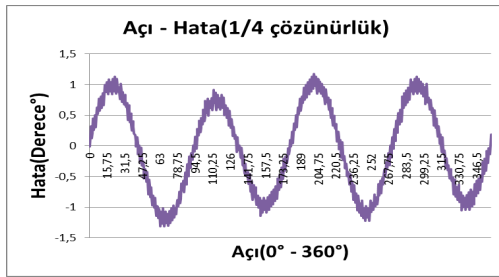
Ölçüm değerleri ile step motorun adım konumundan yola çıkılarak bulunan gerçek açı değerindeki fark grafikler haline getirilmiştir.



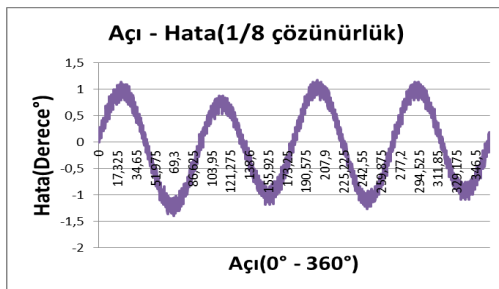
Şekil 8. Pozisyon sensörü 1/1 çözünürlükteki açı hatası değerleri.



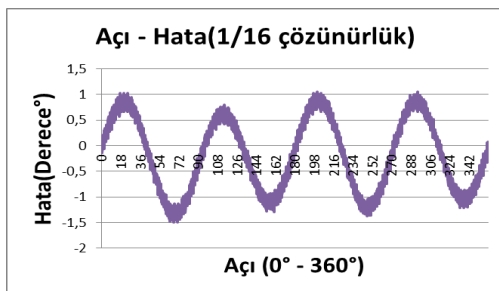
Şekil 9. Pozisyon sensörü 1/2 çözünürlükteki açı hatası değerleri.



Şekil 10. Pozisyon sensörü 1/4 çözünürlükteki açı hatası değerleri.



Şekil 11. Pozisyon sensörü 1/8 çözünürlükteki açı hatası değerleri.



Şekil 12. Pozisyon sensörü 1/16 çözünürlükteki açı hatası değerleri.

Ölçümler sonucunda, A4988 motor sürücüsünün çözünürlük seviyesinin artmasıyla motor açı hassasiyetinde aynı oranda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buna karşı olarak açısal hata oranlarında anlamlı bir değişikliğin bulunmadığı gözlemlenmiştir. Bu da sürücü çözünürlüğünün sensör doğruluğuna etkisi olmadığını göstermektedir.

Step motorun, farklı sürücü çözünürlüklerindeki açısal adım çözünürlüğünün ifadesi Denklem 1'de yer almaktadır. Burada sürücü çözünürlüğü ifadesi, A4988 entegresinde yer alan adım sinyallerinin çözünürlük seviyesini ifade etmektedir.

$$\zeta_{1/1} = \frac{360}{\text{Sürücü Çözünürlüğü}} \quad (1)$$

Denklem (1)'de verilen ifade yerine yazıldığında step motorun tüm çözünürlük değerlerindeki adım sayıları Çizelge 1'deki biçimde ifade edilmektedir.

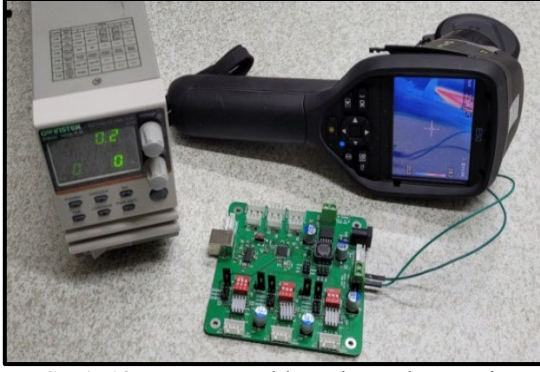
Çizelge 1. Pozisyon sensörü açı ölçüm değerleri.

Adım Çözünürlüğü	Açısal Çözünürlük
200 adım/s (1/1)	1,8°
400 adım/s (1/2)	0,9°
800 adım/s (1/4)	0,45°
1600 adım/s (1/8)	0,225°
3200 adım/s (1/16)	0,1125°

Ölçümler sonucunda A4988 motor sürücüsünün çözünürlük seviyesinin artmasıyla motor açı hassasiyetinde aynı oranda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buna karşı olarak açısal hata oranlarında anlamlı bir değişikliğin oluşmadığı gözlemlenmiştir.

### 3.2. Sürücü Sıcaklığının Pozisyon Doğruluğuna Etkisi

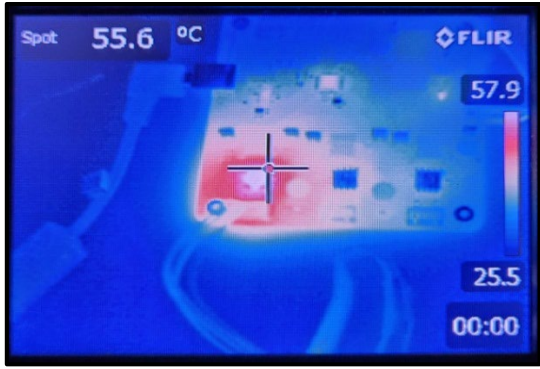
Robot kolda yer alan step sürücülerinin sıcaklıklarını ve buna bağlı olarak motor performansına etkilerini inceleyebilmek adına deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan düzende 1 adet "Flir E50" markalı endüstriyel termal kamera ve 1 adet "GWinstek PSW 160-7.2" markalı güç kaynağı kullanılmıştır ve motor akımı 500mA değerine sabitlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 13. Sürücü sıcaklığı ölçüm düzeneği.

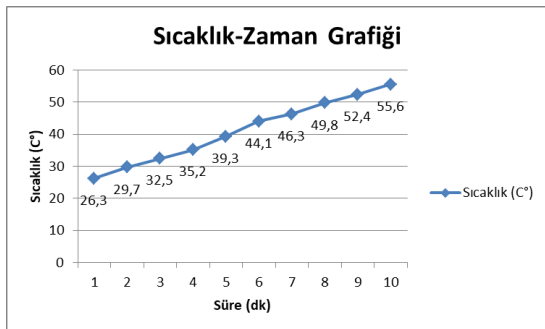
Deney kapsamında ilk eksende yer alan step motor sürücüsü çalıştırılarak sıcaklık değerleri anlık olarak izlenmiştir.

Sıcaklık ölçümü sırasında motor sürücüsü 1/16 çözünürlükte çalıştırılmıştır. Şekil 14'te görüleceği üzere çalışmakta olan eksenin sürücüsü kart üzerinde ısı yayılımına sebebiyet vermektedir.



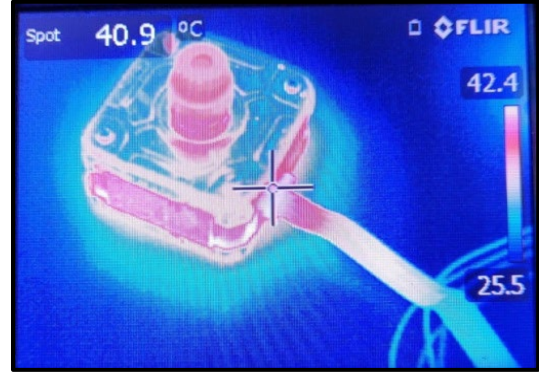
Şekil 14. 1. Eksen step sürücüsü sıcaklık ölçümü.

Ölçümler sonucunda hareket halinde olan 1. Eksen sürücüsünün, sıcaklığının 10 dakikalık bir süre sonrasında 55,6 derece değerine ulaştığı ve bağlı olduğu step motorun ısısının zaman içerisinde yükseldiği gözlemlenmiştir. Zamana bağlı sıcaklık ölçüm grafiği Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15. Sürücü sıcaklığı-zaman grafiği.

Sürülen step motorda elde edilen sıcaklık değerlerinde adım kaçırma ve kararsız çalışma durumu meydana gelmemiştir. Motor ısı ölçümü Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. Step motor sıcaklık ölçümü

Deney sırasında motor oda sıcaklığında iken step motor sürücüsü 1/1 çözünürlüğünde çalıştırılarak motora 100 adım atması komutu gönderilmiştir. Ardından manyetik enkoderden konum bilgisi okunarak kayıt altına alınmıştır. Bu deney 4 farklı sıcaklık değerinde tekrarlanarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen konumlar Çizelge 2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. Motor sıcaklık-konum doğruluğu grafiği.

Sürücü Sıcaklığı	Motor Sıcaklığı	Motor Adım	Başlangıç Açısı	Bitiş Açısı
26,3°C	27,1°C	100	0,09°	180°
35,7°C	32,5°C	100	0,09°	180°
44,2°C	38,6°C	100	0,09°	180°
55,6°C	40,6°C	100	0,09°	180°

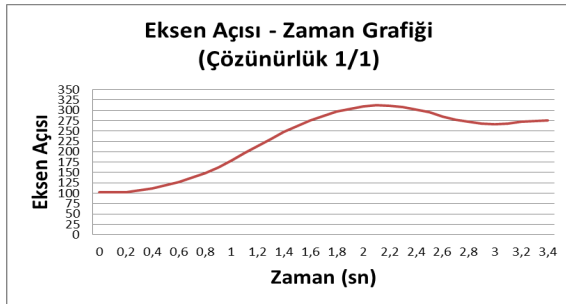
### 3.3. Kontrol Algoritmasının Motor Pozisyonuna Etkisi

Robot kolun hareket kontrolü için geliştirilen ilk algoritmada AS5600 pozisyon sensörü aracılığıyla yapılan açı kontrolü hedef konuma hazırlık aşamasında gerçekleştirilmektedir. Hazırlık aşamasının ardından gerekli olan motor adım sayısı sürücü çözünürlüğü ve kasnak dönüşüm oranı hesap edilerek ortaya çıkarılmaktadır.

Motorun adım hareketini tamamlamasının ardından pozisyon sensöründen açı bilgisi alınarak istenilen pozisyonda sapma olup olmadığı kontrol edilmektedir. Sapma olması durumunda motorun hedef pozisyona gitmesi için gerekli adım bilgisi hesaplanmakta ve bu

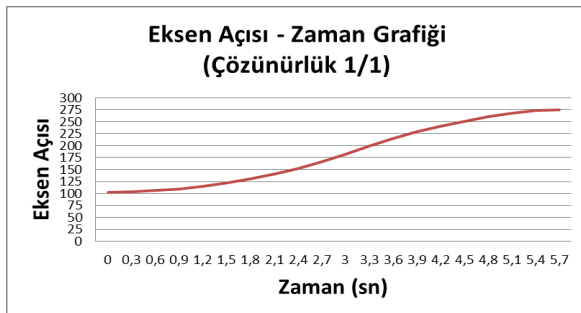
ardışık hareket zinciri hedef pozisyona ulaşılan kadar devam etmektedir.

Bu durumun verimliliğinin test edilmesi için enkoder test düzeneğinin açı hareketi incelenmiştir. Düzeneğin gerçekleştirdiği açı hareketleri 100mS aralıklarla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Şekil 17’de görüleceği üzere başlangıçta 100° konumunda bulunan step motora 275° konumuna gitmesi komutu, seri haberleşme arayüzü aracılığı ile gönderilmiştir. Deney süresince motor sürücü çözünürlüğü 1/1 olarak uygulanmıştır.



Şekil 17. Eksen açısı – zaman grafiği (Algoritma 1)

Deneyin ikinci kısmında ikinci kontrol algoritması devreye alınmıştır. Bu algoritma temelinde anlık olarak enkoderden gelen verilerin işlenmesi ve hedef pozisyon ile motor pozisyonu arasındaki hatanın anlık olarak güncellenmesini barındırmaktadır. İkinci algoritma ile çalıştırılmış motor açı-zaman grafiği Şekil 18’de gösterilmektedir.

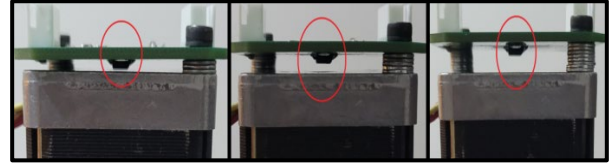


Şekil 18. Eksen açısı – zaman grafiği (Algoritma 2)

### 3.4. Sensör ve Mıknatıs Arası Mesafenin Pozisyon Ölçümüne Etkisi

Manyetik açı sensörünün mıknatıs ile arasında bulunan mesafeye göre ölçüm değerlerindeki değişimi analiz edebilmek adına aynı motor ve sensör çifti arasındaki mesafe artırılarak pozisyon ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında mesafe dışı sapmalar meydana gelmemesi adına motor mili sabitlenmiştir.

Farklı pozisyon sensörü ve mıknatıs mesafeleri Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 19. Pozisyon sensörü farklı uzaklıklardaki yerleşimi

Ölçümler sonucunda elde edilen açı değerleri ve sensör-mıknatıs arası mesafeler Çizelge 3’te gösterilmektedir.

Çizelge 3. Sensör-mıknatıs mesafesi ve ölçülen Açı ilişkisi

Sensör-Mıknatıs Mesafesi	Ölçülen Açı	Gerçek Açı	Hata
0,5 mm	180,13°	180°	0,87°
1 mm	180,64°	180°	0,36°
1,5 mm	179,93°	180°	0,07°
2 mm	179,47°	180°	0,53°
2,5 mm	180,32°	180°	0,32°

### 3.5. Yazılım Hesaplama Hatalarının Pozisyon Çözünürlüğüne Etkisi

Pozisyon sensörünün çözünürlüğü gereği, 360 derecelik bir dönüş değeri 4096 adım çözünürlüğünde ölçümlenebilmektedir.

Bu değer açısal olarak 0,087890625 sayısına karşılık gelmektedir. Hesaplama değerinin pozisyonlama hatalarına etkisini anlayabilmek adına yukarıda belirtilen açısal değer farklı ondalıklı basamaklara yuvarlanmıştır. Çalışma sonucunda 180° açı değeri için ortaya çıkan hata değerleri Çizelge 4’te gösterilmektedir.

Çizelge 4. Ondalık hesaplama hatası ve etkileri

Hesaplama Değeri	Hesaplanan Açı	Hata
0,087	178,263	1,82489
0,0878	179,90221	0,18568
0,08789	180,08661	0,00128
0,087890	180,08661	0,00128
0,0878906	180,08784	0,00005
0,08789062	180,08788	0,00001
0,087890625	180,08789	0,00000

Motor kontrol yazılımı geliştirilirken bu değerler dikkate alınarak sensör açısının hesaplandığı her değişken tanımlanmasında 0,087890625 matematiksel değeri baz



alınmıştır. Böylelikle yazılım kaynaklı oluşabilecek pozisyonlama hatalarından kaçınılmıştır.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Gerçekleştirilen sürücü çözünürlüğü–pozisyon doğruluğu deneyleri sırasında oluşturulan 5 farklı hata grafiği göstermektedir ki, çözünürlük artışı step motor açısal hassasiyetini önemli bir ölçüde arttırsa da, sensör ölçüm doğruluğuna direkt bir etkisi bulunmamaktadır. Tüm ölçüm grafiklerinde aynı zamanda aynı hata salınımlarının periyodik bir biçimde oluşmasının sebebi, enkoder düzeneği ve mıknatıs arasında oluşan yerleşim farkından kaynaklanmaktadır. Hata oranının, ölçümler sonucunda %0,4 değerini aşmadığı gözlemlenmiştir.

Step motor ve sürücüsü sıcaklığı üzerinde yapılan deney sonucunda motor sürücü sıcaklığının normal çalışma koşulunda 55,6°C sıcaklığa ulaştığı ve azami çalışma sıcaklığı olan 150°C sıcaklığının altında kalması sebebiyle sürüş işlemini sorunsuz bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde step motorun 40,9°C sıcaklığa ulaştığı ve azami çalışma değeri olan 80°C'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu sıcaklık değerlerinde motor üzerinde adım kayırma durumunun oluşmadığı gözlemlenmiştir.

AS5600 Pozisyon sensörünün anlık olarak kontrol edildiği çalışma sonucunda robot kolun hedef pozisyona gitmesi sırasında sapmalara uğradığı ve bir hedefe gitmesi sırasında birden fazla hesaplama yapması gerektiği gözlemlenmiştir.

Robot kontrol algoritmasının işleme biçiminin hedef pozisyona gitme doğruluğuna karşı önemi görülmüştür. Bu sorunun nedeni olarak algoritma tasarımının, pozisyon ölçümünü sadece hedef komutun gönderildiği ve adım sayısının tamamlandığı sırada yapması gösterilebilir.

İlk algoritmadaki işleyiş, robot eklem motorlarında meydana gelebilecek olağan dışı çalışmalara anlık olarak cevap vermek yerine adım hareketinin bitmesinin ardından karşılık verebilmektedir. Bunun sonucu olarak robot kol hareketini daha geç ve istenmeyen pozisyonlara uğrayarak tamamlamaktadır.

Bu sorunun önüne geçilebilmesi adına oluşturulan 2. Algoritma işleyişinde manyetik sensör verileri her bir motor adımı sırasında okuyarak hedef konuma olan uzaklığı anlık olarak güncellemektedir. Böylelikle hedef pozisyona giderken oluşan pozisyon hata sapmalarından önlenmeye çalışılmıştır. Ancak bu işleyişte çalışma hızında belirli bir yavaşlamanın meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca yazılımda kullanılan değişken tiplerinin ondalık değerlerinin önemi, yapılan yazılım matematiği deneyi ile kanıtlanmıştır. Deney sonuçları ışığında, manyetik enkoder hatasının en aza düşürülebilmesi için, aç hesaplama değişken değerinin doğru tipte girilmesi gerekmektedir.

Yapılan manyetik sensör ve mıknatıs mesafesi deneyiyle, mekanik gövde parçaları üzerine konumlandırılan mıknatıs ve sensör PCB'lerinin konum doğruluklarının aç doğruluğu üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak sensör-mıknatıs çifti yerleşimindeki kaçıklığın, mıknatıstan gelen manyetik akının sensör tarafından yanlış algılamasına sebebiyet vermesi gösterilebilir.

Sonuç olarak, manyetik pozisyon sensörüne sahip bir SCARA robotunun robotik alanında kullanılabilmesi ve sensör ölçümlerinin doğru bir biçimde işletilebilmesi için donanım, yazılım ve mekanik tasarımlarının bir bütün halinde ele alınması oldukça önem arz etmektedir. Literatürde manyetik pozisyon sensörlerinin robot kollar üzerinde kullanımı ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmalar yalnızca sensörlerin motorlar üzerinde kullanımı üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, sensörlerin eksenler üzerinde de kullanımı ve etkileri üzerine yoğunlaşmıştır ve çeşitli parametrelerde deneysel testler gerçekleştirilerek motor-enkoder ve sürücü kombinasyonunun analizi gerçekleştirilmiştir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında firma imkanlarını kullanmama olanak sağlayan FEKA Otomotiv A.Ş. yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

**KAYNAKLAR**

1. Chang, Y.-H., Liang, C.-H., & Lan, C.-C., “An end-effector wrist module for the kinematically redundant”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 156, Issue 104064, Pages 1-3, 2021.
2. Asada, H., Hosoda, K., & Hanafusa, H. “Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators”, Wiley, New York, 1986.
3. Nakamura, Y., Hanafusa, H., Inoue, H., & Asada, H., “Handbook of Robotics”, Pages 869-891, Springer, Berlin, 2007.
4. Lee, K. M., Choi, J., & Bang, Y. B., Shaft position measurement using dual absolute encoders. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 238, Pages 276-281, 2016.
5. Hao, S., Liu, Y., & Hao, M., “Study on a novel absolute magnetic encoder”, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Pages 1773-1776, IEEE, 2009.
6. Yonnet, J., Foggia, A., & Adenot, S., “A differential magnetic position sensor”, *Sensors and Actuators*, Vol. 81, Issues 1-3, Pages 340-342, 2000.
7. Movahedi, H., Zemouche, A., & Rajamani, R., “Magnetic position estimation using optimal sensor placement and nonlinear observer for smart actuators”, *Control Engineering Practice*, Vol. 112, Issue 104817, 2021.
8. Zubiri Carrizosa, A., “Fabrication and modelling of a robot arm”, Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2020.
9. Yang, B., & Yang, W. Modular approach to kinematic reliability analysis of industrial robots. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 229, Issue 108841, 2023.
10. Ghasemi, M. H., Korayem, A. H., Nekoo, S. R., & Korayem, M. H., “Improvement of position measurement for 6R robot using magnetic encoder AS5045”, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 6, Issue 1, Pages 11-20, 2016.
11. Ni, F., Jin, M., Wang, H., Liu, H., & Hirzinger, G. Joint Fault-Tolerant Design of the Chinese Space Robotic Arm. *IEEE International Conference on Information Acquisition*, August 20-23, Weihai, Pages 528-533, 2006.
12. Tomaszuk, P., Łukowska, A., Rećko, M., & Dzierżek, K., Integrated drive system of robotic arm joint used in a mobile robot. *23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics*, August 27-30, Miedzyzdroje, Pages 509-514, 2018.