

# Radyasyonun MEMS Tabanlı IMU Sensörünün Ölçüm Kararlılığına Etkileri

Mehmet İrfan GEDİK<sup>1\*</sup>, Fatih BAYKAL<sup>2</sup>, Ahmet KARADAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Teknolojisi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

## Article Info

Research article  
Received: 27/05/2025  
Revision: 05/03/2026  
Accepted: 22/04/2026

## Keywords

Gamma Radiation  
MEMS  
UAV  
MPU6050  
IMU  
Co-60

## Makale Bilgisi

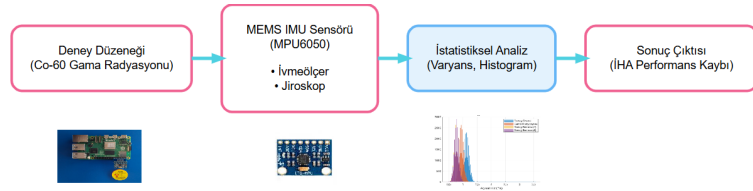
Araştırma makalesi  
Başvuru: 27/05/2025  
Düzeltilme: 05/03/2026  
Kabul: 22/04/2026

## Anahtar Kelimeler

Gama Radyasyonu  
MEMS  
İHA  
MPU6050  
IMU  
Co-60

## Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

İHA'larda kullanılan MEMS IMU (MPU6050) sensörünün gama radyasyonu (Co-60) altındaki kararlılığı incelenmiştir. Radyasyonun ivme ve jiroskop eksenlerinde kalıcı gürültü ve ofset kaymasına yol açtığı saptanmıştır. / The stability of MEMS IMU (MPU6050) sensors in UAVs under gamma radiation (Co-60) was investigated. Radiation induced permanent noise and offset drift across axes.



**Şekil A:** MEMS tabanlı MPU6050 IMU sensörünün gama radyasyonu (Co-60) altındaki ölçüm kararlılığını ve İHA performansına etkisini değerlendiren istatistiksel analiz akışı. / **Figure A:** Statistical analysis flow evaluating the measurement stability of the MEMS-based MPU6050 IMU sensor under gamma radiation (Co-60) and its impact on UAV performance.

## Önemli noktalar (Highlights)

- MPU6050 sensörünün gama radyasyonu (Co-60) altındaki ölçüm kararlılığı eksen bazlı olarak incelenmiştir. / The measurement stability of the MPU6050 sensor under gamma radiation (Co-60) was analyzed on an axis basis.
- Radyasyonun ivmeölçer ve jiroskop eksenlerinde asimetrik ve kalıcı sinyal bozulmalarına yol açtığı tespit edilmiştir. / It was determined that radiation causes asymmetric and permanent signal degradations in the accelerometer and gyroscope axes.
- En yüksek performans kaybı, kalıcı ofset sapması ve gürültü artışıyla ivmeölçer X ekseninde (MPU\_Ax) gözlenmiştir. / The highest performance loss was observed in the accelerometer X-axis (MPU\_Ax) with permanent offset deviation and increased noise.

**Amaç (Aim):** İnsansız hava araçlarında yaygın olarak kullanılan MEMS tabanlı MPU6050 IMU sensörünün gama radyasyonu altındaki ölçüm kararlılığını ve eksen bazlı performans değişimlerini karakterize etmektir. / To characterize the measurement stability and axis-based performance variations of the MEMS-based MPU6050 IMU sensor, widely used in unmanned aerial vehicles, under gamma radiation.

**Özgünlük (Originality):** MEMS IMU sensörlerinin radyasyon maruziyeti sonrası geçici ve kalıcı etkilerini, zaman serisi ve histogram analizi gibi çok boyutlu istatistiksel metriklerle eksen bazlı olarak literatürde ilk kez bu detayda sunmasıdır. / Presenting the transient and permanent effects of radiation exposure on MEMS IMU sensors on an axis basis using multi-dimensional statistical metrics like time series and histogram analysis in such detail for the first time in the literature.

**Bulgular (Results):** Gama radyasyonunun, özellikle MPU\_Ax ekseninde varyansı 0,0015'ten 0,0039 (g)<sup>2</sup>'ye çıkararak gürültüyü artırdığı, MPU\_Gz ekseninde ise kalıcı ofset kaymasına ve sinyal bastırılmasına neden olduğu tespit edilmiştir. / It was determined that gamma radiation increased noise, especially in the MPU\_Ax axis, by raising the variance from 0.0015 to 0.0039 (g)<sup>2</sup>, and caused permanent offset shift and signal suppression in the MPU\_Gz axis.

**Sonuç (Conclusion):** Gama radyasyonuna maruz kalan MEMS sensörlerde fiziksel hasar olmamasına rağmen ciddi sinyal bozulmaları yaşandığı kanıtlanmış olup, radyasyonlu ortamlarda görev yapacak İHA'lar için radyasyon korumalı donanım ve yazılımsal filtreleme stratejilerinin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. / It is proven that MEMS sensors exposed to gamma radiation experience severe signal degradations despite no physical damage, concluding that radiation-shielded hardware and software filtering strategies must be developed for UAVs operating in radioactive environments.



## Radyasyonun MEMS Tabanlı IMU Sensörünün Ölçüm Kararlılığına Etkileri

Mehmet İrfan GEDİK<sup>1\*</sup>, Fatih BAYKAL<sup>2</sup> ve Ahmet KARADAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Teknolojisi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 27/05/2025  
Düzeltilme: 05/03/2026  
Kabul: 22/04/2026

### Anahtar Kelimeler

Gama Radyasyonu  
MEMS  
İHA  
MPU6050  
IMU  
Co-60

### Öz

İnsansız hava araçları (İHA) nükleer santral kazaları sonrası yürütülen arama-kurtarma faaliyetleri, sızıntı tespiti ve uzay görevleri gibi yüksek radyasyon riski taşıyan ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin zorlu çevresel koşulları altında operasyonları Mikro Elektro-Mekanik Sistem (MEMS) tabanlı Ataletsel Ölçüm Birimlerinin (IMU) güvenilirliğine doğrudan bağlıdır. Ancak, MEMS sensörlerin yapısında bulunan elektronik bileşenlerin iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalması, ölçüm kararlılığının bozulmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, operasyonel güvenilirliğin sağlanması için sensörlerin radyasyon altındaki davranışlarının karakterize edilmesi kritik önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, MEMS tabanlı MPU6050 sensörünün gama radyasyonu (Co-60) etkisi altındaki davranışı detaylı biçimde analiz edilmiştir. İnsansız hava araçlarında (İHA) kullanılan IMU sensörlerinin, kontaminasyon bölgesinde uçuş kararlılığını sürdürebilmesi açısından güvenilirliği araştırılmıştır. Raspberry Pi 5 platformu üzerinden 10 Hz örnekleme frekansı ile elde edilen ivme ve jiroskop verileri; radyoaktif ışımaya öncesi ve sonrası ölçümler ile toplanmıştır. Elde edilen veriler zaman serisi, histogram (sayı, olasılık, pdf), duyarlılık (standart sapma) ve gürültü (varyans) metrikleriyle istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, sensör eksenlerinin gama radyasyonuna karşı eksen bazlı farklı tepki verdiğini ortaya koymuştur. Özellikle MPU\_Gz ve MPU\_Az eksenlerinde sinyal genliğinde azalma, ofset sapması ve duyarlılık düşüşü gibi kalıcı bozulmalar gözlemlenmiştir. MPU\_Gy ekseninde geçici bozulmalar öne çıkarken, MPU\_Gx ekseninde dağılım simetrisinde kaymalar ve sinyal bastırılması tespit edilmiştir. En yüksek performans kaybı ise MPU\_Ax ekseninde gözlemlenmiştir; bu eksen hem gürültü artışı, hem ofset sapması hem de duyarlılık zayıflaması eşzamanlı olarak gerçekleşmiştir. Bu bulgular, gama radyasyonuna maruz kalan MEMS tabanlı IMU'ların fiziksel olarak sağlam kalsalar da ölçüm doğruluğu ve kararlılık açısından ciddi performans kayıplarına uğrayabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, özellikle radyasyon ortamlarında görev yapan İHA sistemleri için sensör seçimi ve kalibrasyon yöntemlerinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmakta; radyasyon dayanımı yüksek sistemlerin geliştirilmesine yönelik önemli bilimsel bir temel sunmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, toplam 9,85 R doza maruz bırakılan sensörün MPU\_Ax ekseninde sinyal ortalamasının 0,55 g'den 0,25 g'ye gerilediği ve gürültü seviyesini ifade eden varyansın 0,0015 (g)<sup>2</sup>den 0,0039 (g)<sup>2</sup>'ye yükselerek en belirgin performans kaybının bu eksen üzerinde yaşandığı tespit edilmiştir. Ayrıca MPU\_Gz ekseninde ofset değerinin 1,1 %/s seviyesinden 0,78 %/s bandına inmesi, radyasyonun kalıcı sinyal bastırma etkisini nicel olarak doğrulamaktadır.

## Effects of Radiation on the Measurement Stability of MEMS-Based IMU Sensor

### Article Info

Research article  
Received: 27/05/2025  
Revision: 05/03/2026  
Accepted: 22/04/2026

### Keywords

Gamma Radiation  
MEMS  
UAV  
MPU6050  
IMU  
Co-60

### Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in environments with high radiation risk, such as search and rescue activities after nuclear power plant accidents, leak detection and space missions. The operations of these systems under harsh environmental conditions are directly dependent on the reliability of Micro Electro-Mechanical System (MEMS)-based Inertial Measurement Units (IMUs). However, exposure of electronic components in the structure of MEMS sensors to ionizing radiation can lead to impaired measurement stability. Therefore, it is critical to characterize the behavior of sensors under radiation to ensure operational reliability. In this study, the behavior of the MEMS-based MPU6050 sensor under the impact of gamma radiation (Co-60) is analyzed in detail. The reliability of IMU sensors used in unmanned aerial vehicles (UAVs) has been investigated as regards maintaining flight stability in the contamination zone. Acceleration and gyroscope data obtained with a sampling frequency of 10 Hz on the Raspberry Pi 5 platform were recorded before and after radioactive irradiation. The data were

statistically analyzed using time series, histogram (number, probability, pdf), sensitivity (standard deviation) and noise (variance) metrics. The findings of the analysis revealed that the sensor axes respond differently to gamma radiation on an axis-by-axis basis. In particular, MPU\_Gz and MPU\_Az axes showed permanent distortions such as signal amplitude reduction, offset shift and sensitivity degradation. Transient distortions were determined in the MPU\_Gy axis, while shifts in dispersion symmetry and signal suppression were detected in the MPU\_Gx axis. The highest performance degradation was observed in the MPU\_Ax axis, where both noise enhancement, offset deviation and sensitivity degradation occurred at the same time. These findings show that MEMS-based IMUs exposed to gamma radiation can sustain serious performance losses in terms of measurement accuracy and stability, despite the fact that they remain physically undamaged. The results obtained require a reassessment of sensor selection and calibration methods, specifically for UAV systems operating in radiation environments, and provide a significant scientific basis for the development of systems with high radiation resistance. As a result of the analysis, it was determined that the signal average decreased from 0,55 g to 0,25 g on the MPU\_Ax axis of the sensor exposed to a total dose of 9,85 R, and the variance expressing the noise level increased from 0,0015 (g)<sup>2</sup> to 0,0039 (g)<sup>2</sup>, and the most significant performance loss was experienced on this axis. In addition, the decrease in the offset value from 1,1 ‰ to 0,78 ‰ band on the MPU\_Gz axis quantitatively confirms the permanent signal suppression effect of radiation.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya genelinde son birkaç on yıl içerisinde ciddi nükleer kazalar ve bunların sonucunda radyasyon sızıntıları meydana gelmiştir. Bu durum insan ve çevre sağlığı açısından önemli risklerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Özellikle 1986 yılında Çernobil’de ve 2011 yılında Fukuşima’da meydana gelen nükleer kazalar radyasyon sızıntılarının yıkıcı etkilerinin anlaşılması açısından önemli örneklerdir. Nükleer kazaların ardından radyoaktif kontaminasyon bölgesinin tespit edilmesi acil durum yönetimi açısından kritik bir husustur. Fakat geleneksel ölçüm yöntemleriyle doğrudan müdahale etmek, yüksek radyasyona maruz kalma tehlikesi sebebiyle zorlaşmaktadır.

Bu sebeple artık insansız hava araçları kontaminasyon bölgesindeki radyasyon seviyelerinin ölçülmesinde, haritalanarak değerlendirilmesinde hızlı ve güvenli bir araç olarak kullanılmaktadır. Fukuşima kazasından sonraki yıllarda reaktörlerin içindeki erimiş yakıtın durumunu ve radyasyon seviyelerini belirlemek için insansız hava aracı sistemlerinden geniş çapta yararlanılmıştır [1]. Benzer şekilde kazadan yıllar sonra Çernobil bölgesindeki radyasyon seviyesini haritalayabilmek için gama ışını ölçüm spektrometreleriyle donatılmış İHA’lar kullanılmıştır [2]. Bu çalışmalar, daha önce insan eliyle ulaşılması mümkün olmayan tehlikeli bölgelere erişim sağlayarak radyoaktif kirliliğinin daha doğru ve kapsamlı olarak belirlenebileceğini göstermiştir.

İHA’ların kararlı şekilde uçuş sergileyebilmesi için araç üzerindeki sensörlerin özellikle ataletsel ölçüm birimlerinin (IMU), radyasyon etkileri altında nasıl davrandığının bilinmesi

gerekmektedir. Özellikle MEMS tabanlı IMU’lar İHA sistemlerinin uçuş kontrolünü ve yönelimini belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörlerin radyoaktif ortamda nasıl etkilendikleri kritik bir araştırma konusudur.

Bu konuda yapılmış bazı çalışmalarda iyonlaştırıcı radyasyonun dielektrik malzemeler üzerinde tuzaklanmış yük birikimine sebep olduğu, bu birikim neticesinde elektrostatik prensipler ile çalışan MEMS cihazlarının kalibrasyonunda sapmalara hatta kalıcı bozulmalara yol açtığı tespit edilmiştir [3]. Gama ışınına maruz kalan Alüminyum Nitrat (AIN) rezonatörlü MEMS yapılarında elastik modülünde (Young) gerçekleşen değişimlerin rezonans frekansında kalıcı bir azalmaya sebep olduğu gözlenmiştir [4].

Gerçekleştirilen bazı deneylerde, silisyum (Si) ve silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) tabanlı malzemelerden oluşan MEMS yapıları gama ve nötron ışınlarına maruz bırakılmıştır. Yapısal bütünlüğün korunduğu ve malzemelerin elastik modüllerinde anlamlı bir değişimin gerçekleşmediği gözlenmiştir. Buna karşın performans parametrelerinden olan frekans kararlılığının bozulduğu görülmüştür [5].

Bazzano ve ekibi, küçük uydu görevlerinde kullanılan ticari (COTS) bileşenlerin radyasyon sertliği güvencesi (RHA) stratejilerini araştırmıştır. Çalışmada, STMicroelectronics üretimi 6 eksenli bir MEMS IMU (LSM6DS33), 30 MeV proton ışınları kullanılarak test edilmiştir. Deneyler, 50 krad(Si) toplam doza kadar gerçekleştirilmiş ve cihazın navigasyon doğruluğundaki bozulmalar karakterize edilmiştir. Ayrıca, Tekil Olay Fonksiyonel Kesintileri (SEFI) için tesir kesitleri (cross-sections) belirlenmiştir. Bu çalışma, COTS

bileşenlerin sistem seviyesinde test edilmesi ve operasyonel prosedürlerin tanımlanması açısından önemli bir metodolojik örnek teşkil etmektedir [6].

Sensor AS tarafından yürütülen bu çalışmada, STIM210 ve STIM300 serisi taktik sınıf MEMS IMU'ların Alçak Dünya Yörüngesi (LEO) koşullarındaki dayanıklılığı incelenmiştir. Toplamda 34 sistem üzerinde gerçekleştirilen Toplam İyonlaştırıcı Doz (TID) ve Tekil Olay Etkisi (SEE) testlerinde, cihazların güç verilmiş (powered) durumda 5 krad, güç verilmemiş durumda ise 7 krad seviyelerine kadar işlevsel kaldığı rapor edilmiştir. Çalışma, radyasyonun jiroskop performansına etkisinin sınırlı olduğunu, ancak ivmeölçer ve eğimölçerlerin (inclinometer) bias ve ölçek faktörlerinde belirgin sapmalar meydana geldiğini nicel verilerle ortaya koymuştur [7].

Petersen (2019) çalışmasının temelini oluşturan teknik rapor niteliğindeki bu doküman, proton ve gama ışınlanması altında detaylı hata analizlerini içermektedir. Rapor, bias kaymaları ve SEFI olaylarının geri döndürülebilirliği üzerine derinlemesine analizler sunarak, STIM300 modelinin STIM210'a kıyasla marjinal düzeyde daha yüksek bir toleransa sahip olduğunu göstermektedir [8].

Bu çalışma, nükleer kaza sonrası radyasyonlu alanlarda arama-kurtarma faaliyeti yürüten COTS tabanlı İHA'ların güvenilirliğini Olasılıksal Risk Değerlendirmesi (PRA) yöntemiyle analiz etmiştir. Yazarlar, farklı radyasyon bölgelerindeki (Zone A, B, C) doz oranlarını simüle ederek, navigasyon sistemindeki donanım ve yazılım hatalarının görev kaybına (Loss of Mission) yol açma olasılıklarını modellemiştir. Çalışma, özellikle nükleer sahalarda görev yapacak İHA'ların maruz kalacağı toplam dozun (TID) bileşen bazlı limitlerle karşılaştırılmasını sağlayarak, görev başarısı için kritik olan "minimum sertleştirme" gereksinimlerini tanımlamaktadır [9].

Radyasyonun yanı sıra, IMU performansını etkileyen diğer çevresel faktörlerin başında titreşim gelmektedir. De Pasquale ve Somà, titreşimli ortamlarda çalışan MEMS IMU'ların güvenilirliğini test etmek için sistematik bir prosedür önermiştir. Çalışmada, gerçek çalışma koşullarını simüle eden dinamik uyarımlar altında sensörün sinyal doğruluğu, sistematik ve rastlantısal hataları analiz edilmiştir. Bu çalışma, sensör karakterizasyonunda sistematik hata ayıklama yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır [10].

JAXA tarafından yürütülen bu çalışmada, fırlatma araçlarında kullanılacak navigasyon sınıfı MEMS IMU'ların yüksek titreşim altındaki performansı incelenmiştir. Çalışma, Allan varyans analizi kullanılarak jiroskop ve ivmeölçerlerin gürültü karakteristiklerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Yazarlar ayrıca, fırlatma araçları için radyasyon ortamının da titreşim kadar kritik bir problem olduğunu ve gelecekteki çalışmalarda ele alınması gerektiğini belirtmişlerdir [11].

Bu çalışmalar değerlendirildiğinde radyasyona maruz kalan MEMS cihazlarının fiziksel bütünlükleri bozulmasa da İHA üzerinde ataletsel verilerin ölçümü sırasında performansında düşüş yaşanabileceği görülmektedir. Uçuş kararlılığı açısından IMU'dan gelen veriler İHA'lar için hayati öneme sahip olduğundan IMU sensörlerinin radyoaktif bölgelerde uçuş gerçekleştirmesi sırasında radyasyon dayanıklılığı konusu ön plana çıkmaktadır.

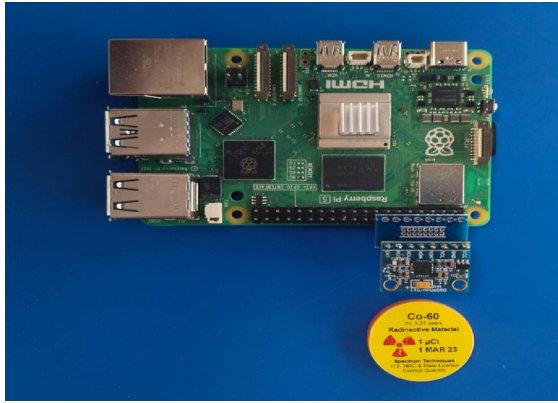
Bu bağlamda MEMS tabanlı IMU'ların radyasyon altındaki davranışlarının incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında yaygın olarak kullanılan MEMS sensörlerinden biri olan MPU6050'nin gama ışınması altındaki performansı değerlendirilmiştir. Kurulan deney düzeneğiyle sensörün elektriksel davranışları analiz edilerek radyasyon öncesi ve sonrasında elde edilen ivmeölçer (accelerometer) ve jiroskop (gyroscope) verileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, MEMS IMU sensörlerinin radyasyon ortamındaki performansına ışık tutmaktadır.

## 2. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Çalışma kapsamında oluşturulan test ortamında Raspberry Pi 5 mikro bilgisayarına I2C iletişim protokolü üzerinden MPU6050 IMU sensörleri bağlanarak veri aktarımı sağlanmıştır. MPU 6050 sensörü, (Ax,Ay,Az) ve jiroskop (Gx,Gy,Gz) verilerini üç eksen (X, Y, Z) eşzamanlı olarak ölçebilmektedir. Veri toplama işlemleri dört adımda gerçekleştirilmiştir. Sensör herhangi bir etkiye maruz bırakılmaksızın ortam koşullarında çalıştırılmış toplanan veriler referans niteliğinde kullanılmıştır. İkinci aşamada sensör aktif bir gama kaynağına maruz bırakılarak ölçüm alınmıştır. Üçüncü ve dördüncü aşamalarda gama kaynağı sensörden uzaklaştırılarak veriler toplanmıştır. Böylece ışınma sonrası kalıcı bir etki olup olmadığını tespit etmek amaçlanmıştır. Tüm aşamalar sonucunda hem radyasyonun anlık etkileri hem de kalıcı bozulmalar ve sapmalar analiz edilebilmiştir. Her aşamadaki ölçümler 600 dakika olarak gerçekleştirilmiş ve radyasyon

kaynağı olarak 0.746  $\mu\text{Ci}$  aktiviteye sahip gama radyasyonu yayan Cobalt-60 izotopu tercih edilmiştir. Kaynak doğrudan MPU6050 sensörünün üzerine konumlandırılmıştır.

Ayrıca verilerin toplanması esnasında sensör Raspberry Pi tarafından saniyede 10 örnekleme (10 Hz) frekansında okunarak zaman damgalı şekilde kayıt edilmiştir. Bu sebeple her aşamada yaklaşık 36000 örnek toplanmıştır. Toplanan veriler ivme ( $\text{m/s}^2$ ) ve açısal hız ( $^\circ/\text{s}$ ) bileşenlerinin zaman serisi analizi, sıklık histogramı (Count), olasılık yoğunluğu histogramı (Probability Density Function PDF), olasılık histogramı (Probability), duyarlılık (Sensitivity), gürültü seviyesi (Noise Level) gibi temel istatistiksel metriklerle değerlendirilmiştir. MPU6050 sensörünün gama radyasyonu ile etkileşiminin incelenmesi amacı ile Şekil-1 'de yer alan deney düzeneği kurulmuştur. Cobalt-60 nokta radyasyon kaynağı sensör üzerine konumlandırılmıştır.



**Şekil 1.** Deney Düzeneği, Cobalt-60 Nokta Radyasyon Kaynağı ve MPU6050 IMU Sensörü (Experimental Setup, Cobalt-60 Point Radiation Source, and MPU6050 IMU Sensor)

Radyoaktif bozunma, bir maddenin zamanla aktivitesinin azalmasını tanımlar ve bu süreç üstel (eksponansiyel) bir yasaya uyar. Belirli bir yarı ömür süresi boyunca, radyoaktif çekirdeklerin sayısı ve buna bağlı olarak ölçülen aktivite sürekli olarak azalır. Deneyde kullanılan nokta radyasyon kaynağının radyoaktif bozunması,

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad (2)$$

matematiksel ifadesi ile 0,746  $\mu\text{Ci}$  olarak hesaplanmıştır.

Deney düzeneğinde kullanılan nokta radyasyon kaynağının aktivite seviyesi, radyoaktif bozunma yasası  $A(t)=A_0 \cdot e^{-\lambda t}$  kullanılarak test anı itibarıyla

0,746  $\mu\text{Ci}$  ( $2.76 \times 10^4 \text{ Bq}$ ) olarak hesaplanmıştır. Test sürecinde IMU sensörünün maruz kaldığı Toplam İyonlaştırıcı Doz (TID) miktarının belirlenmesinde, noktasal kaynaklar için geçerli olan doz hızı eşitliğinden yararlanılmıştır:

$$D = (\Gamma \cdot A) / d^2 \quad (3)$$

Bu eşitlikte;  $\Gamma$ , kullanılan kaynağa özgü gama sabitini (Co-60 için  $\approx 1,32 \text{ R}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{Ci})$ ),  $A$  kaynağın anlık aktivitesini (Ci) ve  $d$  ise kaynak ile sensör yüzeyi arasındaki mesafeyi (m) ifade etmektedir. Deney düzeneğinde kaynak ile sensör arasına 1 mm mesafe bırakılmış ve sistem 600 dakika boyunca kesintisiz ışınlamaya tabi tutulmuştur.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, sensör yüzeyine ulaşan doz hızının yaklaşık 985 mR/saat olduğu tespit edilmiştir. Deney süresi boyunca sensör üzerinde biriken toplam doz miktarı ise 9,85 R (9850 mR) seviyesinde gerçekleşmiştir.

Ayrıca, radyasyonun sensör üzerindeki kalıcı etkilerini değerlendirebilmek adına her veri seti arasındaki değişimler farklı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

IMU'dan elde edilen ham veriler, her bir ölçümün gerçekleştiği zamana göre sıralanarak zaman serisi biçiminde modellenmiştir:

$$x(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (4)$$

Burada  $x(t)$  zamanla değişen ölçüm değerlerini;  $x_i$  'nci örneği ;  $n$  toplam örnek sayısını ifade eder [12]. Bu yapı sayesinde radyasyon etkisiyle oluşabilecek ani sapmalar, uzun vadeli sürüklenmeler ve kalıcı bozulmalar zamansal bağlamda incelenmiştir.

Sensör verilerinin ortalama değerden ne kadar sapma gösterdiği, aşağıdaki standart sapma formülüyle hesaplanmıştır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Burada  $\sigma$ , standart sapmayı;  $x_i$ , her bir ölçüm değerini;  $\bar{x}$ , ölçümlerin aritmetik ortalamasını;  $n$ , örnek sayısını gösterir. Bu metrik, sensörün duyarlılığını ve kararlılığını gösterir.

Standart sapmanın karesi olan varyans, ölçümlerin toplam dağınıklığını ve sistem içindeki rastgele gürültü seviyesini tanımlar [13]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

Burada tüm değişkenler bir önceki denklemlerle aynıdır. Yüksek gürültü seviyesi, özellikle IMU'nun sabit durduğu anlarda dahi ölçümlerde tutarsızlık oluştuğunu gösterir.

Veri setindeki ölçüm değerlerinin belirli aralıklarda kaç kez tekrarlandığı histogram sayımıyla (count) elde edilmiştir:

$$H_k = |\{x_i \mid x_i \in [b_k, b_{k+1})\}| \quad (7)$$

Burada  $H_k$  histogramın  $k$ 'nci binindeki (aralıktaki) örnek sayısını;  $b_k$  bin'in alt sınırını;  $x_i$  örnek veriyi ifade eder. Bu analiz, verilerin yoğunlaştığı ve seyrekleştiği değer aralıklarını belirlemek için kullanılmıştır.

Her bin'in içerdiği örnek sayısı, toplam örnek sayısına bölünerek normalize edilip olasılık dağılımı (histogram olasılık) elde edilmiştir [14]:

$$P_k = \frac{H_k}{n} \quad (8)$$

Burada  $P_k$  histogramın  $k$ 'nci binindeki olasılığını;  $H_k$  o bin'e düşen örnek sayısını;  $n$  toplam örnek sayısını gösterir. Bu dağılım, radyasyon öncesi ve sonrası veri yapısındaki değişimleri karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Verilerin sürekli bir dağılım modeli ile temsil edilmesi amacıyla, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) hesaplanmıştır [15]:

$$f(x) = \frac{H_k}{n \cdot w} \quad (9)$$

Burada  $f(x)$  yoğunluğu;  $H_k$   $k$ 'nci binindeki örnek sayısını;  $n$  toplam örnek sayısını;  $w$  bin genişliğini ifade eder. PDF, radyasyonun dağılım şekline (örneğin çarpıklık veya basıklık) olan etkilerini daha hassas bir şekilde ortaya koymayı sağlar.

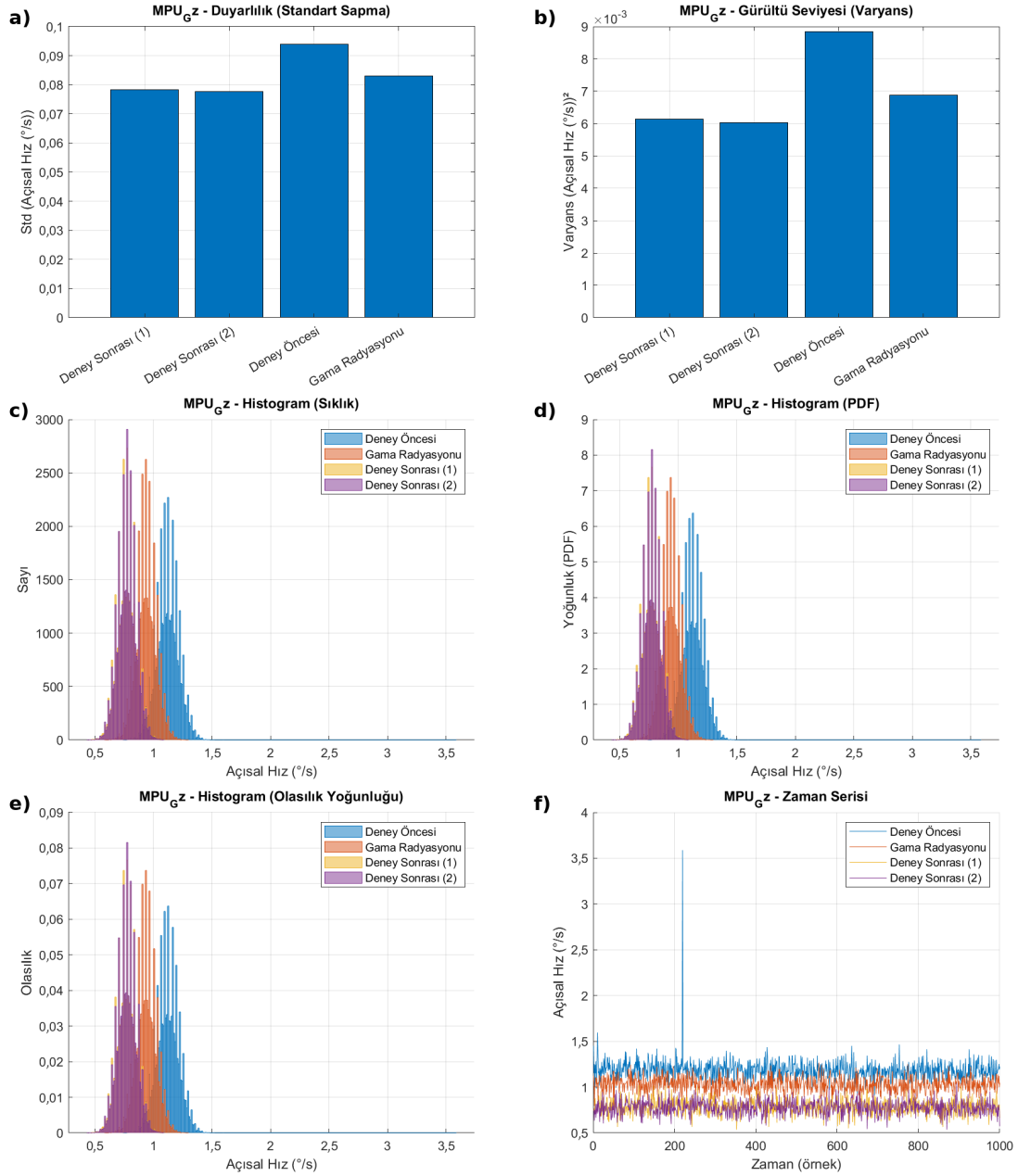
### 3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, gama radyasyonunun MEMS tabanlı bir atalet ölçüm birimi olan MPU6050 sensörünün performans parametreleri üzerindeki etkileri sistematik biçimde incelenmiştir. Deneysel kurgu kapsamında sensör, yatay düzlemde sabitlenmiş ve 0,746  $\mu$ Ci Co-60 gama kaynağına maruz bırakılmıştır. Ölçümler; radyasyon öncesi,

radyasyon etkisi altındaki 600 dakikalık süre boyunca ve iki farklı zaman diliminde (gama radyasyonu sonrası ve bir gün aralıkla) gerçekleştirilmiş, her biri ayrı CSV dosyaları ile kayıt altına alınmıştır. Bulgular; ivme ( $A_x, A_y, A_z$ ) ve açısal hız ( $G_x, G_y, G_z$ ) eksenlerinin tamamında, radyasyonun sensör duyarlılığı, gürültü seviyesi ve çıkış dağılımı üzerinde hem geçici hem de kalıcı etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Özellikle histogram analizleri, zaman serisi incelemeleri ve varyans ölçümleri, radyasyonun belirli eksenlerde ofset kaymaları, dağılım genişlemesi ve duyarlılıkta azalma ya da artış gibi performans sapmalarına yol açtığını açıkça göstermektedir. Bu doğrultuda yapılan analizler, MPU6050'nin gama radyasyonu karşısındaki davranışına ilişkin nicel bir karakterizasyon sunarken, aynı zamanda bu tür ortamlarda çalışan MEMS sensör sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir referans sağlamaktadır.

MPU\_Gz eksenini için elde edilen grafikler, gama radyasyonu etkisinin jiroskop sinyal stabilitesi üzerindeki uzun vadeli bozulmalarını açık biçimde göstermektedir (Şekil-2). Gürültü seviyesi (varyans) analiz edildiğinde, deney öncesi yaklaşık 0,009 ( $^{\circ}$ /s)<sup>2</sup> seviyesinde olan varyansın, "Gama Radyasyonu" döneminde 0,007'ye, "Deney Sonrası (1)" ve "Deney Sonrası (2)" evrelerinde ise sırasıyla 0,0065 ve 0,0063 seviyelerine gerilediği görülmektedir. Bu azalma, sistemde anlık salınımların bastırıldığını ve ölçüm çıktısının durağan hale geldiğini göstermektedir. Zaman serisi grafiğinde de bu durum net biçimde gözlemlenmekte; radyasyon öncesinde 1,1  $^{\circ}$ /s civarında sabit kalan sinyal, radyasyon sonrası periyotlarda 0,75–0,78  $^{\circ}$ /s bandına oturarak çıkış genliğinde kalıcı bir zayıflamaya işaret etmektedir.

Standart sapma (duyarlılık) grafiği incelendiğinde, çevresel değişimlere verilen tepkinin radyasyonla birlikte azaldığı dikkat çekmektedir (Şekil-1). Başlangıçta 0,095 seviyesinde olan standart sapma, sırasıyla 0,087, 0,081 ve 0,079 değerlerine düşmüştür. Histogram grafiklerinde ise deney sonrası dağılımın daraldığı ve merkezi eğrinin dikleştiği görülmektedir. Bu durum, sensörün çevresel değişkenliği filtrelemeye başladığını, dolayısıyla fiziksel uyarılara olan yanıt kabiliyetinin azaldığını göstermektedir. Özellikle PDF (yoğunluk) grafiğinde, önceki döneme göre düşük genlikli ve sivrileşmiş bir dağılım yapısı ortaya çıkmıştır. Bu veriler, MPU\_Gz ekseninde



**Şekil 2.** MPU\_Gz eksenine a) Duyarlılık (standart sapma) b) Gürültü seviyesi (varyans) c) Histogram (sıklık dağılımı) d) Histogram (olay yoğunluğu - PDF) e) Histogram (olasılık yoğunluğu) f) Zaman serisi grafiği (MPU\_Gz axis: a) Sensitivity (standard deviation) b) Noise level (variance) c) Histogram (frequency distribution) d) Histogram (event density - PDF) e) Histogram (probability density) f) Time series graph)

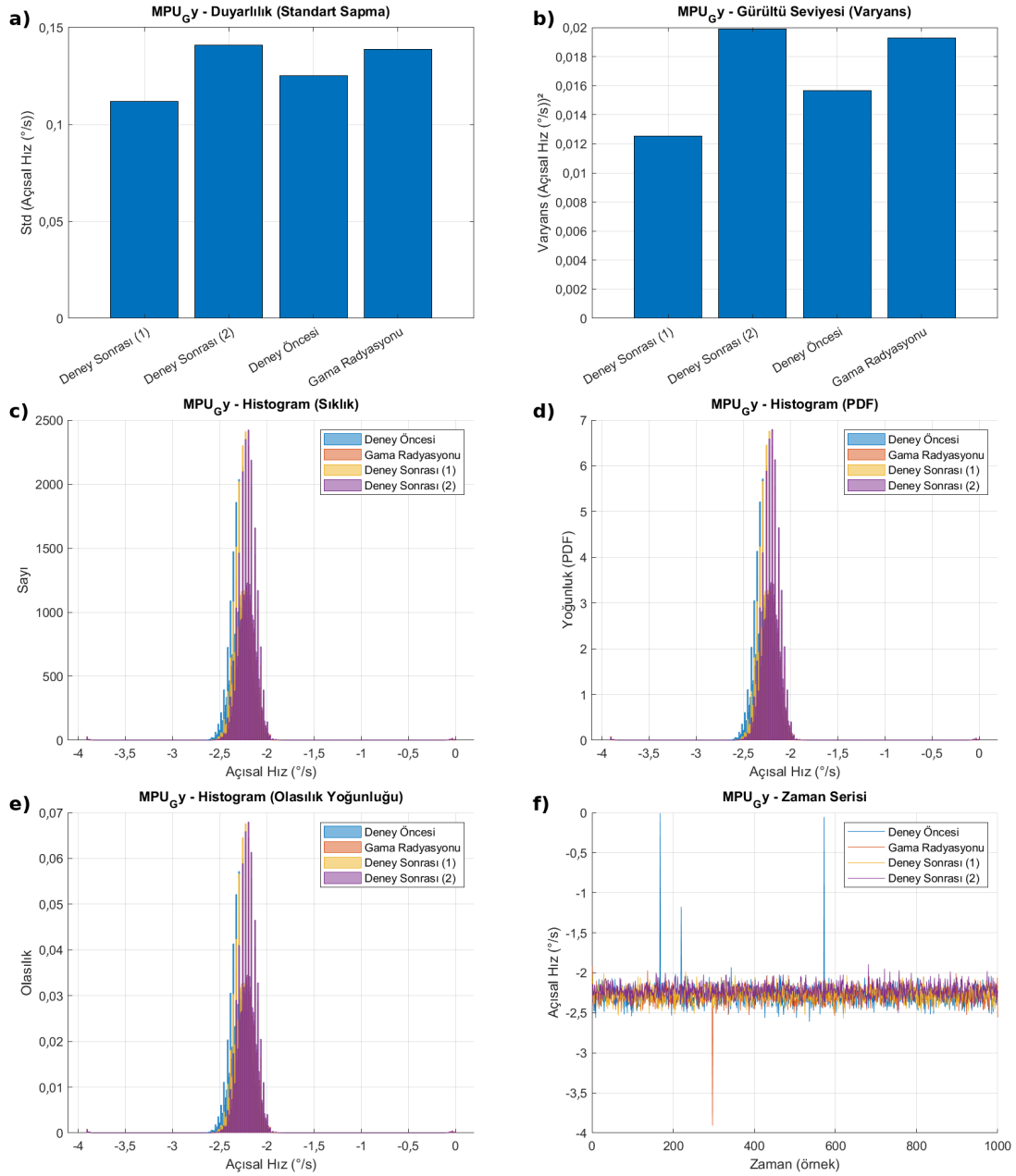
kalıcı ofset kayması, hassasiyet kaybı ve sinyal genliğinin bastırılması şeklinde özetlenebilecek, yapısal ve geri dönüşsüz bir bozulmaya işaret etmektedir. Standart sapma (duyarlılık) grafiği incelendiğinde, çevresel değişimlere verilen tepkinin radyasyonla birlikte azaldığı dikkat çekmektedir (Şekil-1). Başlangıçta 0,095 seviyesinde olan standart sapma, sırasıyla 0,087, 0,081 ve 0,079 değerlerine düşmüştür. Histogram grafiklerinde ise deney sonrası dağılımın daraldığı ve merkezi eğrinin dikleştiği görülmektedir. Bu durum, sensörün çevresel değişkenliği

filtrelemeye başladığını, dolayısıyla fiziksel uyarılara olan yanıt kabiliyetinin azaldığını göstermektedir. Özellikle PDF (yoğunluk) grafiğinde, önceki döneme göre düşük genlikli ve sivrileşmiş bir dağılım yapısı ortaya çıkmıştır. Bu veriler, MPU\_Gz ekseninde kalıcı ofset kayması, hassasiyet kaybı ve sinyal genliğinin bastırılması şeklinde özetlenebilecek, yapısal ve geri dönüşsüz bir bozulmaya işaret etmektedir.

MPU\_Gy eksenine için elde edilen bulgular, gama radyasyonu etkisinin sistem üzerinde daha çok

geçici ve dağılım karakteristiğinde bozulma şeklinde ortaya çıktığını göstermektedir (Şekil-3). Varyans analizine göre, deney öncesi dönemde

0,015 ( $^{\circ}/s$ )<sup>2</sup> civarında seyreden gürültü seviyesi, “Gama Radyasyonu” süresince artarak 0,019’a ulaşmış, ardından “Deney Sonrası (1)” ve



**Şekil 3.** MPU\_Gy eksenine a) Duyarlılık (standart sapma) b) Gürültü seviyesi (varyans) c) Histogram (sıklık dağılımı) d) Histogram (olay yoğunluğu - PDF) e) Histogram (olasılık yoğunluğu) f) Zaman serisi grafiği (MPU\_Gy axis: a) Sensitivity (standard deviation) b) Noise level (variance) c) Histogram (frequency distribution) d) Histogram (event density - PDF) e) Histogram (probability density) f) Time series graph)

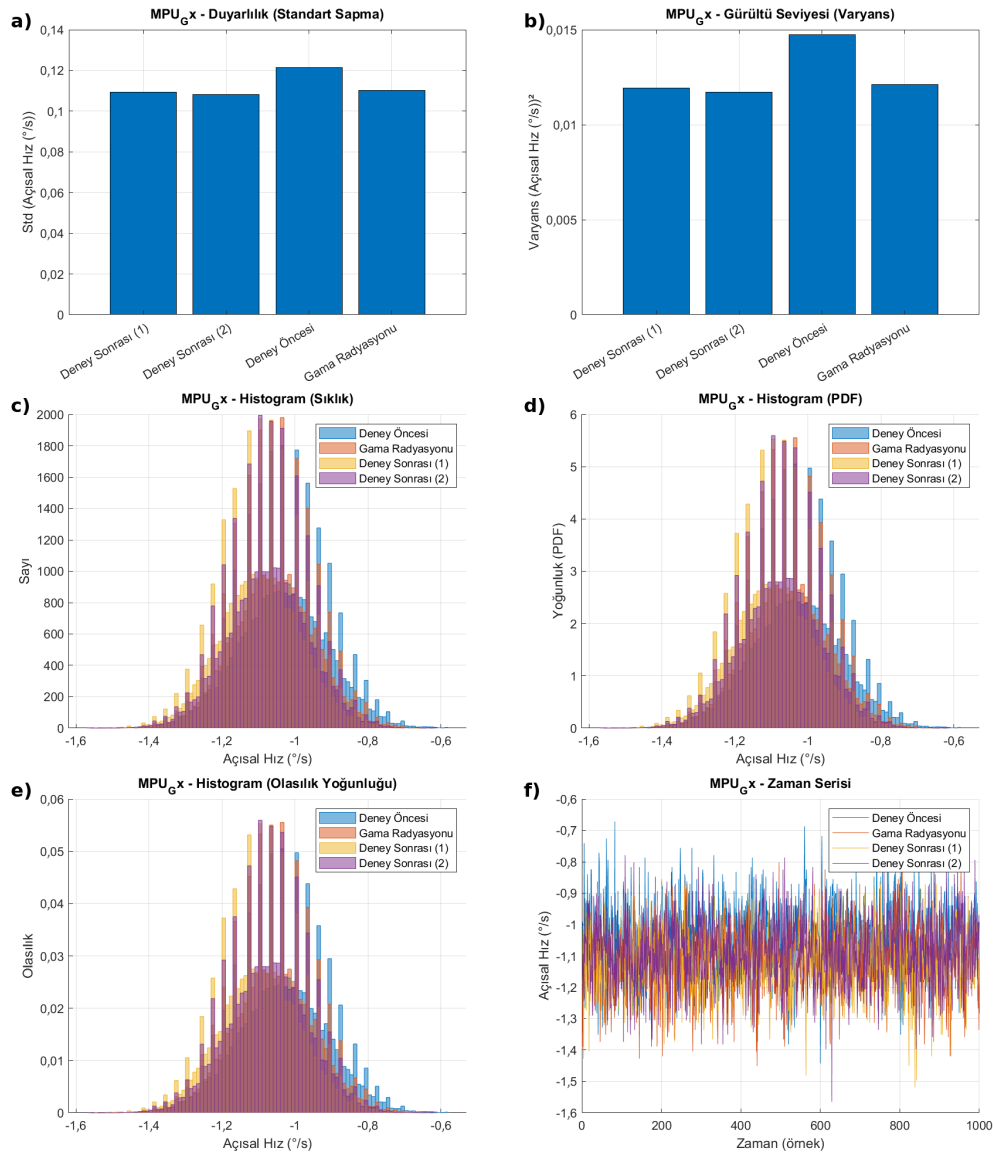
“Deney Sonrası (2)” dönemlerinde sırasıyla 0,012 ve 0,013 düzeylerine düşerek sistemin eski kararlılığına yakınsadığı gözlenmiştir. Zaman serisi grafikleri de bu durumu destekler şekilde, radyasyon sürecinde belirli örneklerde ani çıkış sıçramaları (spike) gözlenmiş, ancak bu bozulmalar sonraki periyotlarda bastırılmıştır.

Standart sapma grafiği incelendiğinde, deney öncesi 0,128 olan değer, radyasyon süresince 0,137’ye yükselmiş, ardından 0,122 ve 0,124 seviyelerine inmiştir. Histogram dağılımında ise özellikle “Gama Radyasyonu” evresinde eğrinin sivrileştiği, uç değerlerin daha sık tekrarlandığı, ancak sonrasında yeniden dengelendiği izlenmiştir.

PDF grafiği, bu dağılım karakteristiğinde bozulmanın deney sonrası kısmen toparlandığını ve sensörün kararlı ölçüm üretme yetisini yeniden kazandığını göstermektedir. Sonuç olarak MPU\_Gy eksenine, geçici dağılım karakteristiğinde kararsızlık, duyarlılıkta geçici artış, ancak uzun vadede toparlanma eğilimi ile karakterize edilmiştir.

MPU\_Gx eksenine için elde edilen grafikler, gamma radyasyonunun jiroskop sinyal dağılımı üzerindeki etkisini daha çok duyarlılık ve dağılım asimetrisi şeklinde gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil-4).

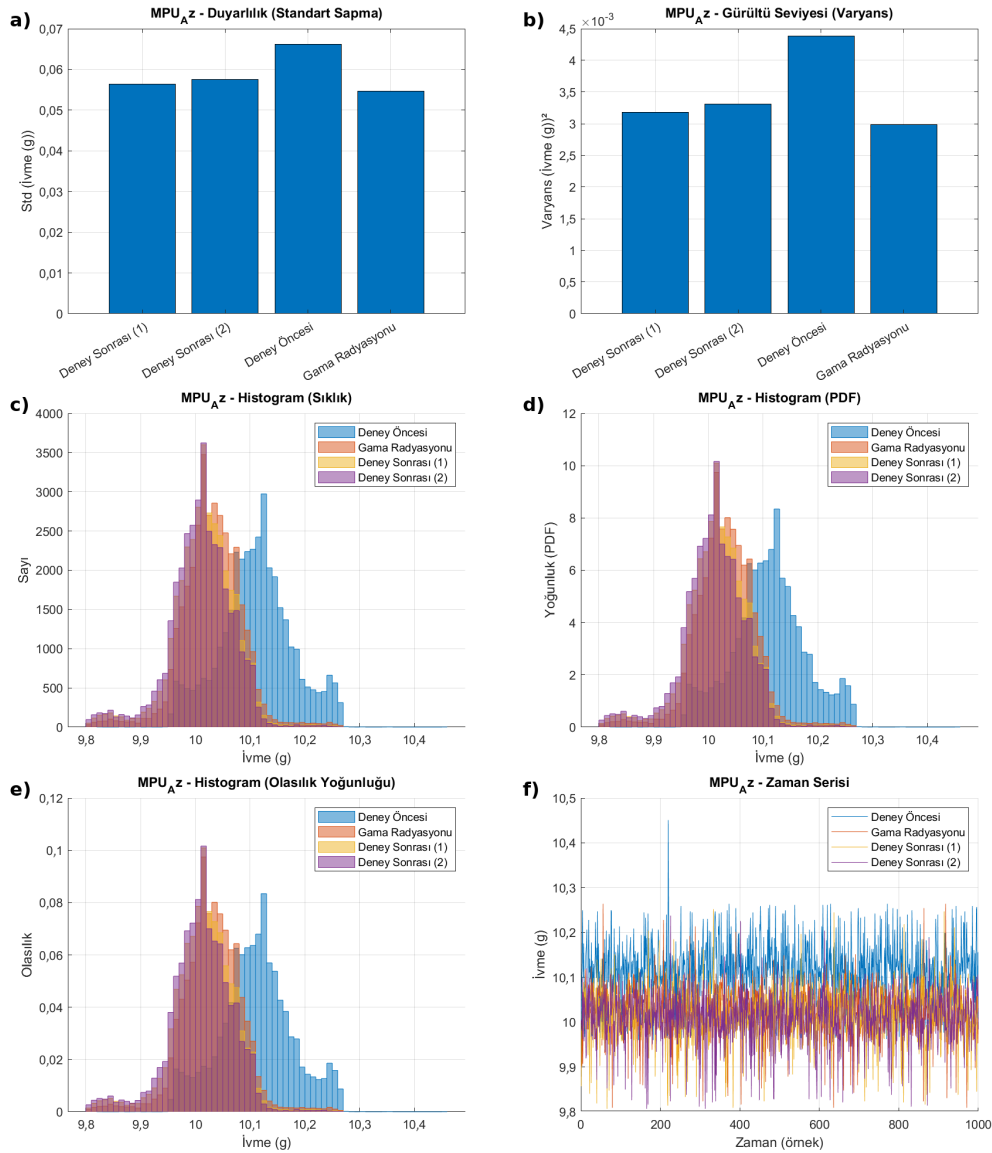
Gürültü seviyesi, deney öncesi dönemde  $0,0145$   $(^{\circ}/s)^2$  civarındayken, “Gama Radyasyonu” evresinde bu değer  $0,012$ 'ye, “Deney Sonrası (1)” ve “Deney Sonrası (2)” evrelerinde ise  $0,0115$  düzeyine inmiştir. Bu azalma, sistemin çıkış varyasyonlarının bastırıldığını ve çevresel titreşimleri daha az yansıttığını göstermektedir. Zaman serisi grafiğinde ise sinyal genliğinin kademeli olarak azaldığı, ancak ortalama seviyenin ciddi değişiklik göstermediği izlenmektedir.



**Şekil 4.** MPU\_Gx eksenine a) Duyarlılık (standart sapma) b) Gürültü seviyesi (varyans) c) Histogram (sıklık dağılımı) d) Histogram (olay yoğunluğu - PDF) e) Histogram (olasılık yoğunluğu) f) Zaman serisi grafiği (MPU\_Gx axis: a) Sensitivity (standard deviation) b) Noise level (variance) c) Histogram (frequency distribution) d) Histogram (event density - PDF) e) Histogram (probability density) f) Time series graph

Standart sapma değerleri 0,124'ten başlayarak sırasıyla 0,116, 0,112 ve 0,113'e düşmüştür. Histogram analizlerinde, "Deney Sonrası (2)" verisinde dağılımın hafif asimetric hale geldiği, uç değerlere kayan tekrarlarla artış olduğu gözlenmiştir. PDF eğrileri, deney sonrası dönemde sistemin simetriden uzaklaştığını ve hassasiyet kaybı yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, MPU\_Gx ekseninde radyasyonun daha çok sinyal dinamiğinde bastırma, dağılımda asimetri ve hassasiyetin daralması şeklinde yansıdığını göstermektedir.

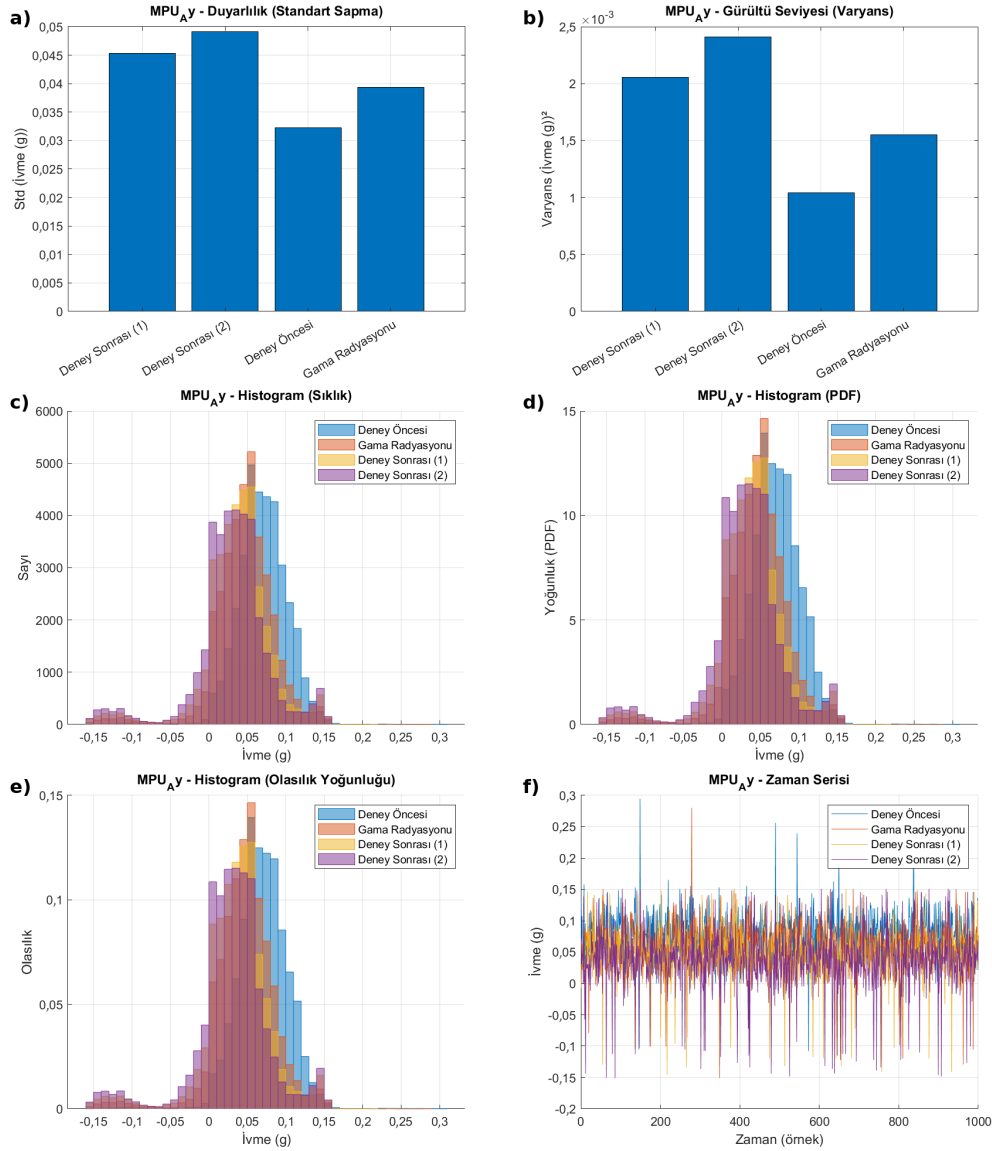
MPU\_Az eksenine için elde edilen grafikler, kütle çekimi doğrultusunda çalışan bu eksenin gama radyasyonu etkisi altında hem ofset sapması hem de duyarlılık kaybı yönünden değişime uğradığını ortaya koymaktadır (Şekil-5). Varyans grafiği, deney öncesi dönemde yaklaşık 0,0045 (g)<sup>2</sup> seviyesinde sabit bir gürültü düzeyini gösterirken, "Gama Radyasyonu" evresinde bu değer 0,0033'e, "Deney Sonrası (1)" ve "Deney Sonrası (2)" evrelerinde ise sırasıyla 0,0029 ve 0,0028 seviyelerine gerilemiştir.



**Şekil 5.** MPU\_Az eksenine a) Duyarlılık (standart sapma) b) Gürültü seviyesi (varyans) c) Histogram (sıklık dağılımı) d) Histogram (olay yoğunluğu - PDF) e) Histogram (olasılık yoğunluğu) f) Zaman serisi grafiği (MPU\_Az axis: a) Sensitivity (standard deviation) b) Noise level (variance) c) Histogram (frequency distribution) d) Histogram (event density - PDF) e) Histogram (probability density) f) Time series graph

Bu düşüş, sistemin rastgele dalgalanma içeriğini kaybettiğini ve çıkış sinyalinde bastırılmış bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Zaman serisi grafiğinde de bu durum doğrulanmakta; radyasyon öncesinde yaklaşık 10,1 g olan sinyal seviyesi, maruziyet sonrasında 9,93–9,92 g seviyelerine inerek kalıcı bir bias drift oluştuğunu ortaya koymaktadır.

Standart sapma grafiği incelendiğinde, deney öncesi 0,065 olan değer, zamanla azalarak sırasıyla 0,059, 0,056 ve 0,054 seviyelerine inmiştir. Bu azalma, sensörün çevresel değişimlere verdiği tepkide baskılanma olduğunu göstermektedir. Histogram dağılımları da bu bulguları destekler biçimde dar bir eğri sergilemekte; özellikle “Deney Sonrası (2)” evresinde dağılımın merkezileştiği ve uç değerlerin azaldığı gözlenmektedir.



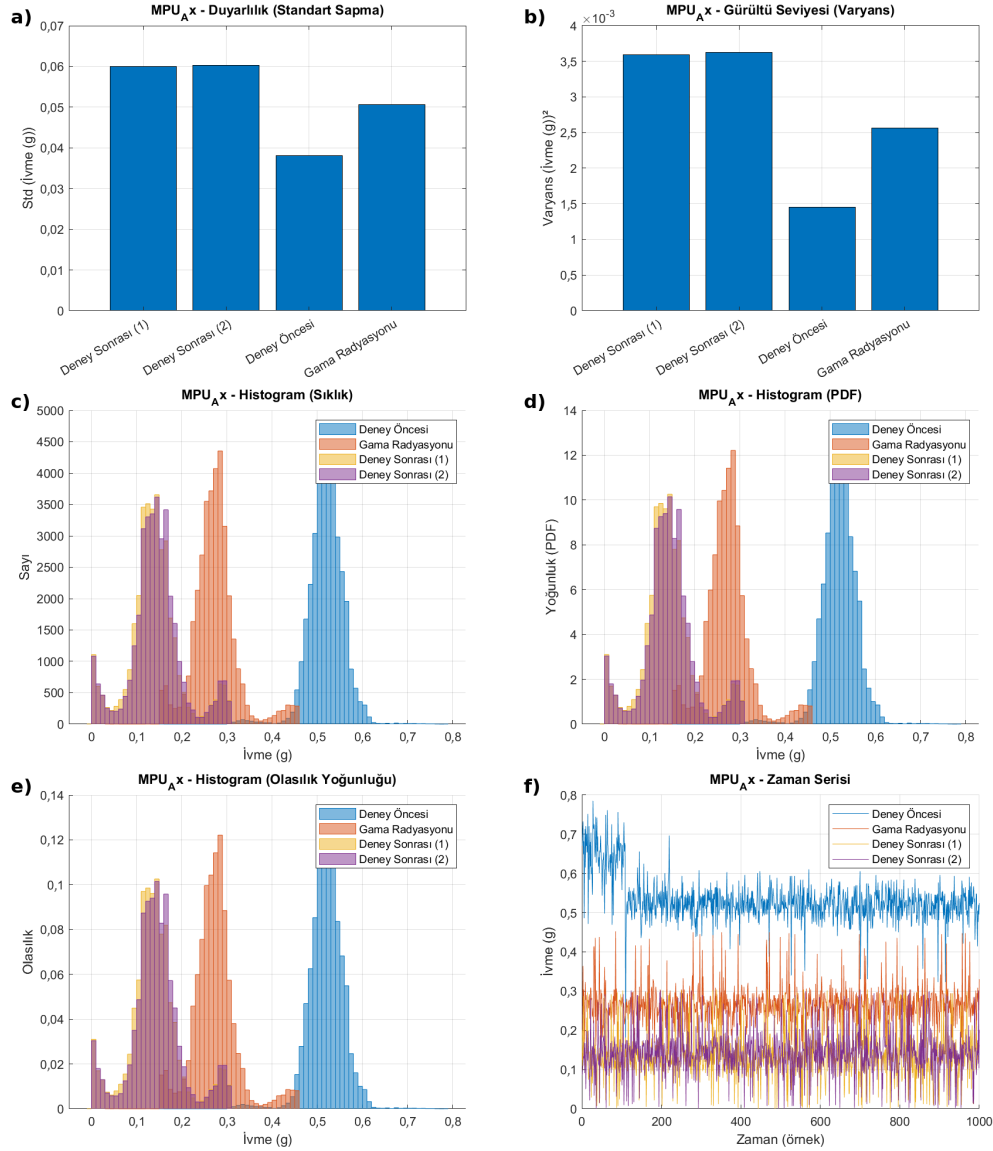
**Şekil 6.** MPU\_Ay ekseninde a) Duyarlılık (standart sapma) b) Gürültü seviyesi (varyans) c) Histogram (sıklık dağılımı) d) Histogram (olay yoğunluğu - PDF) e) Histogram (olasılık yoğunluğu) f) Zaman serisi grafiği (MPU\_Ay axis: a) Sensitivity (standard deviation) b) Noise level (variance) c) Histogram (frequency distribution) d) Histogram (event density - PDF) e) Histogram (probability density) f) Time series graph

Bu bulgular, MPU\_Az ekseninde gama radyasyonu etkisiyle oluşan kararlı sinyal bastırılması, duyarlılık azalması ve kalıcı ofset

sapması gibi performans kayıplarını açıkça ortaya koymaktadır.

MPU\_Ay eksenini için elde edilen grafikler, gama radyasyonunun bu ekseninde daha çok gürültü artışı ve ölçüm kararsızlığı şeklinde etkiler yarattığını göstermektedir (Şekil-6). Gürültü seviyesi (varyans) analizine göre, deney öncesi 0,0011 (g)<sup>2</sup> düzeyinde olan varyans, “Gama Radyasyonu” süresince 0,0016’ya, “Deney Sonrası (1)” ve “Deney Sonrası (2)” evrelerinde ise sırasıyla

0,0021 ve 0,0024 seviyelerine yükselmiştir. Bu artış, sensörün çevresel salınımlara verdiği tepkide belirgin bir düzensizlik ve kararsızlık oluştuğunu ortaya koymaktadır. Zaman serisi incelendiğinde, deney sonrası periyotlarda sinyal genliğinin arttığı ve ölçüm çıktılarının düzenli bir yapıda seyretmediği net biçimde gözlenmektedir.



**Şekil 7.** MPU\_Ax eksenini a) Duyarlılık (standart sapma) b) Gürültü seviyesi (varyans) c) Histogram (sıklık dağılımı) d) Histogram (olay yoğunluğu - PDF) e) Histogram (olasılık yoğunluğu) f) Zaman serisi grafiği (MPU\_Ax axis: a) Sensitivity (standard deviation) b) Noise level (variance) c) Histogram (frequency distribution) d) Histogram (event density - PDF) e) Histogram (probability density) f) Time series graph)

Duyarlılığı gösteren standart sapma değerleri de bu bulgularla uyumlu olarak deney öncesi 0,027 seviyesinden başlayarak sırasıyla 0,036, 0,045 ve 0,048 değerlerine yükselmiştir. Bu durum, sistemin çevresel ivme değişikliklerine verdiği tepkinin tutarsız ve artan bir yapıya büründüğünü göstermektedir. Histogram grafiklerinde özellikle

“Deney Sonrası (2)” evresinde dağılımın hem sola hem sağa yayıldığı ve simetrisinin bozulduğu dikkat çekmektedir. PDF eğrisi, önceki döneme göre daha yayvan, düşük genlikli ve uç değerlerde yoğunlaşan bir yapı sergilemektedir. Bu bulgular, MPU\_Ay ekseninde duyarlılıkta kontrolsüz artış, gürültü yoğunluğu artışı ve ölçüm güvenilirliğinde

zayıflama gibi performans düşüşlerinin kalıcı nitelik taşıdığını göstermektedir.

MPU\_Ax eksenini için elde edilen grafikler, gama radyasyonunun ivmeölçer performansı üzerindeki etkilerini istatistiksel ve görsel olarak açıkça ortaya koymaktadır (Şekil-7). İlk olarak gürültü seviyesi (varyans) üzerinden değerlendirildiğinde, radyasyon öncesinde yaklaşık  $0,0015 (g)^2$  seviyesinde seyreden varyansın, radyasyon etkisiyle birlikte  $0,0026$ 'ya yükseldiği ve "Deney Sonrası (1)" ile "Deney Sonrası (2)" evrelerinde ise sırasıyla  $0,0037$  ve  $0,0039 (g)^2$  değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu artış, sensörün çıkış sinyalinde daha fazla rastgele dalgalanma yaşandığını ve kararlılığın anlamlı biçimde azaldığını ortaya koymaktadır. Zaman serisi grafiği de bu bulguları doğrular şekilde, deney öncesinde yaklaşık  $0,55 g$  civarında sabit bir sinyal görülürken, deney sonrası dönemde bu değer  $0,25 g$  seviyelerine kadar gerilemiş ve sinyal dalgalanmalarının genliği belirgin biçimde artmıştır.

Duyarlılığı temsil eden standart sapma grafiği incelendiğinde, sensörün çevresel değişimlere verdiği tepkide kontrolsüz artış gözlemlenmiştir. Başlangıçta  $0,045$  düzeyindeki standart sapma, maruz kalma sürecinde  $0,055$ 'e, sonrasında ise sırasıyla  $0,061$  ve  $0,065$ 'e ulaşmıştır. Bu durum, sistemin ölçüm kararlılığını kaybettiğini ve beklenen sınırların dışında geniş dağılımlar sergilediğini göstermektedir. Histogram (sayı, pdf, olasılık yoğunluğu) grafiklerinde ise dağılımın başlangıçta ortalama  $0,50 g$  merkezli simetrik bir formdayken, deney sonrası evrede  $0,10-0,25 g$  aralığına kaydığı, dağılımın hem sola hem de alta doğru asimetrik biçimde genişlediği dikkat çekmektedir. Özellikle olasılık yoğunluğu (PDF) grafiğinde, önceki döneme göre düşük genlikli ancak daha yaygın bir dağılım olduğu görülmektedir. Bu veriler, MPU\_Ax ekseninde radyasyonun etkisiyle ortaya çıkan kararlılık bozulması, gürültü artışı, ofset sapması ve hassasiyet zayıflaması gibi çoklu bozulma kalıplarını somut biçimde gözler önüne sermektedir.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında, MEMS tabanlı bir atalet ölçüm sensörü olan MPU6050'nin gama radyasyonu (Co-60) etkisi altındaki performans değişimi sistematik olarak incelenmiş ve dört farklı zaman dilimine ait (Deney Öncesi, Gama Radyasyonu, Deney Sonrası (1), Deney Sonrası (2)) veriler çok boyutlu istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Yapılan ölçümler, sensörün

yatay düzlemde konumlandırıldığı sabit bir geometri altında gerçekleştirilmiş ve her ölçüm periyodu  $600$  dakika boyunca sürdürülmüştür. İncelenen metrikler; histogram tabanlı dağılım analizleri (sayı, olasılık, yoğunluk), zaman serisi, varyans (gürültü seviyesi) ve standart sapma (duyarlılık) ölçümlerini kapsamıştır.

Elde edilen bulgular, gama radyasyonunun MPU6050 sensör eksenleri üzerinde sistematik etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle MPU\_Gz ekseninde kalıcı bir ofset kayması ve duyarlılık azalması meydana gelirken, MPU\_Gy ekseninde geçici dağılım karakteristiğinde bozulmalar gözlemlenmiş, MPU\_Gx ekseninde ise dağılım simetrisinde bozulmalarla birlikte duyarlılığın bastırıldığı bir yapı oluşmuştur. İvmeölçer eksenlerinden MPU\_Az'de sistematik sapma ve sinyal genliği azalması gözlenmiş; MPU\_Ay'de gürültü seviyesi ve ölçüm kararsızlığı belirgin şekilde artmış; en yüksek etki ise MPU\_Ax ekseninde gerçekleşmiş ve bu ekseninde ofset sapması, sinyal zayıflaması ve gürültü artışı aynı anda meydana gelmiştir.

Tüm eksenlerdeki varyans ve standart sapma eğilimleri, radyasyonun sensör üzerinde hem rastgele hem de yapısal bozulmalara yol açtığını ortaya koymuş, zaman serisi analizleri ile bu bozulmaların zamana bağlı kalıcılığı ve ilerleyici doğası gözlemlenmiştir. Histogram eğrilerindeki şekil değişimleri ise dağılım simetrisinin bozulduğunu ve sensör çıktılarının istatistiksel karakteristiğinin değiştiğini göstermiştir. Deney Sonrası (2) verilerinde dahi bozulmaların büyük oranda devam ediyor olması, MPU6050'nin gama radyasyonu maruziyeti sonucu geri dönüşü olmayan, kalıcı performans kayıplarına uğradığını açık biçimde kanıtlamaktadır. Etkiler, nicel verilerle değerlendirildiğinde çarpıcı bir tablo ortaya koymaktadır. Toplam  $9,85 R$  doza maruziyet sonucunda, en yüksek bozulmanın gözlemlendiği MPU\_Ax ekseninde varyans değeri  $0,0015 (g)^2$  seviyesinden  $0,0039 (g)^2$ 'ye yükselerek gürültü seviyesinin yaklaşık  $2,6$  kat arttığını göstermiştir. Aynı ekseninde sinyal ortalamasının  $0,55 g$ 'den  $0,25 g$  seviyelerine gerilemesi, radyasyonun MEMS kapasitif yapısında yarattığı potansiyel farkı değişimlerinin sinyal genliğini baskıladığına işaret etmektedir. Ayrıca MPU\_Gz ekseninde radyasyon öncesi  $1,1 \text{ } \%/s$  olan ofset değerinin, ışınlama sonrası  $0,78 \text{ } \%/s$  bandına kalıcı olarak oturması, dielektrik tabakalarda biriken yüklerin (trapped charge) sensörün sıfır noktası kararlılığını (zero-rate level) bozduğunu nümerik olarak doğrulamaktadır.

Bu doğrultuda, gama radyasyonu gibi iyonlaştırıcı ortamlarda kullanılacak MEMS sensör sistemlerinin çevresel etkilere karşı karakterize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, MPU6050 özelinde yürütülen kapsamlı analizlerle, radyasyon toleransı düşük olan sensörlerde oluşabilecek sapmaların boyutunu ve yapısını ortaya koymakta; gelecekte bu tür ortamlarda kullanılacak sensör sistemlerinde radyasyon koruması, aktif kalibrasyon ve hata düzeltme algoritmalarının entegre edilmesi gerekliliğini bilimsel dayanaklarla vurgulamaktadır. Test sürecinde IMU sensörünün maruz kaldığı Toplam İyonlaştırıcı Doz (TID) miktarının belirlenmesinde, noktasal kaynaklar için geçerli olan doz hızı eşitliğinden yararlanılmış olsa da dozimetre kullanılması ölçüm doğruluğunu artıracaktır. Ayrıca, çalışma kapsamında MPU6050 sensörünün ölçüm kararlılığı ölçülmek istense de, çalışmanın genişletilerek havacılık sanayiinde kullanılan sensörlerin de araştırılması önemli bilimsel sonuçlar sunacaktır.

Ayrıca, eksenler arasında asimetrik bozulma gözlemlenmiştir. Bu, MEMS sensörlerin iç mimarisindeki yapısal farklılıklar ve radyasyon kaynağının geometrik konumu ile ilişkilendirilmektedir. MEMS ataletsel sensörlerde, düzlem içi (in-plane, X ve Y eksenleri) ve düzlem dışı (out-of-plane, Z eksen) hareketleri algılamak için genellikle farklı kapasitif yapılar (tarak tipi sürücüler veya paralel levhalar) kullanılmaktadır. Literatürde Shea (2011) tarafından belirtildiği üzere, iyonlaştırıcı radyasyonun dielektrik tabakalarda oluşturduğu tuzaklanmış yükler (trapped charges), bu farklı kapasitif geometrielerde homojen olmayan parazitik elektrik alanlarına yol açmakta, bu da eksenlerin bias kararlılığını farklı oranlarda etkilemektedir. Ayrıca, deney düzeneğinde radyasyon kaynağının sensörün doğrudan üzerinde (Z eksen doğrultusunda) konumlandırılmış olması, gama ışınlarının silikon yapı ile etkileşim kesitinin her eksen için farklılaşmasına neden olmuştur. Bazzano vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulandığı gibi, radyasyonun geliş açısı ve sensörün ASIC devresindeki yerleşim topolojisi, tekil olay etkilerinin (SEE) ve toplam doz hasarının (TID) eksenler üzerinde seçici bir dağılım göstermesine neden olabilmektedir.

## 5. GELECEK ÇALIŞMALAR (FUTURE WORKS)

Gelecek çalışmalarda, sensörün ultrasonik dalgalarla etkileşimi [16] vb. dış etkiler incelenerek yüksek frekanslı akustik ortamlardaki davranışı; olası yapısal titreşim kaynaklı hatalar nicel olarak

değerlendirilmelidir. Ayrıca, elektromanyetik spektrumda yönlendirilmiş sinyallerin (örneğin elektronik harp uygulamaları) sensör kararlılığı üzerindeki etkileri de ayrı bir çalışma başlığı altında ele alınabilir. Bu bağlamda, farklı tipte MEMS IMU'ların çeşitli çevresel faktörler altında kıyaslanması, askeri ve uzay uygulamalarında güvenilir sistem tasarımı açısından kritik öneme sahiptir [17]. Çalışma, İnsansız Hava Araçlarında (İHA) gerçek zamanlı IMU sensörlerinin dış etkilere maruziyeti sonrasında hava aracının stabilizasyonu ve kalibrasyon tekniklerinin geliştirilmesine zemin hazırlayacaktır.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declare that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Mehmet İrfan GEDİK:** Araştırma fikrinin oluşturulması, metodolojinin tasarımı, deneylerin yürütülmesi, verilerin istatistiksel analizi ve makalenin orijinal taslağının yazılması.

Conceptualization, methodology design, conducting experiments, statistical analysis of data, and writing the original draft.

**Fatih BAYKAL:** Deney düzeneğinin (donanım entegrasyonu) kurulması, veri toplama süreci ve makalenin İHA sistemleri bağlamında eleştirel incelenmesi.

Setup of the experimental hardware, data collection process, and critical review of the manuscript in the context of UAV systems.

**Ahmet KARADAĞ:** Veri analizi sonuçlarının doğrulanması, literatür taramasına katkı sağlanması ve makalenin son okuma ile düzenleme (revizyon) aşamaları.

Validation of data analysis results, contribution to the literature review, and final review/editing of the manuscript.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yaşanmamıştır.

There is no conflict of interest in this study.

**KAYNAKLAR** (REFERENCES)

- [1] Yamaguchi, M., "Drone explores Fukushima's nuclear reactor for the first time," AP News, 2024. Erişim adresi: <https://apnews.com/article/japan-fukushima-nuclear-reactor-drone-radiation-water-afl640b8ae800066d5bfc728a211d34b> <erişim tarihi: 18.06.2026>
- [2] University of Bristol, "UAVs used for radiation mapping of Chernobyl's Red Forest," South West Nuclear Hub, 2020. Erişim adresi: <https://southwestnuclearhub.ac.uk/radiation-mapping-chernobyl> <erişim tarihi: 23.05.2025 >
- [3] Herbert R. Shea, Effects of Radiation on MEMS, Reliability, Packaging, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS and Nanodevices X, Proceedings of SPIE, vol. 7928, 2011.
- [4] David D. Lynes, Hengky Chandrahilim, Wendi He, Effects of Gamma Ray Radiation on the Performance of Microelectromechanical Resonators, Advanced Engineering Materials, Wiley-VCH, 2023.
- [5] M. Glova, D. Donoval, J. Jakovenko, A. Lobotka, M. Weis, Neutron and Gamma Radiation Effects on MEMS Structures, Procedia Engineering, vol. 25, pp. 1081–1084, 2011.
- [6] Bazzano, G., Ampollini, A., Cardelli, F., Fortini, F., Nenzi, P., Palmerini, G. B., ... & Sabatini, M. (2021). Radiation testing of a commercial 6-axis MEMS inertial navigation unit at ENEA Frascati proton linear accelerator. *Advances in Space Research*, 67(4), 1379-1391.
- [7] Petersen, H. R., Holm, R., Mathisen, H. E., & Horntvedt, M. (2019). COTS for Space–Radiation Characterization of Gyro and IMUs for LEO Operations.
- [8] Mathisen, H. E. (2025). Radiation testing of STIM210 and STIM300 (Technical Note No. 25051401). [https://safran-navigation-timing.com/wp-content/uploads/2025/06/TN25051401-Radiation-testing-of-STIM210-and-STIM300-pub\\_low-res.pdf](https://safran-navigation-timing.com/wp-content/uploads/2025/06/TN25051401-Radiation-testing-of-STIM210-and-STIM300-pub_low-res.pdf).
- [9] Earthperson, A., & Diaconeasa, M. A. (2023). Integrating commercial-off-the-shelf components into radiation-hardened drone designs for nuclear-contaminated search and rescue missions. *Drones*, 7(8), 528.
- [10] De Pasquale, G., & Soma, A. (2010). Reliability testing procedure for MEMS IMUs applied to vibrating environments. *Sensors*, 10(1), 456-474.
- [11] Shimane, E., Matsumoto, S., Moriguchi, T., Iwai, Y., & Uchino, R. (2019). The study on performance of MEMS IMU for launch vehicle under high vibration environment. *Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, aerospace technology Japan*, 17(4), 421-426.
- [12] Kugiumtzis, D., & Tsimpiris, A., Measures of Analysis of Time Series (MATS): A MATLAB Toolkit for Computation of Multiple Measures on Time Series Data Bases, *Journal of Statistical Software*, vol. 33, no. 5, pp. 1–30, 2010.
- [13] García-Villamil, G., Ruiz, L., Jiménez, A. R., Seco, F., & Rodríguez-Sánchez, M. C., Influence of IMU's measurement noise on the accuracy of stride-length estimation for gait analysis, *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 3097, pp. 1–12, 2021.
- [14] Jambrošić, K., Krhen, M., Horvat, M., & Jagust, T., Measurement of IMU sensor quality used for head tracking in auralization systems, *e-Forum Acusticum 2020*, Lyon, France, pp. 2063–2070, 2020.
- [15] Nirmal, K., Sreejith, A. G., Mathew, J., Sarpotdar, M., Suresh, A., Prakash, A., & Safonova, M., Noise modeling and analysis of an IMU-based attitude sensor: improvement of performance by filtering and sensor fusion, *Proceedings of the SPIE*, vol. 9903, 2016.
- [16] Yunfan Zhang, Chengjie Liu, Zeyu Wang, Mengchu Zhou, Xiaofeng Chen, Investigation of Acoustic Injection on the MPU6050 Accelerometer, *Sensors*, vol. 19, no. 13, 2019.
- [17] Gill, W. A., Howard, I., Mazhar, I., & McKee, K., A Review of MEMS Vibrating Gyroscopes and Their Reliability Issues in Harsh Environments, *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7405, 2022.