

**NÜKLEER RADYASYONA DUYARLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR TABANLI
RADYASYON SENSÖRLERİNİN UZAY UYGULAMALARI İÇİN
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF NUCLEAR RADIATION
SENSITIVE FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED RADIATION SENSORS
FOR SPACE APPLICATIONS**

BUĞRA KOCAMAN

Doç. Dr. EYLEM GÜVEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Aileme...

ÖZET

NÜKLEER RADYASYONA DUYARLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR TABANLI RADYASYON SENSÖRLERİNİN UZAY UYGULAMALARI İÇİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Buğra KOCAMAN

Doktora, Nanoteknoloji ve Nanotıp Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eylem GÜVEN

Ağustos 2020, 126 sayfa

Transistörler, nanoteknolojinin sunmuş olduğu avantajlardan en fazla yararlanılan uygulama alanlarının başında gelmektedir. Üretim tekniklerinin gelişmesiyle birlikte daha küçük, daha verimli ve daha hızlı çalışabilen transistörlerin üretilmesi mümkün olmaktadır. Anahtarlama ve güç düzenleme gibi amaçlarla elektronik devre elemanı olarak kullanılabilmelerinin yanında, transistörler başka amaçlar içinde kullanılabilir. Transistörlerin en sık kullanılan çeşitlerinden biri olan metal oksit yarı iletken alan etkili transistörlerin (MOSFET) radyasyon sensörü olarak kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Bununla birlikte, 100 nm altında oksit tabaka kalınlıklarına sahip sensörlerin, uzay radyasyonu uygulamalarına yönelik olan çalışmaların literatürde yetersiz olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında, uzay uygulamalarına yönelik olarak nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör (NürFET) olarak adlandırılan radyasyon sensörlerinin kullanıldığı bir radyasyon dedektörünün geliştirilmesi ve radyasyon altında karakterizasyonu amaçlanmıştır. Bu amaçla, sensörlerin çalışma performanslarının radyasyon altında gerçek zamanlı ölçülmesine imkân sağlayan, uydularda da kullanılacak bir radyasyon dedektörü tasarlanmış ve

üretimiştir. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörün kapı ucu malzemesi olarak silikon dioksit (SiO_2) kullanılmıştir. 40 nm, 60 nm ve 100 nm'lik 3 farklı oksit tabaka (SiO_2) kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin çalışma performansları, daha önce çeşitli uzay görevlerinde kullanılmış olan Radiation Sensing Field Effect Transistor (RADFET) ve Floating Gate Dosimeter (FGDOS) sensörleri ile karşılaştırılmıştir. Dedektörün ve sensörlerin çalışma performansları, Kobalt-60 (Co-60) radyasyon kaynağı ile test edilerek ilgili sonuçlar sunulmuştur. Radyasyon dedektörü 256 saniye ve 416 saniye olmak üzere iki farklı zaman aralığında radyasyona maruz bırakılmıştir. İlk radyasyon testi 256 saniye sürmüştür. İlk test basamağında tüm sensörler (nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör, RADFET ve FGDOS) başarılı bir şekilde çalıştırılmıştir. Maruz kalınan radyasyon doz seviyesinin çok yüksek olmasından dolayı FGDOS sensörü ilk ışınlama sırasında dedektör devresinin tıkanmasına (kilitlemesine) sebep olmuştur. Bu sebeple, ikinci radyasyon testi öncesi, FGDOS sensörü yazılım yardımıyla devreden çıkarılmıştir. İkinci radyasyon testi 416 saniye sürmüştür. İkinci test basamağında nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörleri ve RADFET sensörleri başarılı bir şekilde çalıştırılmıştir. Oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla birlikte nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin radyasyona olan hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin eşik gerilimlerinde meydana gelen kayma miktarlarının üretici tarafından $10 \mu\text{A}$ 'lık sabit akım kaynağı ile ölçülmesi önerilmektedir. Uzay ortamının zorlayıcı koşulları sebebiyle $10 \mu\text{A}$ 'nın hassas bir şekilde verilmesi kolay değildir. Bu sebeple, dedektör devresi üzerinde kullanılması göreceli olarak daha kolay olan $100 \mu\text{A}$ 'lık ikinci bir sabit akım kaynağı daha kullanılmıştir. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı, ilk radyasyon testinde, $10 \mu\text{A}$ 'lık akım kaynağı ile 3,698 mV, $100 \mu\text{A}$ 'lık akım kaynağı ile 3,884 mV olarak ölçülmüştür. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı, ikinci radyasyon testinde, $10 \mu\text{A}$ 'lık akım kaynağı ile 5,668 mV, $100 \mu\text{A}$ 'lık akım kaynağı ile 6,081 mV olarak ölçülmüştür. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer

radasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı, ilk radyasyon testinde, 10 μ A'lık akım kaynağı ile 7,134 mV, 100 μ A'lık akım kaynağı ile 8,091 mV olarak ölçülmüştür. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı, ikinci radyasyon testinde, 10 μ A'lık akım kaynağı ile 10,103 mV, 100 μ A'lık akım kaynağı ile 10,330 mV olarak ölçülmüştür. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı, ilk radyasyon testinde, 10 μ A'lık akım kaynağı ile 8,826 mV, 100 μ A'lık akım kaynağı ile 9,342 mV olarak ölçülmüştür. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı, ikinci radyasyon testinde, 10 μ A'lık akım kaynağı ile 13,603 mV, 100 μ A'lık akım kaynağı ile 14,066 mV olarak ölçülmüştür. Radyasyon dedektörü, uzay radyasyonunun yarattığı etkilerden biri olan toplam iyonize doz (TID) etkisini ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyesi, uydunun yapısal modelinde (dış yüzeyinde/panellerinde) kullanılan malzeme tipi ile ilişkilidir. Bu sebeple, kavramsal bir uydu modeli yaratılarak, dört farklı malzeme tipi (uydu dış yüzey malzemesi) için yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon dozu analiz programı ile hesaplanmıştır. Uydu yapısal modelinde, uydu dış yüzey malzemesi olarak, polimetil metakrilat (PMMA), cam (SiO_2), alüminyum (Al) ve kurşun (Pb) malzemeleri kullanılmıştır. Malzemelerin kalınlıkları 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak seçilmiştir. Bu malzemelerin üzerine uydu içinde ve uydu dışında olacak şekilde silisyum (Si) nokta dedektörleri tanımlanarak her bir nokta için ilgili radyasyon doz değerleri elde edilmiştir. Uydu dış yüzey malzemesi olarak polimetil metakrilat kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm kalınlıkları için sırasıyla 291 krad, 90,56 krad, 31,69 krad, 17,03 krad, 10,57 krad ve 7,171 krad olarak hesaplanmıştır. Uydu dış yüzey malzemesi olarak cam kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm kalınlıkları için sırasıyla 74,53 krad, 26,25 krad, 8,504 krad, 4,320

krad, 2,945 krad ve 2,428 krad olarak hesaplanmıştır. Uydu dış yüzey malzemesi olarak alüminyum kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm kalınlıkları için sırasıyla 74,39 krad, 26,10 krad, 8,356 krad, 4,281 krad, 2,965 krad ve 2,472 krad olarak hesaplanmıştır. Uydu dış yüzey malzemesi olarak kurşun kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm kalınlıkları için sırasıyla 5,822 krad, 3,270 krad, 2,428 krad, 2,067 krad, 1,839 krad ve 1,641 krad olarak hesaplanmıştır. Radyasyon analiz sonuçlarına göre malzeme kalınlıklarının ve özkütlelerin artmasıyla, uydu içerisinde maruz kalınacak olan doz seviyelerinin azaldığı gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen tüm bulgular değerlendirildiğinde, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tabanlı radyasyon sensörlerinin kullanıldığı radyasyon dedektörünün uzay uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: NürFET, Radyasyon Sensörleri, Radyasyon Dedektörü, Uzay Radyasyonu, RADFET, FGDOS, Co-60, Toplam İyonize Doz

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF NUCLEAR RADIATION SENSITIVE FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED RADIATION SENSORS FOR SPACE APPLICATIONS

Buğra KOCAMAN

Doctor of Philosophy, Division of Nanotechnology and Nanomedicine

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Eylem GÜVEN

August 2020, 126 pages

Transistors are one of the most important application areas of nanotechnology. It has been possible to produce smaller, more efficient, and faster transistors with the development of production techniques. In addition to their use as electronic circuit components for switching and power regulation purposes, transistors can also be used for other purposes. There are many studies in which Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET) -namely one of the most common transistor types- are used as radiation sensors. However, studies on space radiation applications using sensors that have oxide layer thicknesses below 100 nm have been found to be insufficient in the literature. The main objective of this study is developing and characterizing a radiation detector using radiation sensors called Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor (NürFET) with 40 nm, 60 nm, and 100 nm gate oxide thicknesses for space applications. The material type of gate oxide layer is silicon dioxide (SiO₂). A radiation detector, which can also be utilized in satellites, was designed and manufactured to measure the performances of sensors. To determine the performances of the sensors, the radiation tests were performed and all

measurements were collected in real-time. Additionally, there are two (2) sensors on the detector which were used in space missions before to compare and analyze the performances of Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensors. One of these sensors is Radiation Sensitive Field Effect Transistor (RADFET) and the other one is Floating Gate Dosimeter (FGDOS). The performances of the detector and sensors were tested with Cobalt-60 (Co-60) Gamma radiation source. The radiation detector was exposed to radiation in two steps. The first irradiation step lasted in 256 seconds and all radiation sensors (NürFET, RADFET, and FGDOS) were operated successfully. In the first irradiation, after a while, FGDOS did not work because of the high radiation dose and it congested the detector electrically. In the second part of the test, FGDOS was removed from the circuitry with the help of software. The second irradiation step lasted for 416 seconds. Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor and RADFET sensors were operated successfully. It has been shown that the sensitivity of radiation sensors increases with the increasing oxide layer thicknesses. It is recommended by the manufacturer of the Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor that the shifts in threshold voltages of Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensors should be read with 10 μA constant current source. However, it is not easy to supply "10 μA " constant current precisely because of the harsh conditions of the space environment. Therefore, a second constant current source of 100 μA is used which is relatively easier to use on the detector circuit. In the first radiation test, the threshold voltage shift for a 40 nm Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor was measured 3.698 mV with 10 μA and 3.884 mV with 100 μA . In the second radiation test, the threshold voltage shifts for a 40 nm Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor was measured 5.668 mV with 10 μA and 6.081 mV with 100 μA . In the first radiation test, the threshold voltage shift for a 60 nm Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor was measured 7.134 mV with 10 μA and 8.091 mV with 100 μA . In the second radiation test, the threshold voltage shifts for a 60 nm Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor was measured 10.103 mV with 10 μA and 10.330 mV with 100 μA . In the first radiation test, the threshold voltage shift for a 100 nm Nuclear

Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor was measured 8.826 mV with 10 μ A and 9.342 mV with 100 μ A. In the second radiation test, the threshold voltage shifts for a 100 nm Nuclear Radiation Sensitive Field Effect Transistor type radiation sensor was measured 13.603 mV with 10 μ A and 14.066 mV with 100 μ A. The radiation detector was designed to measure the Total Ionizing Dose (TID) effect, one of the effects of Space radiation. The radiation dose level to be exposed in orbit is related to the type of material used in the structural model (outer surface/panels) of the satellite. For this purpose, a conceptual satellite model was created and the radiation dose to be exposed in orbit for four different material types (satellite outer surface/panel) was calculated with the analysis program. Polymethyl methacrylate (PMMA), glass (SiO_2), aluminum (Al), and lead (Pb) materials were used in the satellite structural model. The thicknesses of the materials were chosen as 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm. On these materials, silicon (Si) point detectors were identified on the inner and outer surface of the satellite and corresponding dose values were obtained for each point. The exposed dose levels for the silicon point detector which was assigned at the center of the satellite were calculated on orbit - for polymethyl methacrylate material - as 291 krad, 90.56 krad, 31.69 krad, 17.03 krad, 10.57 krad and 7.171 krad for shielding thicknesses of satellite 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm, respectively. The exposed dose levels for the silicon point detector which was assigned at the center of the satellite were calculated on orbit - for glass material - as 74.53 krad, 26.25 krad, 8.504 krad, 4.320 krad, 2.945 krad and 2.428 krad for shielding thicknesses 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm, respectively. The exposed dose levels for the silicon point detector which was assigned at the center of the satellite were calculated on orbit - for aluminum material - as 74.39 krad, 26.10 krad, 8.356 krad, 4.281 krad, 2.965 krad, and 2.472 krad for shielding thicknesses 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm and 5 mm, respectively. The exposed dose levels for the silicon point detector which was assigned at the center of the satellite were calculated on orbit - for lead material - as 5.822 krad, 3.270 krad, 2.428 krad, 2.067 krad, 1.839 krad and 1.641 krad for shielding thicknesses 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm, respectively. The radiation analysis result shows that the exposed dose for the point which is inside the satellite decreases with

the increase of thicknesses and material density. According to the radiation test and analysis results obtained within the scope of this thesis study, a radiation detector using the Nuclear Radiation Sensitive Field-Effect Transistor based radiation sensors that can measure space radiation dose has been successfully designed and manufactured for space applications. When all findings obtained are evaluated, it can be concluded that the designed and produced radiation detector, utilizing Nuclear Radiation Sensitive Field-Effect Transistor based radiation sensors, could have an important potential for space applications.

Keywords: NürFET, Radiation Sensors, Radiation Detector, Space Radiation, RADFET, FGDOS, Co-60, Total Ionizing Dose

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamın her aşamasında ok büyük desteğini grdğm, ilgisi ve hoőgrs ile bana her zaman yol gösteren, değerli Hocam Do. Dr. Eylem Gven'e,

Laboratuvarlarının kapılarını aarak sensör üretimi konusunda çok kıymetli bilgiler ve tecrübeler kazanmamı sağlayan, değerli Hocam Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (NÜRDAM) Müdürü Prof. Dr. Ercan Yılmaz baőtta olmak üzere tüm NÜRDAM araőtırmacılarına,

Bu tez kapsamında üretilmiş olan radyasyon dedektörünün tasarım, üretim, analiz ve test çalıőmalarının herbirinde çok büyük ve değerli katkıları olan, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü alıőanları, değerli arkadaőtlarım Mehmet Köprü, Murat Harmandalı, Bekir Solak, Aziz Kuru, Dr. Osman Akkoyunlu ve Doç. Dr. M. Fatih Bay'a,

Çalıőmalarım boyunca desteklerini ve ilgilerini hiç esirgemeyen, özveri ve sabırlarıyla hep yanımda olan sevgili aileme,

En içten teőekkürlerimi sunarım.

Buğra Kocaman

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Nanoteknoloji ve Uygulama Alanları	4
2.2. Nanofabrikasyon Üretim Teknikleri	7
2.2.1. Levhanın Temizlenmesi	7
2.2.2. Fotolitografi	8
2.2.3. Katman Büyütme/Katkılama	8
2.2.4. Aşındırma	9
2.3. Radyasyon Sensörleri/Dedektörleri	9
2.3.1. Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör Yapısı ve Çalışma Prensipleri	11
2.3.2. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör ve Çalışma Prensipleri	14
2.4. Uydu Teknolojileri	15
2.5. Uzay Radyasyonu	18
2.5.1. Uzay Radyasyonu Kaynakları	19
2.5.1.1. Hapsolmuş Radyasyon	20
2.5.1.2. Solar Enerjik Parçacıklar	20

2.5.1.3. Galaktik Kozmik Radyasyon.....	21
2.5.2. Uzay Radyasyonu Etkileri.....	21
2.5.2.1. Toplam İyonize Doz.....	24
2.5.2.2. Yer Değiştirme Hasarı.....	25
2.5.2.3. Tekil Olay Etkileri.....	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
3.1. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Üretimi	28
3.2. Radyasyon Dedektörü ve Tasarımı.....	28
3.3. Radyasyon Simülasyon Analizleri	40
3.4. Radyasyon Testleri	41
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları.....	47
4.1.1. Polimetil metakrilat (PMMA) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları	48
4.1.2. Silisyum Dioksit ($SiO_2-\alpha$ quartz cam) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları	53
4.1.3. Alüminyum (Al) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları	57
4.1.4. Kurşun (Pb) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları	62
4.1.5. Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	66
4.2. Radyasyon Testleri Sonuçları	66
4.2.1. FGDOS Radyasyon Sensörüne Yönelik Radyasyon Testi ve Ölçüm Sonuçları	67
4.2.2. RADFET Radyasyon Sensörüne Yönelik Radyasyon Testi ve Ölçüm Sonuçları	70

4.2.3. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörlerine Yönelik Radyasyon Testi Ve Ölçüm Sonuçları.....	73
4.2.3.1. Oksit Tabaka Kalınlığı 40 nm Olan Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörü İçin Radyasyon Testi Sonuçları.....	74
4.2.3.2. Oksit Tabaka Kalınlığı 60 nm Olan Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörü İçin Radyasyon Testi Sonuçları	82
4.2.3.3. Oksit Tabaka Kalınlığı 100 nm Olan Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörü İçin Radyasyon Testi Sonuçları	90
4.2.3.4. Nükleer radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörlerinden Alınan Sonuçların Değerlendirilmesi.....	98
5. YORUM	101
6. KAYNAKLAR	107
EKLER.....	118
EK 1 – Tezden Türetilmiş Bildiriler	118
EK 2 – RADFET VT01 Radyasyon Sensörünün Veri Föyü (Datasheet).....	118
ÖZGEÇMİŞ	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. a) n tipi alan etkili transistör, b) p tipi alan etkili transistör [51].....	12
Şekil 2.2. a) çift kutup yüzeyli transistör, b) metal oksit yarı iletken alan etkili transistör [52, 53]	13
Şekil 2.3. a) n-tipi çoğalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı, b) p-tipi çoğalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı, c) n-tipi azalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı, d) p-tipi azalan) metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı [56]	13
Şekil 2.4. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin a) üstten, b) yandan ve c) alttan görüntüsü	14
Şekil 2.5. Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısında radyasyon sebebiyle oluşan yükler.....	15
Şekil 2.6. Uydu alt sistemleri [65]	17
Şekil 2.7. Uydu yörüngeleri [66]	18
Şekil 2.8. Elektromanyetik dalga enerji dağılımı (spektrum) [69].....	19
Şekil 2.9. Yüksek enerjili parçacıkların metal oksit yarı iletken yapısında yarattığı radyasyon etkileri (TID: toplam iyonize doz, DD: yer değiştirme hasarı, SEE: tekil olay etkileri)	23
Şekil 2.10. Toplam iyonize dozun metal oksit yarı iletken alan etkili transistör üzerindeki etkisi [80]	24
Şekil 2.11. Parçacıkların yarattığı yer değiştirme hasarı etkileri [81].....	26
Şekil 3.1. Tedarik edilen tarihçeli RADFET VT01 sensörü [87]	29
Şekil 3.2. Radyasyon sebebiyle RADFET sensörünün eşik voltaj değerinin artması [88].....	30
Şekil 3.3. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS sensörünün çalışma prensibi	31
Şekil 3.4. Bu tez kapsamında geliştirilmiş olan radyasyon dedektörünün çalışma prensibi	32
Şekil 3.5. LT3085 akım kaynağının blok diyagramı ve uygulama şeması [93] .	33
Şekil 3.6. LT3085 akım kaynağının sıcaklığa bağlı akım grafi [93].....	34
Şekil 3.7. REF200 akım kaynağının fonksiyonel blok diyagramı [94]	35
Şekil 3.8. REF200 akım kaynağının sıcaklığa bağlı akım grafi [94].....	35
Şekil 3.9. INA159 pin konfigürasyonu [95]	36
Şekil 3.10. LTC2404 analog-dijital çeviricinin fonksiyonel blok diyagramı [96] .	37

Şekil 3.11. LTC2404 analog-dijital çeviricinin sıcaklığa bağlı hata oranı [96] ...	38
Şekil 3.12. Bu tez kapsamında üretmiş olduğumuz radyasyon dedektörünün önden çekilmiş fotoğrafı.....	39
Şekil 3.13. a) Alüminyum plakalarla kalkanlanmış olan dedektörün önden görünüşü, b) kalkanlanmış dedektörün üstten görünüşü	40
Şekil 3.14. a) Kavramsal uydu modeli üzerinde tanımlanan silisyum nokta dedektörleri (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13), b) uydunun kesit görüntüsü	41
Şekil 3.15. a) TAEK SANAEM gama ışınlama tesisi, b) tesis içerisinde yer alan Co-60 radyasyon kaynağı [99].....	42
Şekil 3.16. TAEK SANAEM'de gerçekleştirilen radyasyon testinin krokisi	43
Şekil 3.17. Radyasyon test sehpası ve test kutusu.....	44
Şekil 3.18. a) Test kutusunun Co-60 radyasyon kaynağına göre konumu, b) Co-60 radyasyon kaynağı	45
Şekil 3.19. a) Alenin dozimetreleri, b) dedektörün güç kabloları ile enerji verilerek çalıştırılmış hali.....	46
Şekil 4.1. Radyasyon analiz programından alınan ekran görüntüleri, a) uydunun yapısal görüntüsü , b) uydunun iskelet görüntüsü	48
Şekil 4.2. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 0'a ait ölçüm sonuçları.....	68
Şekil 4.3. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 1'e ait ölçüm sonuçları.....	69
Şekil 4.4. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ilk ışınlama).....	71
Şekil 4.5. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ikinci ışınlama).....	72
Şekil 4.6. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)	75
Şekil 4.7. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama).....	77

Şekil 4.8. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)	79
Şekil 4.9. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)	81
Şekil 4.10. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)	83
Şekil 4.11. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)	85
Şekil 4.12. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)	87
Şekil 4.13. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)	89
Şekil 4.14. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)	91
Şekil 4.15. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)	93
Şekil 4.16. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)	95
Şekil 4.17. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Uydu yörünge parametreleri	47
Çizelge 4.2. 0,5 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	49
Çizelge 4.3. 1 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	50
Çizelge 4.4. 2 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	50
Çizelge 4.5. 3 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	51
Çizelge 4.6. 4 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	52
Çizelge 4.7. 5 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	52
Çizelge 4.8. 0,5 mm kalınlığa sahip SiO ₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	53
Çizelge 4.9. 1 mm kalınlığa sahip SiO ₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	54
Çizelge 4.10. 2 mm kalınlığa sahip SiO ₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	55
Çizelge 4.12. 4 mm kalınlığa sahip SiO ₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	56
Çizelge 4.13. 5 mm kalınlığa sahip SiO ₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	57
Çizelge 4.14. 0,5 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	58
Çizelge 4.15. 1 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	58
Çizelge 4.16. 2 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	59
Çizelge 4.17. 3 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları.....	60

Çizelge 4.18. 4 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	60
Çizelge 4.19. 5 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	61
Çizelge 4.20. 0,5 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	62
Çizelge 4.21. 1 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	63
Çizelge 4.22. 2 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	63
Çizelge 4.23. 3 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	64
Çizelge 4.24. 4 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	65
Çizelge 4.25. 5 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları	65
Çizelge 4.26. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 0'a ait ölçüm sonuçları.....	68
Çizelge 4.27. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 1'e ait ölçüm sonuçları.....	69
Çizelge 4.28. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ilk ışınlama).....	71
Çizelge 4.29. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ikinci ışınlama).....	72
Çizelge 4.30. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama).....	75
Çizelge 4.31. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama).....	77
Çizelge 4.32. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama).....	79

Çizelge 4.33. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama).....	81
Çizelge 4.34. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama).....	83
Çizelge 4.35. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)	85
Çizelge 4.36. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama).....	87
Çizelge 4.37. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama).....	89
Çizelge 4.38. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama).....	91
Çizelge 4.39. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)	93
Çizelge 4.40. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama).....	95
Çizelge 4.41. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama).....	97
Çizelge 4.42. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin 10 μ A ile ölçülen eşik gerilimindeki kayma miktarları (ΔV) ...	98
Çizelge 4.43. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin 100 μ A ile ölçülen eşik gerilimindeki kayma miktarları (ΔV) .	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ADC	Analog Dijital Çevirici
Co – 60	Kobalt – 60
COTS	Hazır Raf Ürünü
DC – DC	Direkt Akım – Direkt Akım Çevirici
e ⁻	Elektron
ESCC	European Space Components Coordination
Gy	Gray
HI	Ağır iyon (Heavy Ion)
MOS	Metal Oksit Yarı İletken
p ⁺	Proton
PMMA	Polimetil Metakrilat
rad	rad (maruz kalınan radyasyon birimi)
Radhard	Radyasyon Dayanımlı
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
SPU	Sinyal İşleme Birimi
V _{th}	Eşik Gerilimi

Kısaltmalar

BJT	Çift Kutup Yüzeyle Transistörleri
DD	Yer Değiştirme Hasarı (Displacement Damage)
DIP	Çift Sıra Uçlu Paket
EM	Elektromanyetik
ESD	Elektrostatik Deşarj (Boşalma)
FGDOS	Floating Gate Dosimeter
GCR	Galaktik Kozmik Radyasyon (Galactic Cosmic Ray)

GEO	Yer Sabit Yörünge (Geostationary Orbit)
HEO	Yüksek Eliptik Yörünge (Highly Elliptical Orbit)
LEO	Alçak Dünya Yörüngesi (Low Earth Orbit)
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MEO	Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit)
MLI	Çok Katmanlı Yalıtım Battaniyesi
NürFET	Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör
RADFET	Radiation Sensing Field Effect Transistor
SEE	Tekil Olay Etkileri (Single Event Effects)
SEP	Güneş Kaynaklı Enerjik Parçacıklar
TID	Toplam İyonize Doz (Total Ionizing Dose)
UART	Haberleşme protokolü (universal asynchronous receiver – transmitter)

1. GİRİŞ

Uzamsal boyutlarından en az birinin 1 nm ile 100 nm aralığında olduğu yapıların üretilmesi ve geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar nanoteknoloji olarak adlandırılmaktadır. Malzemeler, küçük boyutlarda yığın hallerine göre farklı (fonksiyonel) özellikler göstermektedir. Malzemelerin göstermiş olduğu bu özelliklerinden çeşitli alanlarda faydalanılmakta ve özellikle elektronik, kimya, enerji, savunma sanayi, medikal vb. uygulamalara yönelik olarak birçok teknolojik gelişme olmaktadır [1, 2]. Nanoteknoloji alanında yapılan çalışmalar ve yatırımlar sürekli olarak artmaktadır. Küresel çapta, 2000 yılında nanoteknoloji ile ilişkili ürünlerin pazar büyüklüğü yaklaşık 30 Milyar Amerikan Dolarıyken, 2008 yılında yaklaşık 200 Milyar Amerikan Dolarına ulaşmıştır. Nanoteknoloji ile alakalı ürünlerin Pazar büyüklüğünün 2020 yılı itibarıyla yaklaşık 3 Trilyon Amerikan Dolarına ulaşacağı öngörülmektedir [3, 4].

Malzemelerin nano boyutlarda, yığın hallerine göre fonksiyonel/farklı özellikler (fiziksel, optik, mekanik, elektronik, kimyasal ve manyetik) göstermelerinden ötürü, nanoteknoloji birçok alanda çok önemli avantajlar sunmaktadır. Nanoteknolojinin sunmuş olduğu birçok avantaj sadece laboratuvar ortamında değil artık gündelik hayatta da çok rahatlıkla görülebilmekte ve kullanılabilir. Daha küçük boyutlara sahip ve daha az enerji tüketen bileşenler ve cihazlar, çok daha fazla kapasiteli ve hızlı çalışan bilgisayarlar, daha hafif ve daha sağlam yapılar, yenilikçi biyomedikal yaklaşımlar/uygulamalar nanoteknolojinin insan hayatına katkıda bulunduğu alanlardan sadece bazılarıdır [5].

Küçük boyutlarda çalışabilmenin sunmuş olduğu avantajların en başında hiç kuşkusuz yarı iletken teknolojisi gelmektedir. Gelişen yarı iletken teknolojisi, küçük boyutlarda üretilen malzemelerin veya elektronik bileşenlerin boyutlarının sürekli daha da küçülmesini, daha az enerji tüketmesini ve daha fazla işlem kapasitesine sahip olmalarını sağlamaktadır. 1960'lı yıllardan günümüze dek olan sürede elektronik bileşenlerin en sık kullanılan örneklerinden olan transistörlerin de boyutları sürekli olarak küçülmektedir. Moore Yasası'na göre bir mikro işlemci/entegre devre (integrated circuit) içerisindeki transistör sayısı yaklaşık her 24 ayda bir 2 katına çıkmaktadır [6]. Hem transistör boyutlarının

küçülmesi hem de daha fazla transistör sayılarına ulaşılması entegre devrelerin daha hızlı ve daha küçük boyutlarda yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. 1960'lı yıllarda yaklaşık olarak 50 μm olan yarı iletken litografi işleme teknolojisi (semiconductor lithography processing technology), 2019 yılı itibarıyla ticari olarak yaklaşık 5 nm'ye ulaşmıştır. Boyutların küçülmesi birim alanda daha fazla transistör kullanılabilmesini, dolayısıyla bu durum da daha hızlı çalışan entegre devrelere sahip olmayı sağlamıştır. Yaklaşık olarak 50 μm 'den başlayıp 5 nm'ye ulaşan transistör teknolojisi boyutu (process node/technology node), transistörlerin içerisinde yer alan kapı/geçit (gate) uzunluğunu veya kaynak (source) ile akış/oluk (drain) arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. 2023 yılında bu mesafenin yaklaşık olarak 3 nm civarına ulaşacağı öngörülmektedir. 1970'lı yıllarda bir mikro işlemci (entegre devre) içerisinde yaklaşık olarak 2.250 transistör varken (Intel 4004), günümüz mikro işlemcilerinde (entegre devrelerdeki) transistör sayısı 10 milyarı (10^9) geçmiş durumdadır [7, 8].

Bu amaçla, bu doktora tezinde uydu/uzay uygulamalarına yönelik olarak kullanılacak, üzerinde nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi radyasyon sensörlerinin kullanıldığı bir radyasyon dedektörünün tasarımı, üretimi ve test edilmesi süreçleri gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, farklı oksit tabaka kalınlıklarına sahip (40 nm, 60 nm ve 100 nm) nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerin radyasyon altındaki performansları gerçek zamanlı olarak incelenmiştir. Maruz kalınan radyasyon dozunun ölçülebilmesini sağlayan kısımlar, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün içerisinde yer alan oksit tabaka kısımlarıdır. Sensörler radyasyona maruz kaldıkça, oksit tabakada meydana gelen (radyasyon sebebiyle oluşan) yükler, sensörün eşik (threshold) voltaj (gerilim) değerinin kaymasına neden olmaktadır. Maruz kalınan radyasyon dozu, eşik voltaj değerindeki kayma miktarı ile doğru orantılı olduğu için, eşik voltaj değerinin ölçülmesi ile maruz kalınan radyasyon doz seviyesi tespit edilebilmektedir. Deneyler sonunda, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi radyasyon sensörlerinin başarılı şekilde kullanıldığı bir radyasyon dedektörü üretilip verimli bir şekilde çalıştırılmıştır. Uzayda yer alan her türlü bileşen yoğun bir radyasyona maruz kalmaktadır dolayısıyla özellikle elektronik ekipmanlar için radyasyon dozunun tespiti ve takip edilmesi çok büyük önem arz etmektedir.

Elektronik ekipmanların uzayda maruz kalacakları radyasyon doz seviyeleri, uydu dış yüzey malzemesi ile ilişkilidir. Maruz kalınacak radyasyon doz seviyelerinin, uydu dış malzeme türüne (dış panellere) göre değişmesinden ötürü, farklı malzeme türleri ve farklı kalınlıklara göre, maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyelerinin belirlenmesi amacıyla radyasyon analizleri de bu tez kapsamında ayrıca gerçekleştirilmiştir. Dış panel malzemesi olarak uydu teknolojilerinde kullanılan veya kullanılabilir, polimetil metakrilat (PMMA), silisyum dioksit ($\text{SiO}_2\text{-}\alpha$ quartz cam), alüminyum (Al) ve kurşun (Pb) malzemeleri özelinde radyasyon simülasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu dört malzemenin, farklı kalınlıklarda (0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm) kullanıldığı kavramsal bir uydu modeli oluşturulmuştur. Bu uydu modeli üzerine, uydunun hem iç hem de dış yüzeyinde olacak şekilde silisyum nokta dedektörleri tanımlanmıştır/atanmıştır. Bu noktaların herbiri için radyasyon analizleri yapılarak maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyesi tespit edilmiştir. Bu analiz, bu tez kapsamında geliştirilen radyasyon dedektörünün, uydularda kullanılması durumunda, dedektörün maruz kalacağı radyasyon doz seviyesinin yaklaşık olarak tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Nanoteknoloji ve Uygulama Alanları

Nanoteknoloji, malzemelerin fiziksel, kimyasal, elektriksel, optik, mekanik ve manyetik özelliklerinin fonksiyonel amaçlarla birçok farklı şekilde kullanılabilmesini mümkün kıldığı için pek çok alanda yenilikçi fırsatlar sunmaktadır. Biyomedikal ve tıp, gıda, biyoteknoloji, tarım, havacılık ve uzay, elektronik ve bilgisayar, enerji ve çevre, tekstil, askeri vb. alanlar, bu fırsatlardan kuşkusuz en fazla faydalanan ve faydalanacak olan alanlar olmaktadır. Özellikle tıp, biyoloji, kimya ve biyoteknoloji uygulamalarda tespit, teşhis ve/veya tedavi gibi uygulamalar amacıyla kullanılan nano boyuttaki yapılar “nanosensör” olarak da tanımlanmaktadır [9].

Nanoteknolojinin sağlık ve tıp alanlarındaki uygulamaları genel olarak “nanotıp” adı altında toplanmaktadır. Bu amaçla halihazırda kullanılan klasik yöntemlerle tespiti, teşhisi ve/veya tedavisi mümkün olmayan hastalıklar için nanoteknolojinin sunmuş olduğu avantajlar umut vadetmektedir. İlaç ve gen taşıyımını, tespit ve teşhis/tanı, yara ve anti-bakteriyel tedaviler, hücre ve DNA tedavisi/yenilenmesi vb. alanlarda nano boyuttaki malzemelerin sunmuş olduğu olanaklardan faydalanarak çeşitli çalışmalar ve uygulamalar yapılmaktadır [10, 11].

Nanoteknoloji gıda endüstrisi için de, gıdanın nasıl büyütüleceğinden, nasıl paketleneyeceğine kadar birçok farklı alanda çeşitli olanaklar sunmaktadır. Nanoparçacıkların fonksiyonel özellikleri sayesinde kaplama ve ambalajlar daha hafif olabilmektedir. Paketlerin içerisinde kullanılacak nanoparçacıklar sayesinde bakterilerin çoğalmasının ve yaşamasının önüne geçilebilecektir veya paketlemede kullanılacak nanoparçacıklar ile, gıdaların bozulması ve kuruması gibi sorunlar ortadan kalkabilecektir [12, 13].

Nanoteknoloji enerji sektörü için de birçok olanak sunmaktadır. Bunlar, batarya (pil), yakıt hücreleri, güneş hücreleri ve yakıt olmak üzere 4 ana başlık altında incelenebilir. Yakıt hücrelerinde katalizör olarak nanoparçacıklar kullanılmaktadır ve bu da maliyetlerin azalmasını sağlamaktadır. Standart bataryalarda (pillerde) kullanılan elektrotların nanoparçacıklar ile kaplanmış halleri, pillerin daha hafif, daha uzun ömürlü ve daha hızlı şarj olmasını sağlamaktadır. Pillerin uç kısımlarında nanotüplerin kullanılması dendrit yapıların oluşumunu engellemekte

ve bu sayede pillerin daha yüksek kapasiteli ve daha hızlı şarj edilebilir olması sağlanmaktadır. Ayrıca silisyumla kaplanmış karbon nanotüpler, grafen kafesli silisyum nanoparçacıklar, azot ile katkılanmış karbon nanotüpler pillerin hem daha fazla kapasiteli hem de daha uzun süre kullanılabilir olmasını sağlamaktadır., Karbon nanofiberlerin kullanımı sayesinde klasik lityum-iyon pillerin 4 kata kadar daha fazla kapasiteye sahip olmaları sağlanmıştır. Yakıt hücrelerindeki iyon geçişlerinde kullanılan membranlar nanoteknoloji sayesinde daha verimli ve kullanışlı hale gelmektedir. Katalizör olarak platinin kullanımı oldukça yaygındır ve platin kullanımı maliyetin çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Grafen ile kaplanmış kobalt nanoparçacıkları platinin yerini almakta ve böylelikle maliyetlerin azalması hedeflenmektedir [14]. Nanoteknoloji, güneş hücrelerinin üretim maliyetinin düşmesini sağlamaktadır. Katı kristal güneş hücreleri ve panelleri yerine eğilip-bükülebilen, ince film tabanlı paneller daha düşük maliyetlerle üretilebilecektir. Kuantum noktaların kullanımı ile birlikte daha düşük maliyetle üretilmiş daha verimli hücreler elde edilebilecektir. Titanyum dioksit nanotüp gibi nano malzemeler hem maliyetlerin düşmesini hem de hücrelerden alınan verimin artmasını sağlayacaktır. Ek olarak, morötesi ışınları daha fazla emebilen (absorbe eden) gümüş nanoteller ve titanyum dioksit gibi nanoparçacıklar, görünür ışık bölgesinde saydamlık sağlaması sebebiyle cam/pencere malzemelerinin içerisinde kullanılması da mümkün olmaktadır [15]. Nanoteknoloji yakıtlardan daha verimli şekilde ve daha fazla faydalanabilmeyi, motorların daha uzun süreli şekilde işletebilmeyi ve hammaddeden daha verimli bir şekilde yakıt elde edebilmeyi mümkün kılmaktadır. Fonksiyonel hale getirilmiş nanoparçacıklar daha verimli yakıtlara sahip olmayı sağlamaktadırlar [16].

Nanoteknolojinin tekstil sektörü için de umut vaat eden uygulamaları bulunmaktadır. Bunlar, suyu tutmayan ve kirlenmeye karşı dayanıklı kumaşlar, nano gözenekli yapıları sayesinde ısı izolasyonu sağlayan ayakkabılar, gümüş nanoparçacıklar sayesinde bakterileri öldürebilen kumaşlar olarak sıralanabilir. Ek olarak, çeşitli kimyasallara karşı dayanıklı, güneş hücresi özelliğine sahip, enerji üretip depolayabilen kıyafetlerin/kumaşların üretilmesi de mümkün olabilecektir [17 – 19].

Hava ve suyu arıtma/temizleme amacıyla filtre görevi görece nanomalzemeler, nanoteknolojinin sunmuş olduğu bir diğer avantaj ve uygulama alanıdır. Havayı

daha temiz bir hale getirmek amacıyla, temizleme veya filtreleme işlemlerinde kullanılacak nanoparçacıklar, karbon dioksiti hapseden nano gözenekli kristal yapıya sahip malzemeler, sigaradan ortaya çıkan azot oksit dumanını/gazını tutan malzemeler geliştirilmekte ve üretilmektedir. Suyu arıtma ve kalitesini arttırmaya yönelik olarak ise, ağır metalleri ve yağı temizleyebilen filtreler, karbon dioksiti sudan temizlemek amacıyla enzimle fonksiyonelleştirilmiş nanomalzemeler geliştirilmekte ve üretilmektedir [20, 21].

Nanoteknoloji kimyasal ve biyolojik sensörlerin de gelişimine katkıda bulunmaktadır. Fonksiyonelleştirilmiş nanoyapılar/nanoparçacıklar çok küçük miktardaki kimyasal veya biyolojik içerikleri tespit edebilmektedirler. Birkaç gaz molekülü bile nanotıp, nanotel ve nanoparçacıklar gibi nano boyuttaki yapılar ile çok rahatlıkla tespit edilebilmektedirler. Tespit mekanizması, moleküllerin nano boyuttaki malzemelerle etkileşime girdiklerinde malzemelerin elektriksel karakteristiklerini değiştirmelerine dayanmaktadır. Özellikle güvenlik uygulamalarına yönelik olarak kullanılabilir bu sensörler, uyuşturucu ve patlayıcıların tespitinde kullanılabilir. Karbon nanotüpler ile patlayıcıların tespiti yapılabilmektedir. Buna ek olarak, kandaki azot oksit seviyesinin tespiti de karbon nanotüpler ile yapılabilmektedir. Kandaki azot oksit seviyesinin iltihaplanma ile ilişkili olması sebebiyle tespiti önem arz etmektedir [22 – 25].

Nanoteknoloji uzay uygulamalarına yönelik olarak umut vaat eden imkanlar sunmaktadır. Karbon nanotüplerin kullanımı, malzemeleri hem daha hafif hem de daha sağlam hale getirdiği için hem fırlatma masrafları düşecek hem de mukavemeti daha yüksek uzay araçlarına sahip olma yeteneği kazanılacaktır. İçerisinde biyo-nano robotların olduğu uzay kıyafetleri sayesinde astronotların hem uzay çevre koşullarından en az şekilde etkilenmesi hem de olası bir tehlike durumunda bu robotların astronotları uarması ve çeşitli etkilere karşı korumaları mümkün olabilecektir. Uzay ortamında sürtünmenin olmaması ve düşük yer çekimi sebebiyle, hareket kabiliyeti "iticiler" sayesinde olmaktadır. Mikro elektromekanik sistemler (MEMS) aygıtları ile nanoparçacıkların püskürtülerek itici olarak kullanıldığı sistemler uzay araçları için ek bir kabiliyet yeteneği sunmaktadır. Böylelikle iticilerin hem daha uzun ömürlü olması hem de daha düşük maliyetle üretilebilmesi sağlanacaktır. İçerisinde karbon nanotüplerin kullanıldığı güneş yelkenleri sayesinde, güneş ışığıyla hareket edebilen uzay

araçlarındaki hayati öneme sahip sistemlerin ve durumların nanosensörler sayesinde incelenmesi hedeflenmektedir [26, 27].

Nanoteknolojinin elektronik uygulamalarına yönelik olarak birçok örneği bulunmaktadır. Gelişen malzeme ve üretim teknolojileri sayesinde elektronik bileşenlerin performanslarının artması ile birlikte hem daha hafif hem de daha az enerji tüketen sistemleri üretmek mümkün olmaktadır. Mikroişlemciler içerisinde kullanılan transistör boyutlarının sürekli olarak küçülmesiyle aynı hacimde daha fazla işlem yapabilme kabiliyetinin artması bunlara örnek olarak verilebilir. Bu sayede daha hafif, daha ince, daha az güç tüketen elektronik bileşenler yapmak mümkün olmaktadır. Kadmiyum selenür nano kristallerin kullanıldığı eğilip/bükülebilen elektronik devreler, optik performansı arttıran nano parçacıkların kullanıldığı entegre devreler, daha az güç tüketen nano miktanılar, nanoparçacıkların kullanıldığı baskı devre kartları, daha küçük boyutlarda üretim yapılabilmesini sağlayan transistörler, uzay ortamı gibi zorlayıcı stres koşullarına dayanıklı nanoparçacıkların kullanıldığı elektronik bileşenler, nanoparçacıkların kullanıldığı daha ince, daha dayanıklı ve eğilip bükülebilen elektronik paneller/ekranlar, organik moleküller ile beraber altın nanoparçacıkların kullanıldığı yeni nesil transistörler vb., nano boyuttaki malzemeler sayesinde üretilen elektronik bileşenlere/ürünlere örnek olarak verilebilir [28 – 31].

2.2. Nanofabrikasyon Üretim Teknikleri

Nano veya mikro boyutta üretim aşamasında birçok farklı üretim tekniğinden faydalanılmaktadır. Bu tekniklerin belirli defalar tekrarlanarak uygulanmasıyla küçük boyutlarda yapılar/bileşenler yapılabilmektedir. Bu teknikler, levhanın temizlenmesi (wafer cleaning), kullanılan fotorezistin UV ışık ile işlenmesi (fotolitografi), katman büyütme veya p/n kanallarını katkılama için katkılama işlemleri (doping), katman aşındırma veya kanal açmak için aşındırma (etching) işlemleri şeklinde özetlenebilir [32].

2.2.1. Levhanın Temizlenmesi

Üretim süreci, ilk olarak kullanılacak olan levhanın (wafer) temizlenmesi ile başlamaktadır. Levha temizleme (cleaning) işleminin amacı, mikro/nano boyutta hataya veya istenmeyen bir yapıya sebep olabilecek, levha üzerinde herhangi bir kalıntının olmamasını sağlamaktır. Bu amaçla, levha üretim döngüsü öncesi

temizlenir. Temizleme işlemi, kullanılan temizleyiciye göre kuru temizleme (dry cleaning) veya ıslak temizleme (wet cleaning) olarak yapılabilmektedir. Kuru temizleme, oksijen ve argon plazma ortamlarında istenilmeyen yüzeylerin veya yapıların kaldırılması işlemidir. Islak temizleme ise, H_2O : H_2O_2 : NH_4OH , $H_2O:H_2O_2:HCl$, $DI-H_2O:HF$ gibi çözeltiler ile levha üzerinde kalan organik, iyonik ve metalik kalıntıların temizlenmesi işlemidir [33].

2.2.2. Fotolitografi

Üretim sürecinin bir sonraki basamağı olarak fotolitografi gelmektedir. Fotolitografi levhanın/malzemenin ışığa duyarlı bir malzeme ile ince film şeklinde kaplanması, ardından levhanın maske aracılığıyla morötesi (UV) ışığa maruz bırakılması ve böylelikle levha üzerinde belirli desenlerin oluşturulmasıdır. Fotorezistin malzeme türüne göre, UV ışığa maruz kalan kısım yüzeyde kalmıyorsa (yok oluyorsa veya yapısı bozuluyorsa) pozitif fotorezist, UV ışığa maruz kalan kısım yüzeyde kalıyorsa negatif fotorezist olarak adlandırılmaktadır. Fotolitografi basamağında istenilen şekilde yapıların oluşturulması ve işlenmesi ile ilgili bölgelerde katman büyütme/katkılama gibi işlemler yapılabilmektedir [34].

2.2.3. Katman Büyütme/Katkılama

Üretim basamağının bir diğer adımı olarak katman büyütme/katkılama (deposition/growth) işlemi gelmektedir. Bu basamakta, yarı iletken, yalıtkan (dielektrik) ve metal kontak alma amacıyla ilgili katmanlar oluşturulur. Katman katkılama veya büyütme işlemleri, fiziksel ve kimyasal reaksiyonlara göre iki grupta incelenebilir. Fiziksel reaksiyonlar sonucu malzeme büyütmesi yapılan teknikler, fiziksel buhar biriktirme olarak adlandırılmaktadır. Püskürtme (sputtering) ve buharlaştırma (evaporation) gibi teknikler fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinin en sık kullanılan çeşitlerindedir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu malzeme büyütme yapılan teknikleri, kimyasal buhar biriktirme, epitaksi (epitaxy) ve termal oksidasyon (thermal oxidation) şeklinde sıralanabilir. Düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme, (plazma çoğaltmalı) kimyasal buhar biriktirme bu tekniğin en sık kullanılan çeşitlerindedir [35].

2.2.4. Aşındırma

Üretim basamaklarının bir diğeri ise aşındırma (etching) işlemidir. Aşındırma işlemleri kuru (dry) ve ıslak (wet) aşındırma olarak iki gruba ayrılır. Kuru aşındırma (dry etching) olarak plazma aşındırması (plasma etching), reaktif iyon aşındırması (reactive ion etching-RIE) ve derin reaktif iyon aşındırması (deep reactive ion etching-DRIE) gibi teknikler kullanılmaktadır. Islak aşındırma (wet etching) işlemleri ise kimyasal solüsyonlar kullanılarak yapılan aşındırma işlemidir [36, 37].

2.3. Radyasyon Sensörleri/Dedektörleri

Radyoaktivitenin varlığı 1896 yılında ünlü Fransız Fizikçi Henri Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Becquerel, o tarihte radyoaktivitenin varlığını radyasyona duyarlı cam levhalar sayesinde keşfetmiştir [38]. Günümüzde artık bu cam levhalar yerine radyasyona (ışığa) duyarlı filmler kullanılmaktadır. Radyasyonun varlığı bu levhalar veya filmler sayesinde tespit edilebildiği için, bu levhaların veya filmlerin bir nevi radyasyon dedektörü olduğunu söylemek de mümkündür. Radyasyona duyarlı bu filmlerden gündelik uygulamalarda (hastanelerde Röntgen çektirirken veya parçacık hızlandırıcı laboratuvarlarında) hala faydalanılmaktadır. Radyasyonun veya radyoaktivitenin varlığı bu gibi filmler ile ispatlanabilir fakat kaynakların sayısal olarak ne düzeyde radyasyona sahip oldukları hakkında çok detaylı bilgi vermemektedirler. Bu sebeple, farklı amaçlar için ve farklı yaklaşımlarla üretilmiş olan radyasyon dedektörleri geliştirilmiştir. Radyasyon dedektörleri, beş (5) ana başlık altında incelenebilir. Bunlar, gaz doldurulmuş dedektörler (gas-filled detectors), ışıldama/parıldama (sintilasyon) dedektörleri (scintillation detectors), termoluminesans dedektörleri (thermoluminescent detectors), fotografik film dedektörleri (photographic films) ve katı hal/yarı iletken dedektörleri (solid state/semiconductor detectors) olarak sıralanabilir [39 – 41].

Gaz doldurulmuş dedektörlerin çalışma prensibi, içi gaz dolu (genellikle hava, argon, helyum vb. gazlar) olan bir kabın radyasyona maruz kaldığında, gaz içerisinde meydana gelen iyonik değişimlerin tespit edilmesi mantığına dayanır. Temel olarak, radyasyon gaz içerisinde geçerken iyon (+ yüklü) ve elektron (- yüklü) çiftleri oluşturur. Oluşan bu yükler iyonizasyon akımı denilen bir akım

oluşturur ve bu akımın büyüklüğü maruz kalınan radyasyon ile orantılıdır. Gaz doldurulmuş dedektörler, iyonlaşma haznesi/odası (ionization chamber), orantılı sayaçlar (proportional counters) ve Gieger-Müller dedektörleri olmak üzere üç (3) alt başlıkta incelenebilir. İyonlaşma haznesi/odası tipi dedektörler içerisinde genellikle gaz olarak hava bulunur. Radyasyon, gazın bulunduğu hazneden geçerken iyonlaştırma akımı yaratır ve bu akım direkt olarak maruz kalınan dozun ölçülmesini mümkün kılar. Orantılı sayaçlar tipi dedektörler ise, iyonlaşma haznesi/odası tipi dedektörlere göre daha yüksek voltaj altında çalışır. Alfa ve beta parçacık radyasyonunun ayrı ayrı tespit edilebilmesini sağlar. Gieger-Müller tipi dedektörler ise daha yüksek voltaj altında çalışan aslında iyonlaşma hazneleri/odalarıdır. Düşük enerjili X ve gama ışınları ve iyonlaşma enerjisi az olan yüklü parçacıkların tespitinde kullanılır fakat parçacık tipi ve yoğunluğu hakkında ayrıntılı bilgi sağlamaz [42 – 44].

Işıldama/parıldama dedektörlerin çalışma prensibi, malzemelerin radyasyona maruz kaldıklarında yaydıkları ışığın tespitine dayanır. Radyasyona maruz kaldığında radyasyon ile orantılı olarak ışık yayabilen malzemeler, radyasyonun tipi ve yoğunluğuna göre ışık yayar. Bu ışık, foto çoğaltıcı tüpler ile (photomultiplier tube) beraber algılanır ve bu şekilde radyasyon miktarının ölçülmesi mümkün olur. Işık yayan malzemeler katı veya sıvı halde bulunabilir. Işık yayan malzeme katı ise, fotonlar (ışık) için tüm enerji dağılımı (spektrumu), alfa parçacıklarının da varlığı tespit edilebilir. Işık yayan malzeme sıvı ise düşük enerjili beta ve gama ışınları tespit edilebilir [45].

Termoluminesant dedektörlerin çalışma prensibi, dedektörün içerisinde yer alan kristalin, ısındığında ışık yayması prensibine dayanır. Radyasyon, dedektörün kristalinden geçerken elektronları uyarır ve uyarılmış hale (excited state) geçmelerine sebep olur. İçerisinde uyarılmış halde elektronlar bulunduğu kristal ısıtılır ve elektronlar tekrar normal hale dönerlerken ışık yayar. Foto çoğaltıcı tüpler sayesinde ortaya çıkan bu ışınlar toplanır (sayılır) ve maruz kalınan radyasyon tespit edilir. Bu dedektörün diğer detektörlerin çalışma prensiplerinden farklı olan kısmı sürecin ısı uyarımı ile başlamasıdır. Radyasyon ortamında çalışan kişiler ve radyoaktif kaynaklara sahip tesisler özelinde bu dedektörler sıklıkla kullanılmaktadır [46].

Fotografik filmlerin (dedektörlerin) çalışma prensibi, radyasyona hassas film tabakasının radyasyona maruz kaldığında, üzerinde oluşturduğu izlerin incelenmesi veya tespit edilmesi mantığına dayanır. Radyasyon, film içerisinde yer alan gümüş bromür'ün kristal yapısını bozarak/değiştirerek, kristal yapı üzerinde iz bırakır. Bu izler de film yıkandığında (banyo edildiğinde), film üzerinde kararma olarak görülebilmektedir. Fotografik filmler ile genellikle alfa ve beta parçacıkları, gama ışınları tespit edilebilir [47].

Katı hal veya yarı iletken tipi radyasyon dedektörleri, radyasyona hassas olan bölgenin (veya radyasyonun ölçülmesini sağlayan bölgenin) yarı iletken tabanlı olması sebebiyle bu şekilde adlandırılmıştır. Yarı iletken katman olarak genellikle (silisyum-Si) ya da germanyum (Ge) tabanlı malzemeler kullanılmaktadır. Bu katmanlar (radyasyona hassas olan kısımlar), radyasyona maruz kaldığında yarı iletken katman içerisinde elektron-boşluk (electron-hole) çiftleri oluşur ve bu elektrik akımına sebep olur. Oluşan bu elektrik akımı maruz kalınan radyasyonla orantılı olduğundan, yarı iletken kısımda meydana gelen bu değişikliklerin kontrolü veya incelenmesi, maruz kalınan radyasyonun tespitini mümkün kılar [48].

Nanoteknoloji bu 5 ana başlık altında toplanmış olan radyasyon dedektörlerinin her biri için potansiyel olanaklar sunmaktadır. Bu dedektörlerin, radyasyonu algılamak veya ölçerken kullandıkları radyasyona hassas kısımlar, gelişen malzeme ve üretim teknolojisi sayesinde sürekli daha iyi ve daha verimli hale gelmektedir. Bu sebeple, nanoteknoloji radyasyon dedektörleri özelinde de çok önemli olanaklar sunmaktadır. Bu olanakların kullanıldığı teknikler ile üretilen sensörlerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik açılardan çözünürlük ve tespit performansları çok daha iyi bir hale gelmektedir. Nanoteknolojinin sunduğu ve vadettiği olanak ve gelişmelere rağmen nano boyuttaki malzemelerin çevre, canlı ve insan sağlığı üzerine etkileri ise hala araştırılmaktadır [49].

2.3.1. Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör Yapısı ve Çalışma Prensipleri

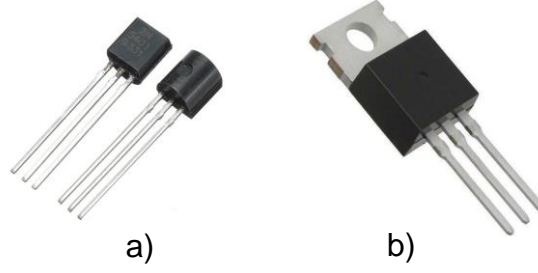
MOSFET, metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (metal oxide semiconductor field effect transistor) olarak adlandırılan, oksit tabakaya sahip alan etkili transistördür (field effect transistor – FET). Metal oksit yarı iletken alan etkili

transistörler işlevsel olarak elektronik devrelerde genellikle anahtarlama (kapatma/açma) veya devredeki gücü düzenleme/ayarlama (regüle etme) gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Metal oksit yarı iletken alan etkili transistörlerin çalışma prensibini anlamak için öncelikle alan etkili transistörün çalışma prensibine bakmak gerekir. Alan etkili transistörü kavramı ilk defa 1925 yılında Fizikçi Julius Edgar Lilienfeld tarafından ortaya atılmıştır. İlk ortaya çıktığı yıllarda istenilen işlevselliği/performansı tam olarak sağlayamasa da yarı iletken teknolojisinin elektronik bileşen bazındaki ilk örneklerinden olması açısından oldukça önem arz etmektedir. Transistörlerin çalışma mantığı ilk olarak Bell Laboratuvarlarında çalışan Fizikçi William Shockley ve çalışma arkadaşları John Bardeen ve Walter Brattain tarafından 1940'lı yıllarda araştırılmış ve açıklanmaya çalışılmıştır. 1947 yılında transistörlerin ilk örneklerinden olarak da tanımlanabilecek olan "nokta temaslı transistörleri (point-contact transistors)", 1948 yılında ise BJT olarak adlandırılan çift kutup yüzeyli transistörleri (bipolar junction transistors) icat etmiştir. Bu çalışmalar kapsamında, Shockley ve arkadaşları 1956 yılında Fizik alanında Nobel ödülüne layık görülmüşlerdir. 1945 yılında ise Alman Fizikçi Heinrich Welker tarafından, ilk alan etkili transistör olarak tanımlanabilecek Bağlantı Alan Etkili Transistör (junction field-effect transistor (JFET)) icat edilmiştir [50].



Şekil 2.1. a) n tipi alan etkili transistör, b) p tipi alan etkili transistör [51]

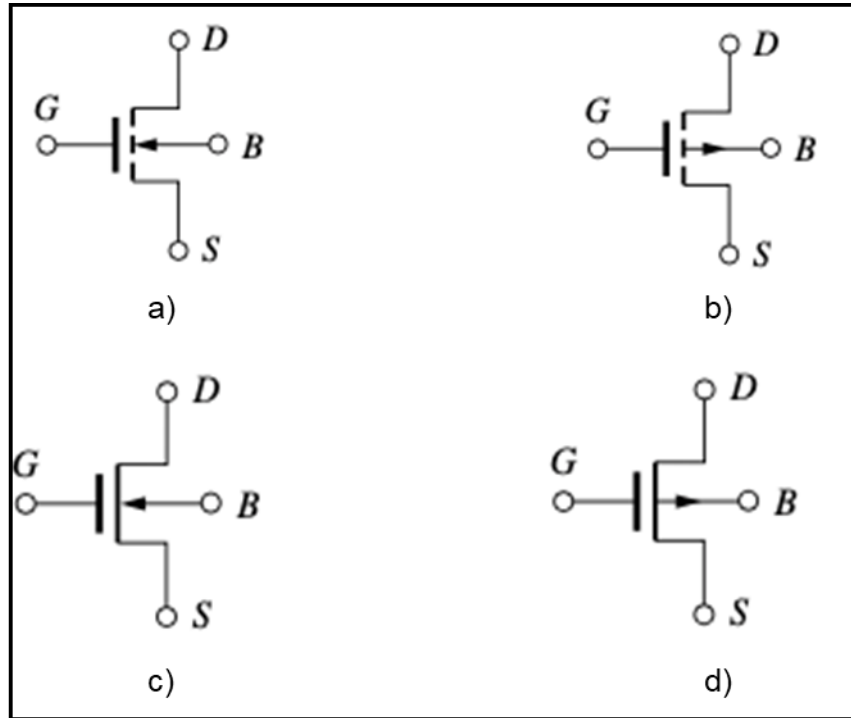
Çift kutup yüzeyli transistörler akım ile çalışırken, alan etkili transistörler uygulanan gerilimin (voltajın) oluşturduğu elektrik alanı sayesinde çalışmaktadır.



Şekil 2.2. a) çift kutup yüzeyli transistör, b) metal oksit yarı iletken alan etkili transistör [52, 53]

Alan etkili transistör gate (kapı), drain (akaç, kanal) ve source (kaynak) olmak üzere 3 ucu/ayağı bulunan devre elemanıdır. Alan etkili transistörün, çift kutup yüzeyli transistöre göre gürültü oranı (noise) daha düşüktür ve ısıya karşı daha kararlı bir yapıya sahiptirler. [54, 55].

Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör ise, alan etkili transistörün kapı (gate) olarak adlandırılan kısmı üzerinde oksit tabaka olmasından dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır. MOSFET'ler 1959 yılında Mohamed Atalla ve Dawon Kahng tarafından icat edilmiştir.

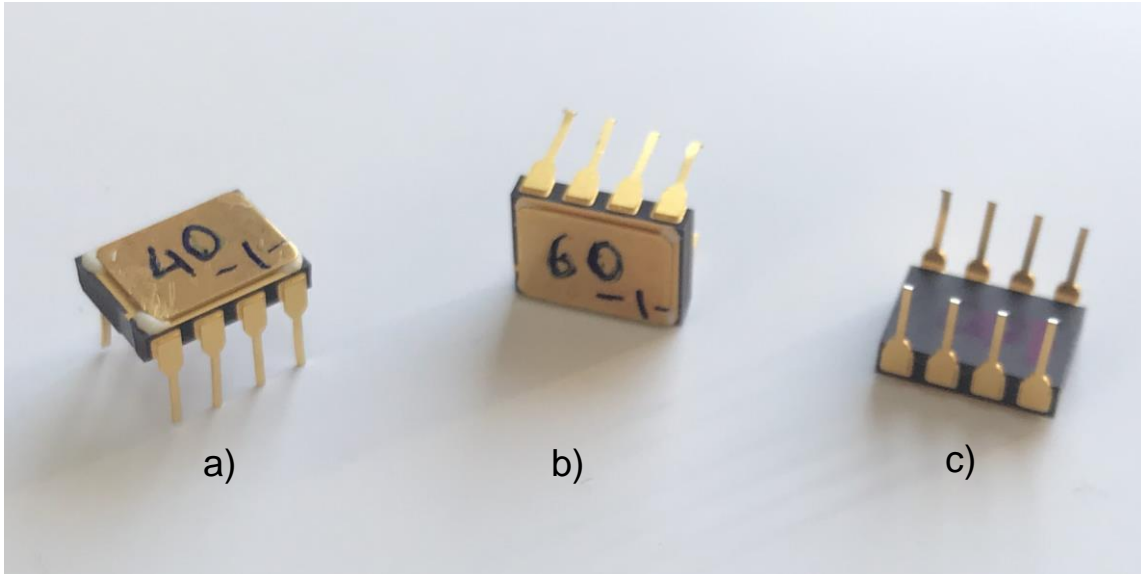


Şekil 2.3. a) n-tipi çoğalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı, b) p-tipi çoğalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı, c) n-tipi azalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı, d) p-tipi azalan metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısı [56]

Azalan (depletion) ve çoğalan (enhancement) olmak üzere 2 farklı tip metal oksit yarı iletken alan etkili transistör vardır. Kapı ucuna pozitif voltaj uygulandığında, drain ve source uçları arasından geçen akım artarken, negatif voltaj uygulandığında akım azalır. Azalan tip metal oksit yarı iletken alan etkili transistörlerin drain ve source uçları arasında bağlantı vardır ve bu sebeple gate ucuna voltaj uygulanmasa bile, drain ve source uçları arasında bir miktar elektron akışı (akım) olur. Çoğalan tip metal oksit yarı iletken alan etkili transistörün azalan tip metal oksit yarı iletken alan etkili transistörden farkı drain ve source uçları arasında bağlantı olmamasıdır. Kapı ucuna voltaj uygulandığında drain ve source uçları arasında doğal bir kanal oluşur ve akım akmaya başlar. Dolayısıyla drain-source akımı, gate ucuna uygulanan voltaj ile kontrol edilebilir [54 – 56].

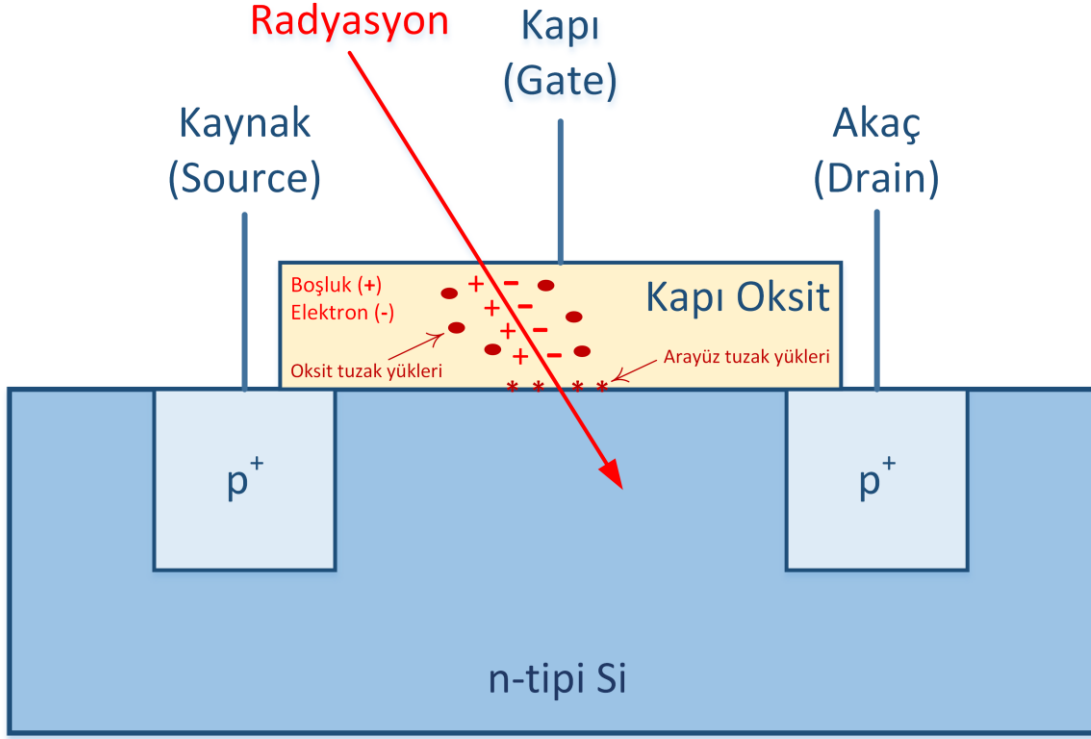
2.3.2. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör ve Çalışma Prensipleri

P-kanallı bir metal oksit yarı iletken alan etkili transistör olan ve nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör olarak adlandırılan radyasyon sensörleri, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nde bulunan nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (NÜRDAM) üretilmektedir. Türkiye'de üretilen, uzay uygulamalarına yönelik olarak da kullanılabilen ilk sensör olması açısından nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörler oldukça önem arz etmektedir.



Şekil 2.4. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin a) üstten, b) yandan ve c) alttan görüntüsü

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin çalışma prensibi p-kanallı metal oksit yarı iletken alan etkili transistörler ile aynıdır. Bu doktora tezinde, maruz kalınan radyasyon dozunun ölçülebilmesini sağlayan oksit tabakalar/katmanlar 40 nm, 60 nm ve 100 nm şeklinde farklı kalınlıklar ile üretilmiş ve radyasyon altındaki performansları ölçülmüştür.



Şekil 2.5. Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör yapısında radyasyon sebebiyle oluşan yükler

Sensör radyasyona maruz kaldığında oksit tabakada yük oluşumuna/birikimine sebep olur. Bu yük birikimi sensörün eşik voltajında kaymaya sebep olur. Eşik voltajdaki bu kayma maruz kalınan radyasyon ile orantılı olduğu için, voltaj kaymasının ölçülmesiyle maruz kalınan radyasyon dozu tespit edilebilmektedir [57 – 62].

2.4. Uydu Teknolojileri

Uydu/uzay teknolojilerinin başlangıç tarihi 1957 yılında Sovyetler Birliği'nin, dünyanın etrafını yaklaşık 90 dakikada turlayan Sputnik 1 adındaki uyduyu uzaya göndermesi olarak kabul edilmektedir. Sputnik 1 üzerinde bulunan radyo vericileri sayesinde radyo dalgaları yaymakta ve radyo dalgaları uydunun geçtiği bölgelerden algılanabilmekteydi [63].

Amerika Birleşik Devletleri 1958 yılında ilk uydusunu Explorer-1'i uzay fırlattı. Bu uydunun aslında işlevsellik bakımından (üzerinde bulundurduğu faydalı yükler sayesinde) Sputnik-1'den çok daha üstündü. Explorer-1 uydusu, kozmik ışın (radyasyon) ölçer, iç ve dış ortamdaki sıcaklığı ölçmek için sıcaklık sensörleri ve mikrometeoritlerin etkilerini ölçmek amacıyla kullanılan ekipmanları içermekteydi. Explorer-1'in üzerinde taşıdığı ölçüm ekipmanları sayesinde uzay ortamı hakkında ilk defa bilgi sağlamıştı [64].

Uyduların sahip oldukları teknoloji günümüzde artık çok daha ileri düzeydedir. Uydular artık daha güvenilir ve daha sistematik bir şekilde üretilmektedir. Uydular temel olarak faydalı yük (payload) ve faydalı yükün istenilen şekilde çalışabilmesini sağlayacak olan alt sistemlerden oluşmaktadır. Bir uydudan beklenen görev (hizmet amacı), uydunun faydalı yükünü ve bu faydalı yükün istenilen şekilde çalışmasını sağlayacak alt sistemleri belirlemektedir.

Uydu faydalı yükleri uydu kamerası, haberleşme antenleri, ölçüm ve analiz aygıtları gibi uydunun asıl görevini yerine getirmesini sağlayan ekipmanlardır. Uydu, yer gözlem (görüntüleme) uydusu ise faydalı yük kamera veya uydu, haberleşme uydusu ise faydalı yük antenler olmaktadır. Bunlara ek olarak, spektografik, kimyasal, manyetik, radar veya radyasyon analizi ve ölçümü yapabilen ekipmanlar da faydalı yük olarak değerlendirilmektedir. Faydalı yükün, uydu alt sistemleri ile uyumlu bir şekilde çalışması uydudan beklenen görevin yerine getirilmesi için çok önemlidir.

Uydu temel olarak, güç, yörünge ve yönelim kontrol, ısı, yapısal, uçuş bilgisayar, elektriksel/kimyasal itki ve haberleşme alt sistemlerinden oluşmaktadır. Bu alt sistemlerin her birinin istenilen bir şekilde çalışması uydunun kendisinden beklenen görevi gerçekleştirmesi için çok önemlidir.

Güç alt sistemi uydunun ihtiyaç duyduğu gücü sağlar. Bu gücü genellikle güneş panelleri aracılığıyla sağlar. Güneş panellerine ek olarak olarak, nükleer reaktörlere sahip uzay araçları da mevcuttur. Güneş'ten veya nükleer reaksiyonlar sonucu elde edilen güç uyduda yer alan pillerde depolanır.

Yörünge ve yönelim kontrol alt sistemi, uydu yörüngesinin ve yöneliminin istenilen şekilde olmasını sağlar. Yörünge ve yönelim kontrol alt sistemi yıldız izler, güneş algılayıcı, manyetometre, tork çubuğu ve tepki tekeri gibi ekipmanlardan oluşur.

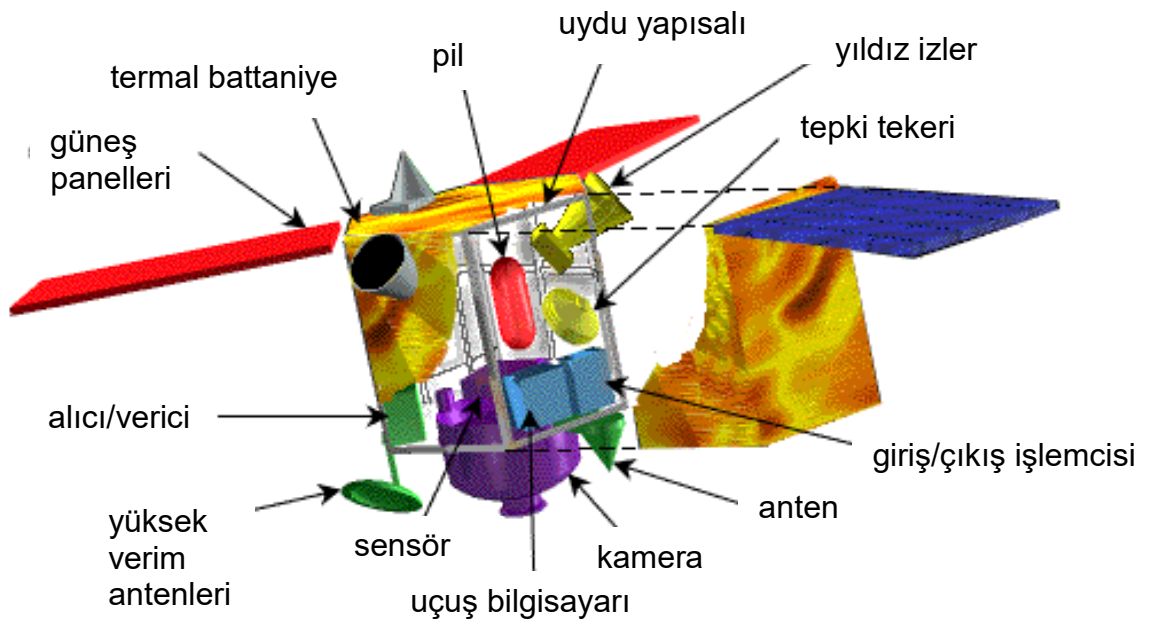
Isıl kontrol alt sistemi uydunun ısıl dengesini sağlar. Uzayda sıcaklıkların çok yüksek veya çok düşük seviyelerde olabilmesi uydular için tehdit oluşturmaktadır. Bu sebeple, ısıl dengenin sağlanması uydunun istenilen şekilde çalışabilmesi için çok önemlidir. Isıl kontrol alt sistemi, ısıtıcı, radyatör ve çok katmanlı yalıtım battaniyesi gibi bileşenlerden (multi layer insulator – MLI) oluşmaktadır.

Yapısal alt sistem uydunun yapısal bütünlüğünün sağlanmasından sorumludur. Uydu yüksek irtifalara çıkarken titreşim ve şok gibi yüksek mekanik streslere maruz kalmaktadır. Uydu tasarımının bu gibi streslere dayanacak şekilde tasarlanması yapısal bütünlüğün korunması adına çok büyük önem arz etmektedir.

Uçuş bilgisayarı, uydudaki tüm işlemlerin kontrol edilmesinden sorumludur.

Elektriksel/kimyasal itki alt sistemi uydunun hareket edebilmesini sağlayan alt sistemdir. Uydu, elektriksel veya kimyasal tabanlı itkiler sayesinde püskürtme yaparak hareket edebilir. Maliyeti sebebiyle bu alt sistem her uyduda kullanılmayabilir.

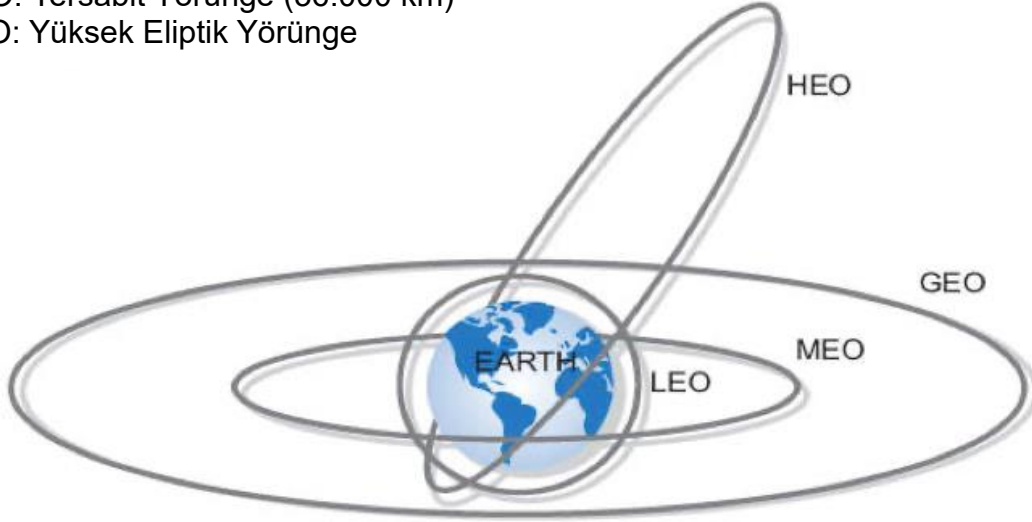
Haberleşme alt sistemi, uydunun yer istasyonu ile haberleşmesini sağlar. Bu alt sistem sayesinde uydunun aldığı veriler yer istasyonuna indirilir ve uyduya istenilen komutlar gönderilir.



Şekil 2.6. Uydu alt sistemleri [65]

Uydular farklı amaçlar doğrultusunda farklı yörüngelerde çalışabilmektedir. Bunu belirleyen en önemli faktör uydunun görevidir. Temel olarak, Dünya etrafındaki yörüngeleri, alçak dünya yörüngesi, orta dünya yörüngesi, yer sabit yörünge ve yüksek eliptik yörünge) olarak 4 ana başlık altında toplamak mümkündür.

LEO: Alçak Dünya Yörüngesi (100 – 1500 km)
MEO: Orta Dünya Yörüngesi (5000 – 10.000 km)
GEO: Yersabit Yörünge (36.000 km)
HEO: Yüksek Eliptik Yörünge

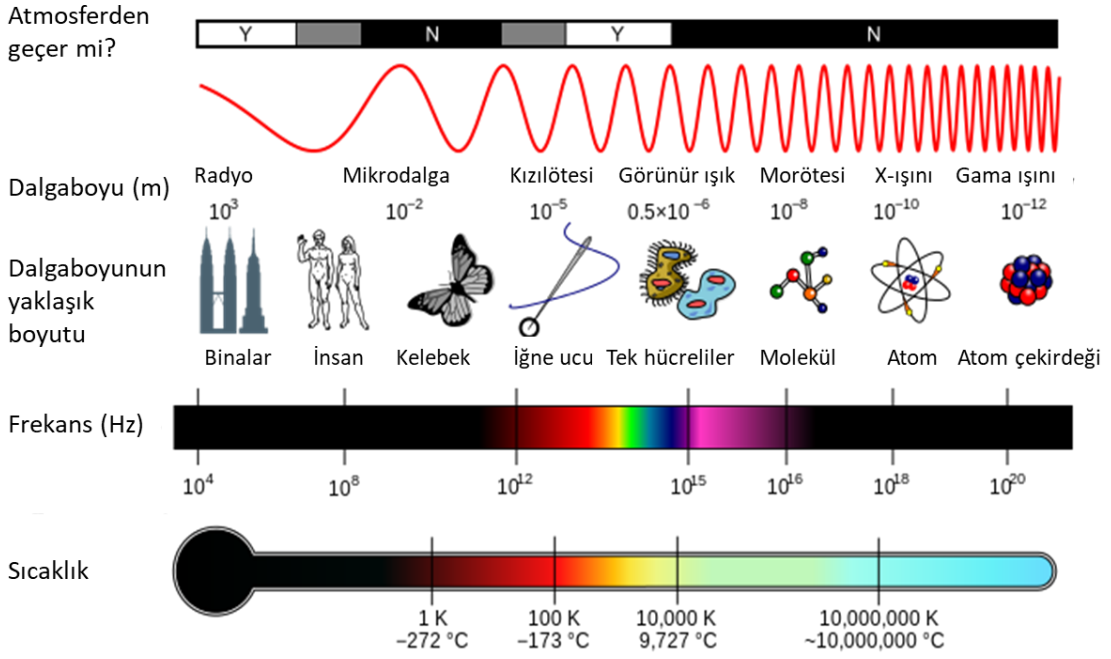


Şekil 2.7. Uydu yörüngeleri [66]

Alçak dünya yörüngesine genellikle fotoğraf ve video çekme amacıyla görüntüleme uyduları gönderilmektedir. Yaklaşık olarak 2.000 km irtifaya kadar gönderilen uydular bu yörüngede yer almaktadır. Orta dünya yörüngesinde navigasyon uyduları görev almaktadır. Bu yörünge'nin sınırları yaklaşık olarak 10.000-20.000 km arası değişmektedir. Yer sabit yörüngede haberleşme uyduları görev almaktadır. Bu yörünge yaklaşık 36.000 km'dir ve Dünya üzerinde sürekli belirli bir bölgeye bakması sebebiyle bu şekilde adlandırılmaktadır. Yüksek eliptik yörünge ise irtifanın sürekli olarak değiştiği bir yörüngedir. Bu yörüngede bulunan uyduların irtifası 1.000 km'ye kadar alçalıp, 40.000 km'ye kadar çıkabilir. Bu yörüngeye, kapsama alanının göreceli olarak zor olduğu Rusya gibi (büyük alanı kaplayan) ülkelerin uyduları gönderilmektedir. Uydunun yörüngesi, faydalı yükü ve alt sistemleri uydudan beklenen göreve göre belirlenmektedir [65 – 68].

2.5. Uzay Radyasyonu

Radyasyon, enerjinin elektromanyetik (EM) dalgalar ya da yüksek enerjili parçacıklar şeklinde taşınımı olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.8. Elektromanyetik dalga enerji dağılımı (spektrum) [69]

Radyasyon, “iyonize eden” ve “iyonize etmeyen” olarak iki başlık altında incelenmektedir. İyonize eden radyasyon, elektronları yörüngelerinden hareket ettirebilecek enerjiye sahip olan radyasyondur. Uzak morötesi, X ve gama ışınlarının yanı sıra yüksek enerjili parçacıklar da (proton, nötron, elektron, alfa parçacıkları vb.) iyonize eden radyasyon grubuna girmektedir. İyonize etmeyen radyasyon ise, elektronları atom içerisindeki yörüngelerinden hareket ettirebilecek enerjiye sahip değildir. Radyo dalgalarından yakın morötesi bölgesine kadar olan dalgalar bu radyasyon grubuna girmektedir.

İyonize eden radyasyon, hem elektromanyetik dalga hem de yüksek enerjili parçacıklar şeklinde uzay ortamında yoğun olarak bulunduğu için uzay görevlerinde takibinin yapılması oldukça önemlidir [70 – 73].

2.5.1. Uzay Radyasyonu Kaynakları

Uzayda çeşitli kaynaklardan gelen, uydu performansını etkileyebilecek düzeyde radyasyon bulunmaktadır. Uzay ortamında bulunan her türlü donanım Güneş ve Güneş sistemimiz dışından gelen yoğun bir radyasyona maruz kalır. Bu radyasyon kaynakları başta Güneş atmosferinde ortaya çıkan manyetik aktivite kaynaklı hareketlilikler (parlamalar, patlamalar ve püskürmeler) ve yıldız patlamaları sonucu yıldızlararası ortamdan ulaşan radyasyondur. Uzay

ortamındaki iyonize eden bu radyasyon kaynakları üç başlıkta incelenmektedir [70 – 73].

2.5.1.1. Hapsolmuş Radyasyon

Dünya'nın eriyik halde bulunan demir çekirdeğinin hareketleri çekirdek içerisinde elektrik akımını, bu elektrik akımı da Dünya'nın manyetik alanını (manyetosferi) oluşturmaktadır. Güneş'te meydana gelen hareketlerle bağlantılı olarak, Dünyamız sürekli Güneş rüzgârına (solar wind) maruz kalmaktadır. Bu rüzgâr Dünya'nın manyetik alanını devamlı olarak sıkıştırmakta ve sınırlamaktadır. Diğer yandan, manyetosfer de Güneş'ten gelen radyasyonu savuşturarak Dünya'yı radyasyon bombardımanından büyük oranda korumaktadır [74].

Güneş rüzgârının büyük kısmı yüksek enerjili proton ve elektronlardan oluşur. Dünya üzerine gelen yüksek enerjili parçacıkların hepsi manyetik alan tarafından savuşturulamaz ve bu parçacıkların bir kısmı Dünya'nın manyetik alanı içine hapsolür. Hapsolan parçacıklar Dünya'yı çevreleyen radyasyon kuşakları içerisinde bulunur. Van Allen Radyasyon Kuşakları da denilen bu bölgeler, iç içe geçmiş yüzük (toroidal) şeklindedir. Dünya'ya yakın olan (içteki) kuşakta çoğunlukla protonlar, dıştaki kuşakta ise çoğunlukla elektronlar bulunur. İçteki kuşağın sınırları yaklaşık olarak 1.500 – 13.000 km aralığındayken, dıştaki kuşak 19.000 – 40.000 km aralığındadır. 2012 yılında, bu iki kuşak arasında üçüncü (geçici) kuşak olarak da adlandırılan yeni bir kuşak keşfedilmiştir. Güneş'te oluşan patlamalar ve taçküre kütle atımı gibi hareketlilikler sonucu oluşan bu kuşak, yaklaşık bir ay kadar geçici bir süreliğine oluştu. Bu kuşağın sınırları yaklaşık 19.000 – 22.000 km arasındadır ve çoğunlukla elektronları içermektedir [76].

Hapsolmuş radyasyon, elektronik donanımları ve canlı sağlığını tehdit etmektedir. Bu radyasyonun yıkıcı etkileri, uzay araçlarının hangi yörüngede olduğuna, Güneş hareketliliklerine ve manyetosferik koşullara bağlı olarak sürekli değişmektedir.

2.5.1.2. Solar Enerjik Parçacıklar

Bu parçacıklar, Güneş patlamaları (solar flare) ve taçküre kütle atımı (coronal mass ejection) gibi Güneş'te meydana gelen manyetik aktivite kaynaklı

hareketlilikler sonucu ortaya çıkar. Bu hareketlilikler sonucu yoğun miktarda proton, elektron, alfa parçacıkları ve ağır iyonlar saçılır.

Güneş'te meydana gelen patlamalar çok yoğun bir enerjinin X ışını formunda salımı olarak tanımlanabilir. Ortaya çıkan enerji miktarı o kadar büyüktür ki patlamalarda ortaya çıkan plazmanın sıcaklığı milyonlarca dereceye varabilir. Güneş patlamaları genellikle Güneş yüzeyinde bulunan Güneş lekelerinde meydana gelir. Güneş lekelerinin manyetik alanı çok fazladır. Güneş'in diğer kısımlarına göre çok daha yoğun manyetik alana sahip olmaları sebebiyle bu bölgelerde sıcaklık iletimi daha azdır. Bu bölgeler çevrelerine göre daha soğuk olmaları nedeniyle siyah lekeler şeklinde görünürler.

Güneş'te oluşan bir diğer hareketlilik taçküre kütle atımıdır. Taçküre kütle atımı çok büyük miktarda, yüksek enerjili, iyonize hâldeki maddenin (plazmanın) uzaya püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Taçküre kütle atımı, genellikle yoğun biçimde meydana gelen Güneş patlamalarının ardından gerçekleşir. Büyük bir kütle atımı, saatte milyonlarca kilometre hızla giden milyarlarca ton madde içerebilir. Bu bakımdan, uzay ortamında bulunan her türlü araç için taçküre kütle atımlarının takip edilmesi çok büyük önem taşımaktadır [77, 78].

2.5.1.3. Galaktik Kozmik Radyasyon

Galaktik kozmik radyasyon (galactic cosmic radiation), Güneş sistemimiz dışından gelen radyasyondur ve diğer iki radyasyon kaynağına ek olarak periyodik tabloda bulunan elementleri de içerebilmektedir. Bu radyasyonun yaklaşık olarak %90 protonlardan, %9 alfa (helyum) parçacığından ve %1 daha ağır element çekirdeklerinden (ağır iyonlardan) oluşmaktadır. Süpernova patlamalarının, aktif çekirdeğe sahip gökadalaların, kuasarların ve gama ışını patlamalarının bu radyasyonun kaynağı olduğu düşünülmektedir. Galaktik kozmik radyasyonun, hapsolmuş radyasyona göre yoğunluğu daha azdır fakat sahip olduğu yüksek iyonlaştırma potansiyelinden ötürü uzay araçları içerisine daha fazla ilerleyebilme ve dolayısıyla elektronik donanımlara daha fazla zarar verme potansiyeline sahiptir.

2.5.2. Uzay Radyasyonu Etkileri

Uydunun yapısal tasarımı görev parametrelerine göre belirlenir ve uydu iskelet malzemesi olarak genellikle alüminyum kullanılır. Alüminyumun kolay bulunması

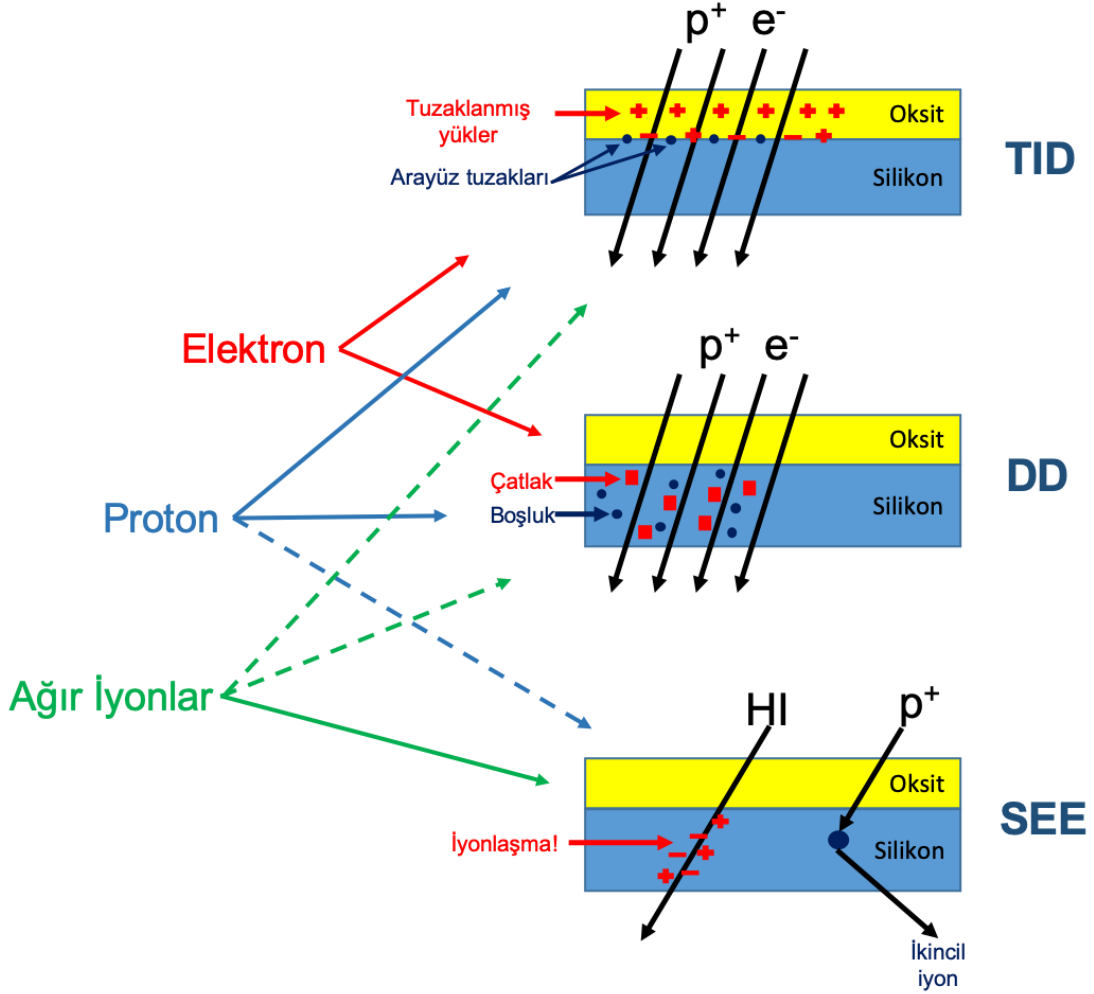
ve işlenebilmesinin yanı sıra görece ucuz bir malzeme olması uydu teknolojilerinde yıllardır kullanılmasını sağlamıştır. Uydu yapısının kalınlığı radyasyon seviyelerinin farklı olduğu yörüngelerde aynı değildir. Bunun en büyük sebeplerinden biri uydu kütlesi artıkça maliyetlerin de artmasıdır. Örneğin, radyasyon seviyelerinin çok yüksek olduğu yer sabit yörüngede daha kalın uydu yapısalı kullanılırken, radyasyon seviyelerinin daha az olduğu alçak dünya yörüngesinde daha ince uydu yapısalı kullanılır. Bu yapısal kalınlıkları belirleyen tek etmen radyasyon değildir fakat bu duvar kalınlıkları belirli bir seviyeye kadar radyasyondan korunabilmeyi sağlamaktadır. Alüminyumun kalkanlama özelliğinin yetersiz kaldığı durumlarda ise ihtiyaç hâlinde tantal, tungsten, titanyum vb. malzemeler ek kalkanlama amacıyla kullanılabilir.

Radyasyon sebebiyle bir ekipmanın olası kaybı durumunda görevin başarılı bir şekilde devam etmesi için ekipmanlar yedekli olarak tasarlanır. Bu tasarım yaklaşımı donanım özelinde alınan bir tedbir olarak düşünülebilir. Örneğin, bir ekipmanın işlevsiz hâle gelmesi sebebiyle tüm uyduyu kaybetmemek adına o ekipman ile aynı işleve sahip ikinci bir ekipman kullanılabilir. Her ekipmanın yedekli olarak tasarlanması daha güvenilir uydulara sahip olmayı sağlar. Ancak, yukarıda da belirtildiği üzere, kütle ve dolayısıyla maliyetin artması uydu tasarımını belirleyen en önemli etmenlerdendir. Radyasyon etkilerine karşı alınabilecek bir diğer tedbir ise çeşitli yazılım algoritmaları kullanılarak hata düzeltme işlemlerinin yapılmasıdır. Bu işlemler, hatalı kısımların veya verilerin göz ardı edilmesi, gerekirse ilgili kısmın yeniden başlatılmasıyla oluşan hataların normal duruma dönmesini sağlar [78].

Uzayda bulunan radyasyon, hem uzayda bulunan canlı sağlığını hem de elektronik malzemeleri ciddi anlamda tehdit etmektedir. Bu sebeple, uzay radyasyonu kaynaklı oluşabilecek etkilere dikkat edilmesi gerekmektedir. Uyduların devamlı bir şekilde radyasyona maruz kalmalarından ötürü, bazen uydu kaybıyla da sonuçlanan işlevsel hatalar ve performans kayıpları olmaktadır. Uzayda maruz kalınan radyasyon genellikle “rad” ölçü birimiyle ifade edilir. 100 rad, 1 Gy'e (Gray) eşittir [79].

$$100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$$

Uzay radyasyonu etkileri, toplam iyonize doz, yer değiştirme hasarı ve tekil olay etkileri olarak üç ana başlık olarak incelenebilir. Yüksek enerjili parçacıklar enerjisi ve türüne (çeşidine) göre bu radyasyon etkilerini yaratmaktadırlar. Uzay ortamında yoğunlukla gama ışınları, X-ışınları, proton, elektron ve ağır iyonlar bulunmaktadır [78].



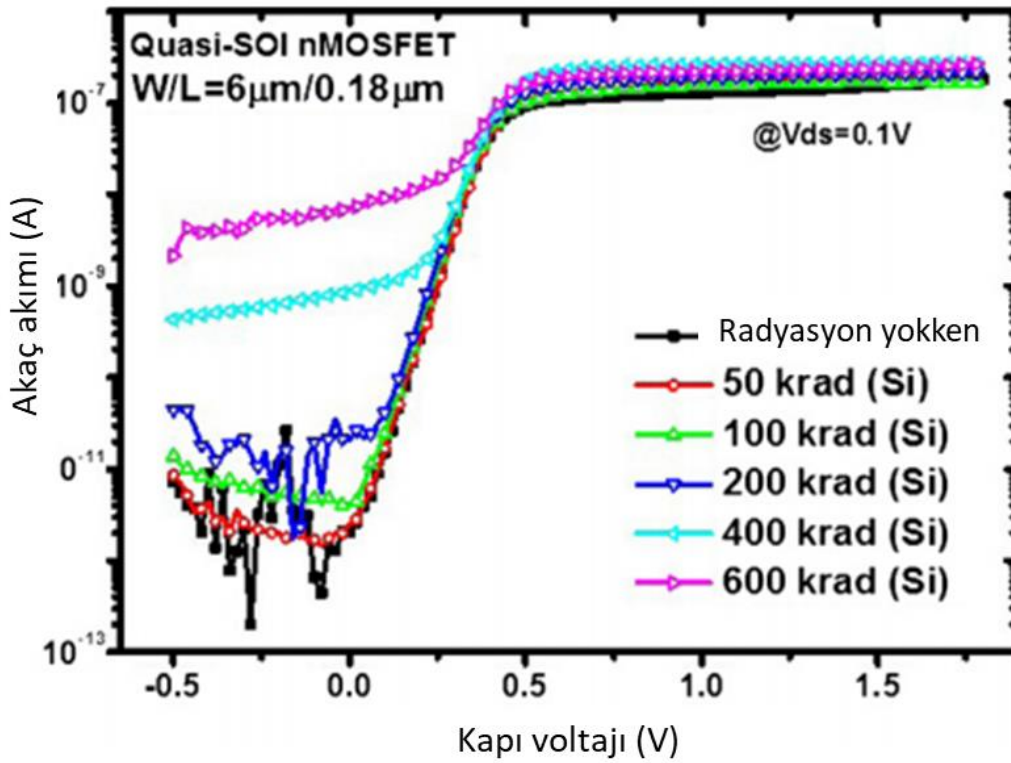
Şekil 2.9. Yüksek enerjili parçacıkların metal oksit yarı iletken yapısında yarattığı radyasyon etkileri (TID: toplam iyonize doz, DD: yer değiştirme hasarı, SEE: tekil olay etkileri)

Radyasyon kaynaklarından, özellikle Güneş'ten gelen yüksek enerjili parçacıklar, Dünya atmosferi ile etkileştikten sonra proton, nötron, elektron, pion, pozitron, müon, alfa parçacıkları vb. ikincil parçacıklara bozunur. Bu parçacık radyasyonuna ikincil radyasyon denir. Yüksek hızlı parçacıklar Dünya atmosferi ile etkileşerek enerjilerini kaybederken veya ikincil parçacıklara bozunurken çeşitli renklerde ışık yayarlar. Kutup ışıkları olarak da bilinen bu görsel olaylar,

ikincil radyasyona gösterilebilecek en güzel örneklerdendir. Bu olaylar eğer Kuzey Kutbu'nda oluşuyorsa kuzey ışıkları (aurora borealis), Güney Kutbu'nda oluşuyorsa da güney ışıkları (aurora australis) olarak adlandırılırlar. Dünyanın manyetik alan çizgilerinin kutuplarda uzaya doğru açık olması, yüksek hızlı parçacıkların atmosferimizden içeri doğru girmesine ve bu olayların gerçekleşmesine sebep olur.

2.5.2.1. Toplam İyonize Doz

Toplam iyonize doz etkisi, uzay ortamında en sık karşılaşılan etkidir. Elektronik bileşenler, sürekli olarak radyasyona maruz kaldıkları için işlevsel performansları etkilenmektedir. Sonuçları Şekil 2.10'da gösterilen referans çalışmaya göre, bir metal oksit yarı iletken alan etkili transistörün radyasyona maruz kaldıkça değişen voltaj göre akım grafiği verilmiştir [80]. Normal koşullarda transistör siyah eğri ile gösterilmiş bir şekilde çalışma performansı göstermektedir. Radyasyona maruz kaldıkça mor ile gösterilmiş olan eğriye doğru performans kayması yaşanmıştır. Meydana gelen bu kayma bileşenin istenilen şekilde çalışmayacağını göstermektedir.



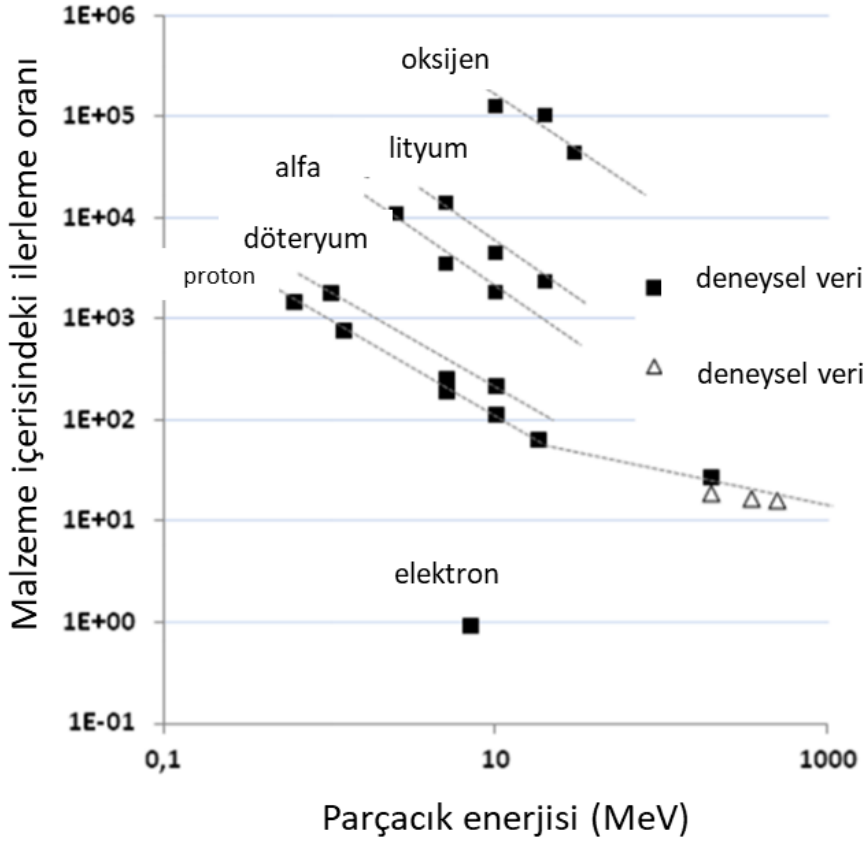
Şekil 2.10. Toplam iyonize dozun metal oksit yarı iletken alan etkili transistör üzerindeki etkisi [80]

Proton, elektron, X ve Gama ışınları bu etkiden sorumludur. Toplam iyonize doz, birikimli (kümülatif) ve iyonize eden bir etkidir. Bileşenlerin, özellikle yalıtkan (dielektrik) kısımlarında (oksit, nitrit tabakalarda) gerçekleşen olaylar sebebiyle bu etki oluşmaktadır.

Toplam iyonize doz, kalıcı, biriken (kümülatif) ve iyonize eden bir etki olduğu için elektronik ekipmanların yarı iletken veya yalıtkan (dielektrik) kısımlarında eşik değerlerin kayması, kaçak akımların ve tüketimin artması, zamanlama değişiklikleri ve fonksiyon kayıpları gibi hasarlara yol açmaktadır. Ayrıca polimer ve cam gibi malzemelerin elektriksel, mekanik ve optik özelliklerinin değişmesine sebep olmaktadır.

2.5.2.2. Yer Değiştirme Hasarı

Yer değiştirme hasarı, yüksek enerjili parçacıkların sebep olduğu çift kutuplu, optoelektronik, güneş hücreleri gibi donanımlar üzerinde meydana gelen birikimli ama iyonize etmeyen bir etkidir. Sonuçları Şekil 2.11'de gösterilen referans çalışmaya göre, yüksek enerjili (oksijen, lityum, alfa, proton ve elektron) parçacıkların silisyum içerisinde farklı seviyelerde ilerleyebilmekte ve çeşitli seviyelerde yer değiştirme hatasına neden olmaktadır [81].



Şekil 2.11. Parçacıkların yarattığı yer değiştirme hasarı etkileri [81]

Nötron, proton, elektron ve ağır iyonlar gibi parçacıklar malzemelerin kristal yapısındaki atomların yerlerini değiştirerek kristal yapının değişmesine neden olur. Bu etki malzemedeki kristal yapının zarar görmesi sebebiyle özellikle optoelektronik aygıtlar ve güneş hücreleri (panelleri) üzerinde etkilidir.

Hapsolmuş radyasyon ve Güneş kaynaklı enerjik parçacıklar içerisinde yoğun olarak bulunan protonlar ve elektronlar, toplam iyonize doz ve yer değiştirme hasarı hasarlarına sebep olur. Bu hasarlar elektronik ve optik bileşenlerin performans ve özelliklerinde bozulmalara hatta tamamen işlevsiz kalmalarına yol açabilir. Protonların yüksek enerjiye sahip olması ve uzay aracının iç kısımlarına kadar ilerleyebilmesi, uzay araçları açısından en tehlikeli parçacıklardandır. Düşük enerjili elektronlar ise yüzey ile etkileşip, yüzeyin yüklenmesine bağlı olarak elektrostatik deşarj (ESD) (yüzeyler arasında elektrostatik boşalmaya) sebep olabilir. Bu durum elektronların daha yoğun olduğu yer sabit (geostationary) yörüngedeki uzay araçları için çok daha büyük sorunlar yaratmaktadır. Yüksek enerjili elektronlar ise uzay aracının iç kısımlarına kadar

ilerleyerek, yüzeyin yanı sıra uydu/araç içerisinde de elektrostatik deşarja sebep olabilmektedir [78].

2.5.2.3. Tekil Olay Etkileri

Uzay radyasyonunun yarattığı üçüncü etki (hasar) olan Tekil Olay Etkileri, yüksek enerjiye sahip tek bir parçacığın (ağır iyonun) sebep olduğu etkidir. Bu etkilerin bazıları kalıcı bazıları da geçicidir.

Tekil olay etkilerine, proton, nötron ve çoğunlukla ağır iyonlar sebep olur. Proton ve nötronlar, aktif yarı iletkene sahip diyotlar, transistörler, entegre devreler, optoelektronik aygıtlar vb. bileşenler ile nükleer etkileşme girerek yükün bir alanda birikmesine; ağır iyonlar ise bileşenin doğrudan iyonlaşmasına sebep olur. Bileşenin radyasyon etkisiyle yüksek akım çekerek tüm ekipmanın kaybına sebep olması, bu etkinin yol açtığı kalıcı hasarlara bir örnektir. Geçici etkiler ise verilerde bozulmalara veya cihazın farklı işlevsel durumlarda kalmasına sebep olur. Çoğunlukla geçici hasarlar sistemin kapatılıp açılmasıyla düzelmektedir.

Uzay ortamındaki radyasyondan tamamen korunmak pek mümkün olmasa da uyduların maruz kalacağı radyasyon seviyeleri ve bunların etkileri, çeşitli radyasyon yazılımları ile analiz edilir. Ayrıca, laboratuvar ortamında çeşitli radyasyon testleri sayesinde, elektronik devreler üzerinde olası etkilerin saptanması, önleyici tedbirlerin alınması ve telafi edici iyileştirmelerin uygulanması mümkün olur. Bu analizler ve testler sonucu, uydunun yapısal tasarımı, uydu donanımları (yedeklilikler) ve uydu yazılımları özelinde önleyici tedbirler alınmakta ve telafi edici iyileştirmeler yapılmaktadır [78].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Üretimi

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör (NürFET) tipi sensörler üretilirken faydalanılan mikro elektronik üretim basamakları temel olarak, silisyum levhanın (wafer) temizlenmesi, difüzyon fırını ile levha üzerinde oksit katman (SiO_2) büyütülmesi, fotolitografi, kimyasal aşındırma (etching) ile kanalların oluşturulması, difüzyon fırını ile Fosfor ve Bor bileşikleri kullanılarak “p” ve “n” kanallarının oluşturulması/katkılanması, kapı (Gate) ucu için oksit tabaka büyütülmesi, püskürtme (sputtering) yöntemiyle alüminyum kaplama ile metal kontak oluşturulması/alınması, levhanın kesilmesi ve bir devre elemanı olarak kullanabilmek için 8 bacaklı çift sıra uçlu pakete (DIP) bağlama (bonding) işlemlerinin yapılması şeklinde özetlenebilir. Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (NÜRDAM) araştırmacıları tarafından üretilen nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörleri ile ilgili detaylı bilgi ve açıklamalar referans çalışmalarda belirtilmiştir [82 – 84].

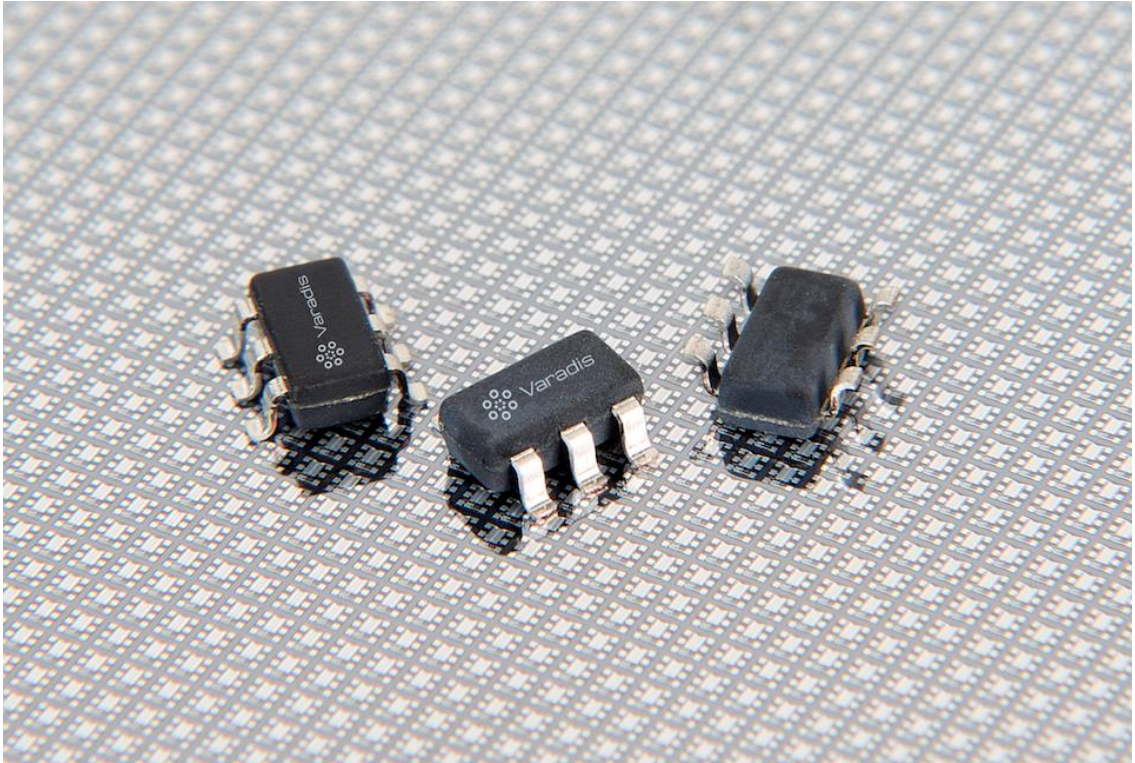
Bu tez çalışmasında kullanılan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin oksit katman (kapı ucu, “gate”) kalınlıkları, oksit katman (SiO_2) büyütme aşamasında 40 nm, 60 nm ve 100 nm olarak büyütülmüştür. Bu amaçla, farklı oksit kalınlıklara sahip sensörlerin radyasyon altında gerçek zamanlı olarak nasıl çalışacağı/tepki vereceği incelenmiştir. Oksit katman kalınlığı arttıkça radyasyona olan hassasiyet artmaktadır. Bu sebeple daha kalın oksit katmana sahip bir sensörün radyasyona olan hassasiyeti daha fazla olmaktadır. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin, radyasyon altındaki çalışma performansları, daha önce çeşitli uzay projelerinde kullanılmış olan tarihçeli sensörler ile karşılaştırılarak ilgili sonuçlar sunulmuştur.

3.2. Radyasyon Dedektörü ve Tasarımı

Bu tez çalışması kapsamında sunulan radyasyon dedektörü, uydu projelerinde de kullanılabilir şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Dedektörün elektronik devresi tasarlanırken Proteus programı kullanılmıştır. Mikro işlemcinin gömülü yazılımları ise “C Compilers for PIC” derleyicileriyle (compiler) gerçekleştirilmiştir.

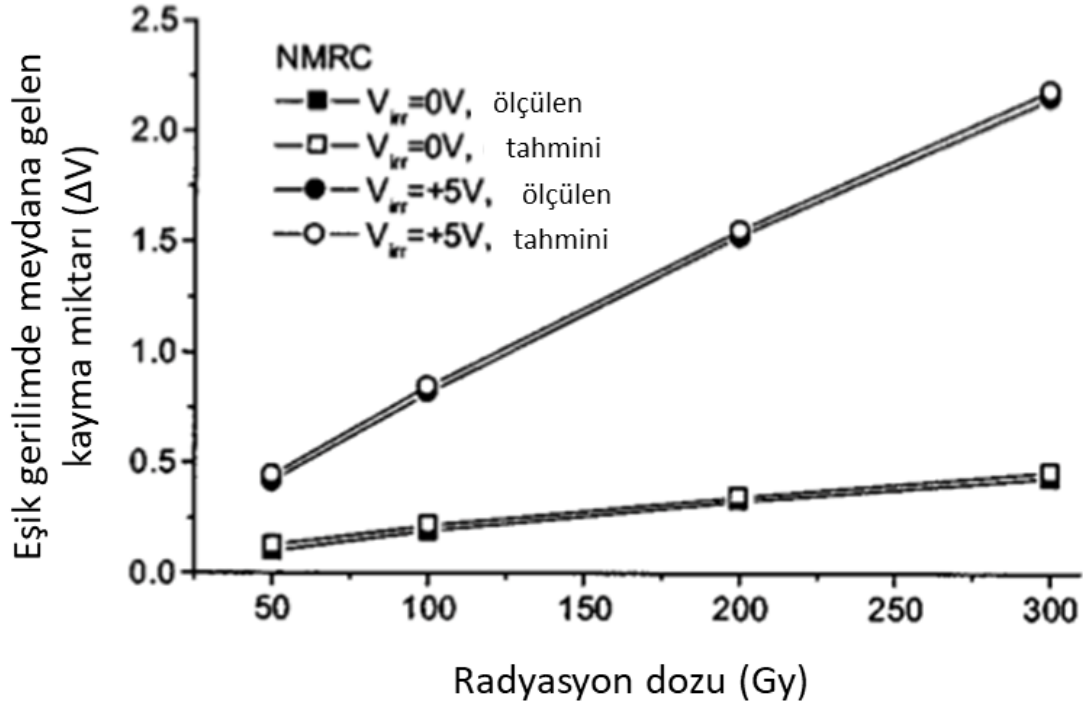
Dedektör üzerinde farklı oksit tabaka kalınlıklarına sahip üç tane nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörü, bir tane RADFET (Radiation Sensing Field Effect Transistor) ve bir tane de FGDOS (Floating Gate Dosimeter) sensörü bulunmaktadır. Radyasyon altında, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerden alınacak değerlerin tespit edilmesi ve karşılaştırılması amacıyla, dedektörde RADFET ve FGDOS gibi daha önce çeşitli uzay görevlerinde de kullanılan radyasyon sensörleri kullanılmıştır.

RADFET radyasyon sensörü Varadis (İrlanda) firması tarafından üretilmiştir. RADFET, p-tipi bir metal oksit yarı iletken alan etkili transistördür ve daha önce çeşitli uzay görevlerinde kullanılmıştır [85, 86]. Sadece uzay görevlerine yönelik olarak değil, radyasyonun bulunduğu (biyomedikal, nükleer, askeri vb.) her ortamda kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. 2,82 mm x 2,65 mm boyutlara sahip olan ve “Varadis RADFET VT01” üretici kodu ile üretilen RADFET sensörünün, radyasyonu ölçebilmesini sağlayan oksit tabaka kalınlığı 400 nm’dir ve çalışma mantığı nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörleriyle aynıdır. RADFET VT01 sensörüyle ilgili daha detaylı bilgilere Ekler’de belirtilmiş olan ver föyünden ulaşılabilir.



Şekil 3.1. Tedarik edilen tarihçeli RADFET VT01 sensörü [87]

Sensör, radyasyona maruz kaldıkça eşik voltajında (gerilimde- V_{th}) kayma meydana gelmektedir. Eşik voltaj değerindeki kayma miktarı direkt olarak maruz kalınan radyasyon ile orantılı olduğu için, eşik voltaj değişiminin ölçülmesiyle maruz kalınan radyasyon dozu tespit edilebilmektedir. Sonuçları, Şekil 3.2’de belirtilmiş olan referans çalışmaya göre 5 V gerilim altındaki sensörlerin radyasyon altındaki performansları, gerilim uygulanmamış olan sensörler ile kıyaslanmıştır. Gerilim uygulanmış olan sensörlerde meydana gelen eşik gerilimlerdeki kayma miktarı, gerilim uygulanmamış olan sensörlerde meydana gelen eşik gerilimlerdeki kayma miktarından daha fazla olmuştur [88]. Bu sebeple radyasyon doz etkisinin daha rahat ölçülebilmesi adına sensörlere gerilim uygulanması önerilmektedir.

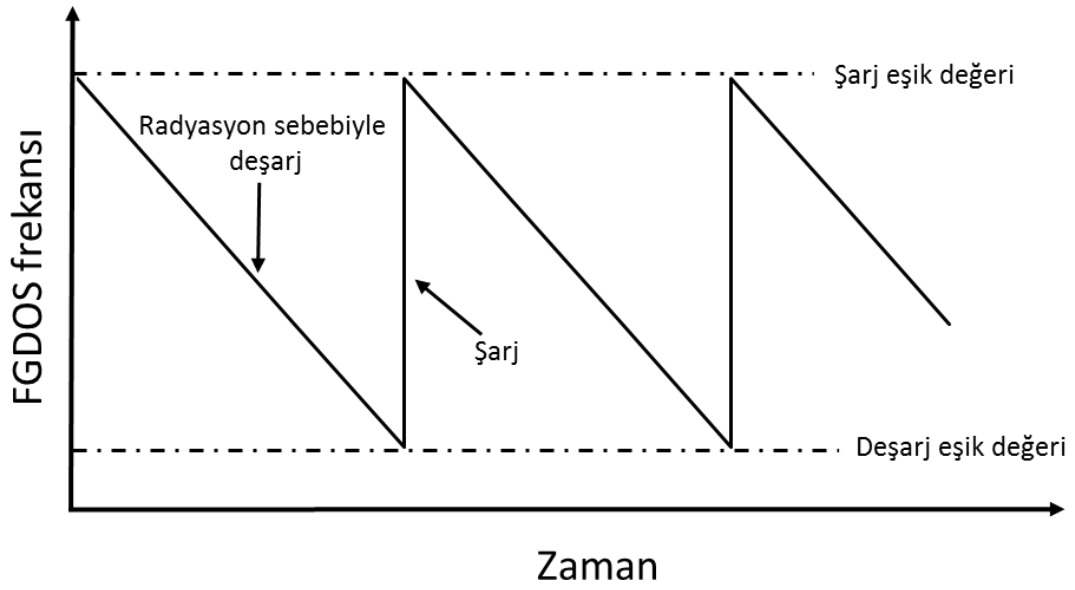


Şekil 3.2. Radyasyon sebebiyle RADFET sensörünün eşik voltaj değerinin artması [88]

Sensörün iç direnci radyasyon sebebiyle değiştiği (arttığı) için, sensördeki bu değişim sabit akım kaynağı kullanılarak ölçülebilmektedir. Eşik gerilimindeki kayma üreticinin tavsiyesi ile 10 μA 'lık akım kaynağı ile takip edilmektedir.

Dedektör üzerinde kullanılan bir diğer radyasyon sensörü FGDOS sensörüdür. FGDOS sensörü IC-Malaga-Sealicon (İspanya) firması tarafından üretilmiştir. Bu

sensörün çalışma prensibi, dedektörün üzerinde kullanılan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör ve RADFET sensörlerinden farklıdır. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör ve RADFET sensörlerinde voltaj ölçümü yapılarak maruz kalınan doz tespit edilirken, FGDOS sensöründe frekans ölçümü yapılarak maruz kalınan doz tespit edilmektedir. FGDOS sensörünün daha önce çeşitli uzay görevlerinde kullanılması sebebiyle dedektör tasarımında kullanılmıştır [89, 90].

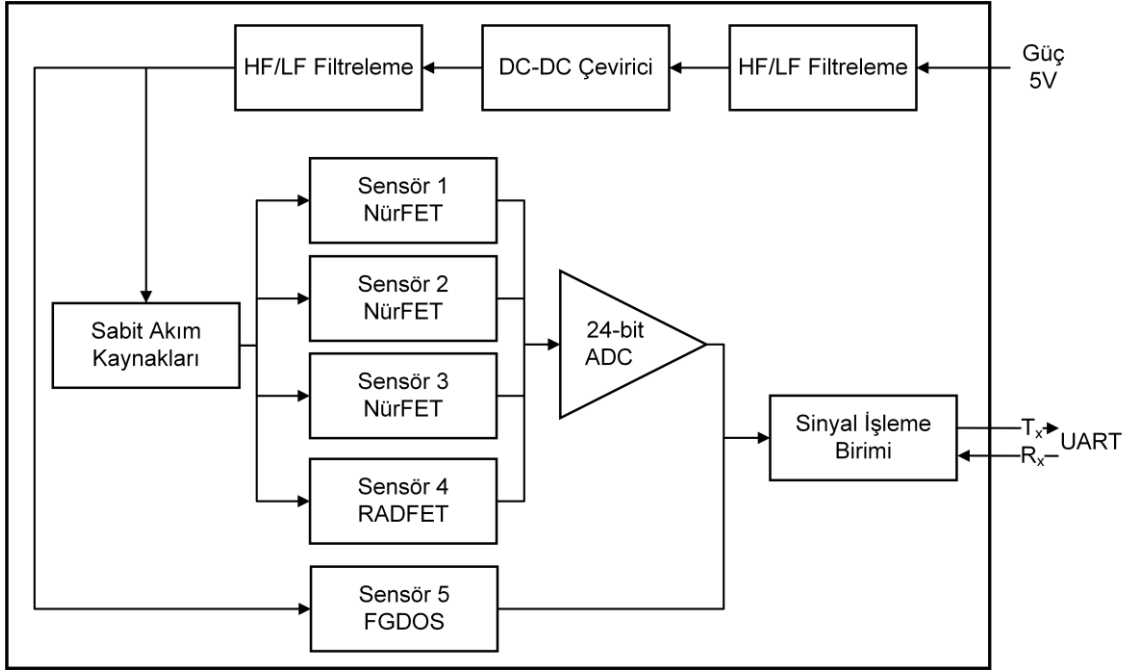


Şekil 3.3. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS sensörünün çalışma prensibi

FGDOS sensörünün çalışma prensibi frekans değişiminin belirlenmesi mantığına dayanmaktadır. Sensör radyasyona maruz kalmadan önce şarj edilerek frekansı istenilen seviyeye çıkarılır. Radyasyona maruz kalan sensörün frekansı doğrusal bir şekilde azalmaktadır. Frekanslarda meydana gelen bu azalma maruz kalınan radyasyon dozu ile orantılı olduğu için frekansta meydana gelen değişim miktarından ne kadarlık bir doza maruz kalındığı tespit edilebilmektedir. 5 mm (en) x 5 mm (boy) boyutlarına sahip olan FGDOS sensörü içten yedekli bir tasarıma sahiptir. Sensörün içerisinde radyasyonu ölçebilen Sensör 0 ve Sensör 1 adında iki ayrı sensör bulunmaktadır. Bu sensörler birbirinden bağımsız bir şekilde çalışmakta ve radyasyonu tespit edebilmektedir [91, 92].

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan ve üretilen radyasyon dedektörü üzerinde yukarıda belirtilmiş olan (nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü, RADFET ve FGDOS) sensörleri kullanılmış ve bu sensörlerin

hepsiyle radyasyon altında ölçüm yapılmıştır. 10 cm x 7 cm boyutlarına sahip olan radyasyon dedektörünün çalışma prensibi aşağıdaki elektriksel blok şema diyagramında gösterilmiştir.



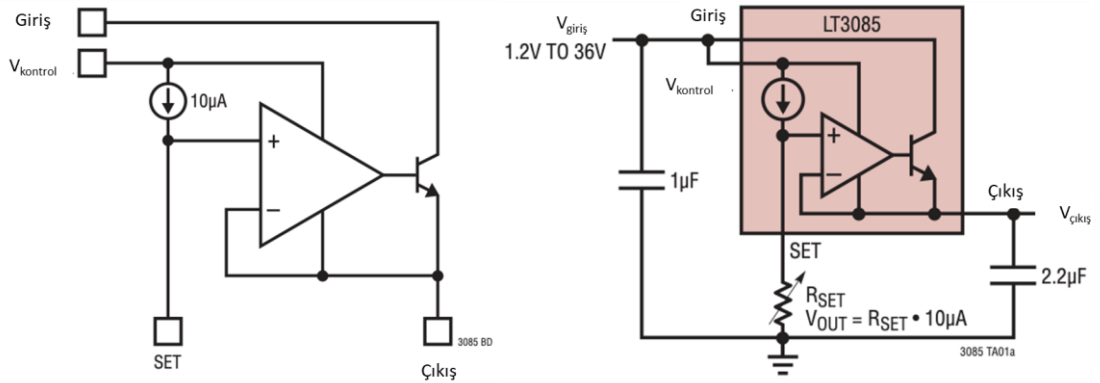
Şekil 3.4. Bu tez kapsamında geliştirilmiş olan radyasyon dedektörünün çalışma prensibi

Dedektör 5 V gerilim ile çalıştırılmaktadır. Dedektör üzerinde, yüksek ve düşük frekanslarda filtreleme/ayıklama yapan kısımlar bulunmaktadır. Bununla birlikte, sensörler ve elektronik bileşenler için gerekli olan voltajın sağlanması amacıyla DC – DC çeviriciler kullanılmıştır. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü ve RADFET sensörlerinin, üreticileri tarafından 10 μ A'lık akım kaynağı ile okunması önerilmektedir. Bu sebeple, sensörlerin çalıştırılabilmesi (okunabilmesi) için sabit akım kaynakları (constant current sources) kullanılmıştır. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü ve RADFET sensörlerinden alınan analog verilerin dijital verilere dönüştürülmesi amacıyla 24 – bit'lik analog-dijital çevirici (ADC) kullanılmıştır. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü, RADFET ve FGDOS'dan alınan veriler sinyal işleme birimine iletilerek işlenmekte (kontrol) edilmekte ve böylelikle devre tamamlanmaktadır.

Sabit akım kaynakları, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi radyasyon sensörlerinin, elektronik kart üzerinde gerçek zamanlı olarak, doğru

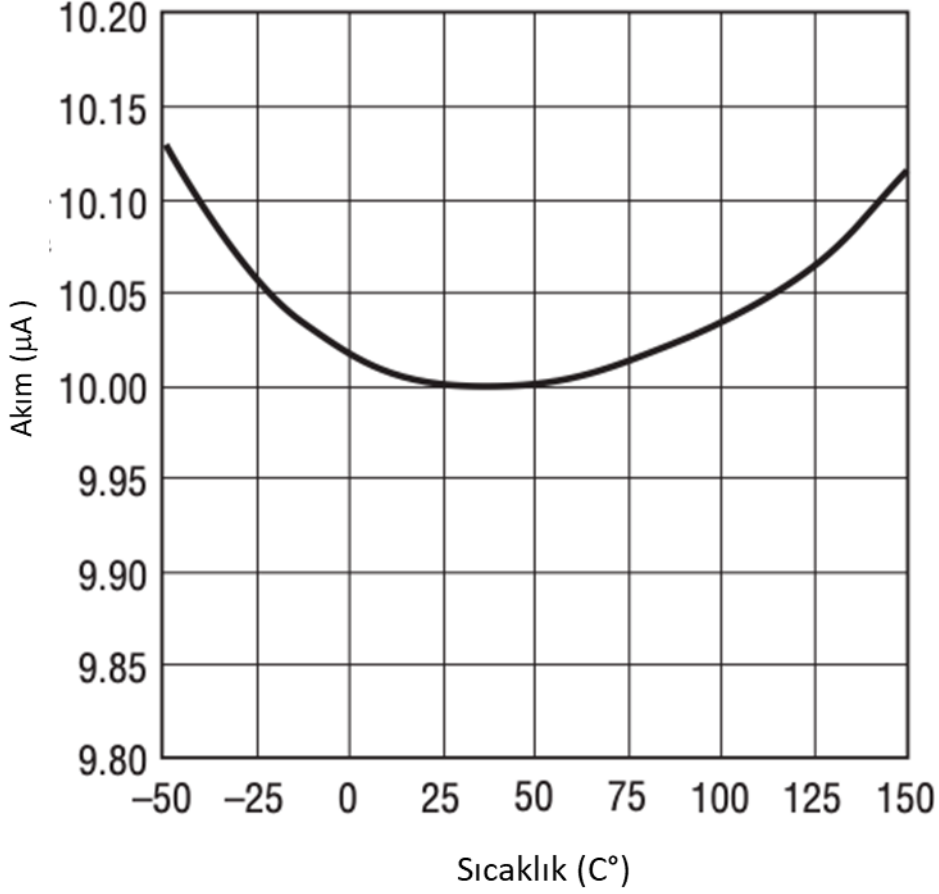
bir şekilde çalıştırılması için çok büyük önem arz etmektedir. Uzay koşullarında “10 μA ” akımı hassas/kesin bir şekilde vermek kolay olmaması sebebiyle, (alınacak olası sonuçları görmek adına) dedektör üzerinde 100 μA ’lık ikinci bir akım kaynağı daha kullanılmıştır. 10 μA ’lık akım kaynağı “Linear Technology” firmasının “LT3085” üretim kodu ile ürettiği elektronik bileşendir. 100 μA ’lık akım kaynağı ise “Texas Instruments” firmasının “REF 200” üretim kodu ile ürettiği elektronik bileşendir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan LT3085 ve REF 200 üretim kodlarına sahip sabit akım kaynakları, hem istenen (beklenen) elektriksel gereksinimleri karşılıyor olmaları hem de yüksek güvenilirliğe sahip olmaları sebebiyle tercih edilmiştir. Bu elektronik bileşenler (10 μA ve 100 μA) ile ilgili daha detaylı bilgilere, sabit akım kaynaklarının üreticileri tarafından sağlanmış olan veri föylerinden (datasheet) ulaşılabilir [93, 94].

Şekil 3.5’te 10 μA ’lık akım kaynağı olarak kullanılan LT3085 bileşenin fonksiyonel blok şeması gösterilmiştir. Bu bileşenden, tasarıma uygun direçler ve kapasitörler seçilerek 10 μA ’lık akım elde edilmiştir.



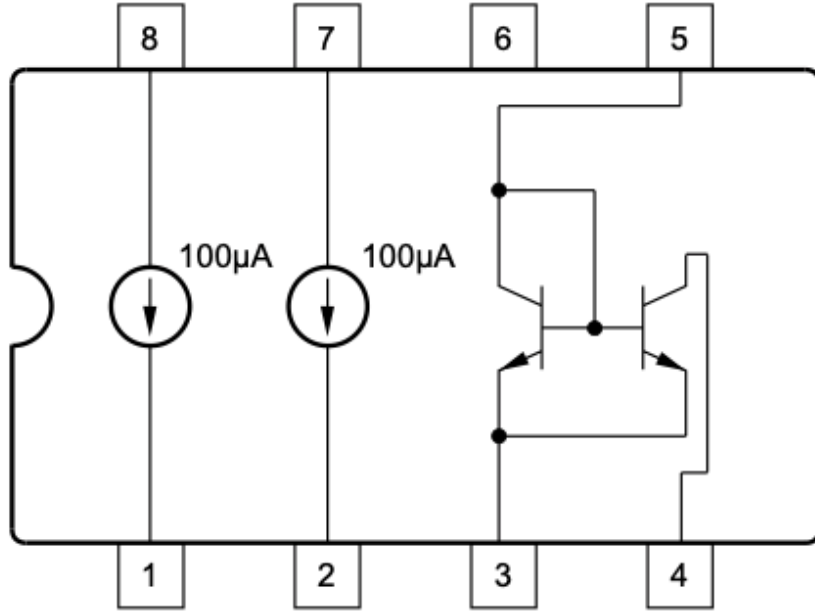
Şekil 3.5. LT3085 akım kaynağının blok diyagramı ve uygulama şeması [93]

LT3085 akım kaynağı – 50 $^{\circ}\text{C}$ ile + 150 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Bu tez kapsamında üretilen radyasyon dedektörünün çalışacak olduğu ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 25 $^{\circ}\text{C}$ olacağından, sıcaklık farklılıkları sebebiyle akım kaynağının yanlış veya istenilmeyen bir şekilde çalışmasının önüne geçilmiş olmaktadır. LT3085 akım kaynağı sebebiyle ölçümlerde gerçekleşebilecek hata oranı en fazla %1 olmaktadır.



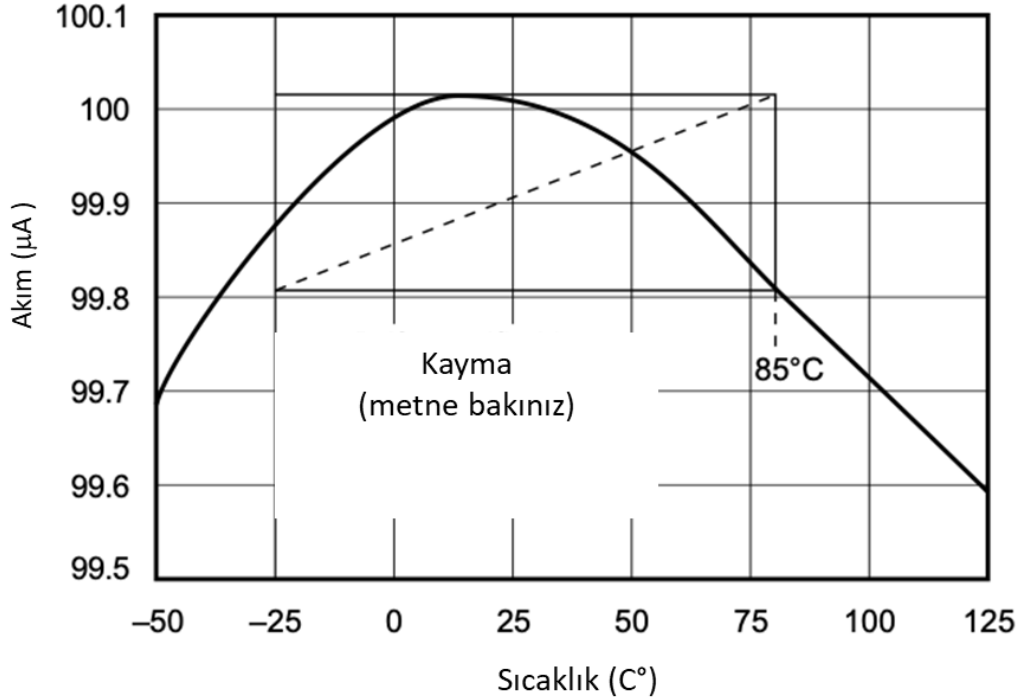
Şekil 3.6. LT3085 akım kaynağının sıcaklığa bağlı akım grafiği [93]

Şekil 3.7’de 100 μA ’lık akım kaynağı olarak kullanılan REF200 bileşenin fonksiyonel blok şeması gösterilmiştir. Bu akım kaynağından, 10 μA ’lık akım kaynağında olduğu gibi direnç ve kapasitör gibi pasif bileşenler kullanılmadan direkt olarak 100 μA ’lık akım alınabilmektedir. 100 μA ’lık akım, bileşenin iki kanalından (bacağından) da alınabilmektedir. Bu tez kapsamında bu akım kaynağının bir kanalı kullanılmıştır.



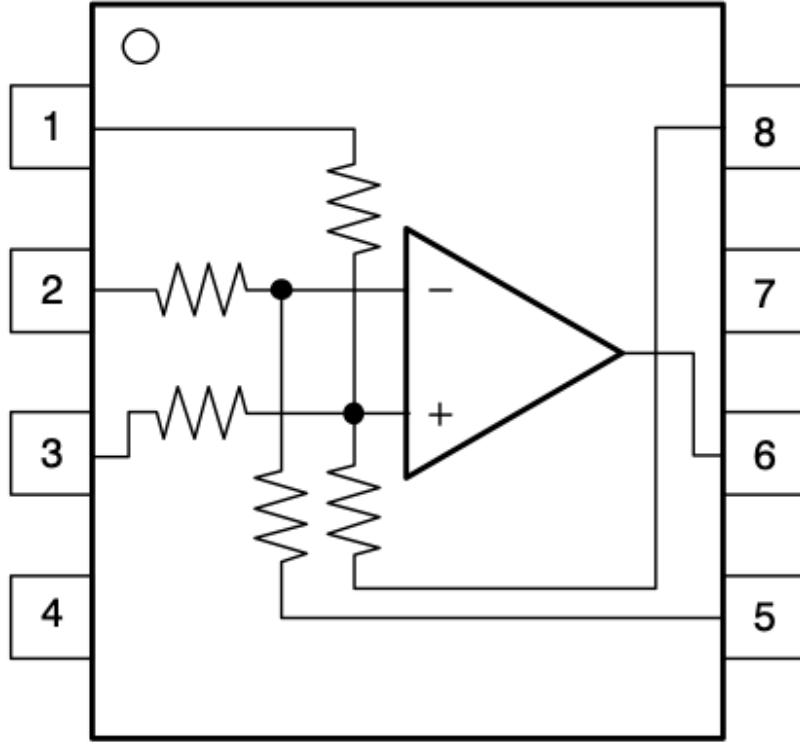
Şekil 3.7. REF200 akım kaynağının fonksiyonel blok diyagramı [94]

REF200 akım kaynağı -50 C° ile $+125\text{ C}^\circ$ sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Bu tez kapsamında üretilen radyasyon dedektörünün çalışacak olduğu ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 25 C° olacağından, sıcaklık farklılıkları sebebiyle akım kaynağının yanlış veya istenilmeyen bir şekilde çalışmasının önüne geçilmiş olmaktadır. REF200 akım kaynağı bileşeni sebebiyle ölçümlerde gerçekleşebilecek hata oranı en fazla %0,5 olmaktadır.



Şekil 3.8. REF200 akım kaynağının sıcaklığa bağlı akım grafiği [94]

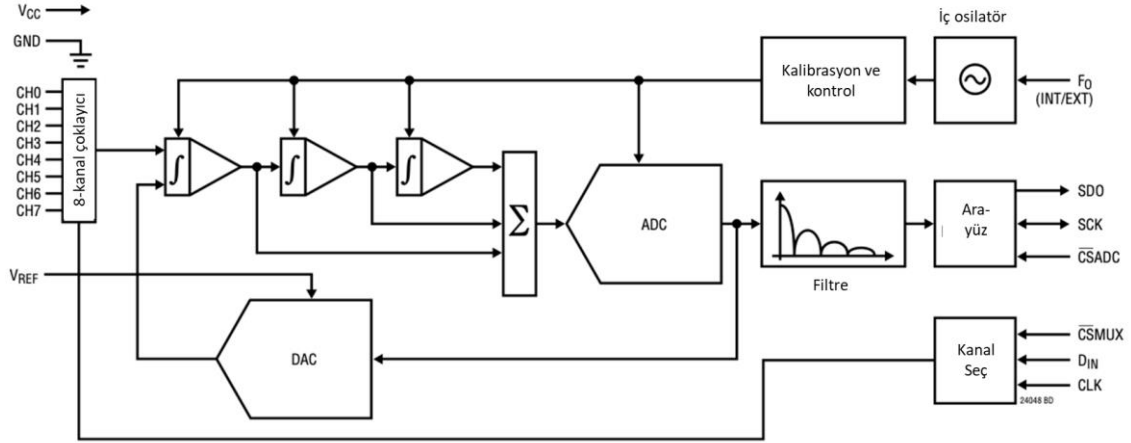
Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerin eşik gerilimlerinde gerçekleşen kayma miktarlarını daha rahat tespit edebilmek amacıyla, Texas Instruments firmasının INA159 kodu ile ürettiği voltaj amplifikatörü kullanılmıştır.



Şekil 3.9. INA159 pin konfigürasyonu [95]

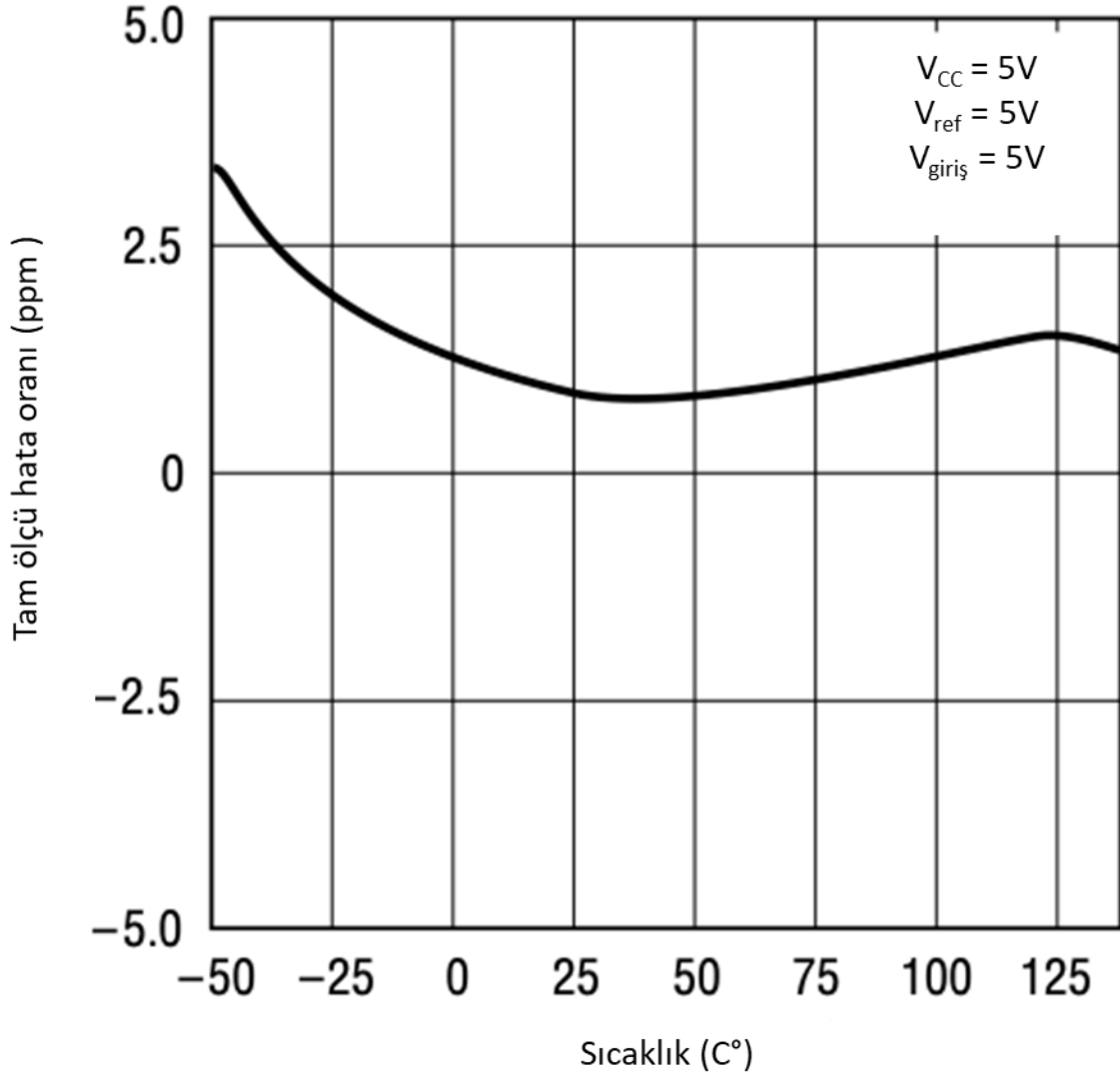
INA159 amplifikatörü -40 C° ile $+150\text{ C}^\circ$ sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Bu tez kapsamında üretilen radyasyon dedektörünün çalışacak olduğu ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 25 C° olacağından, sıcaklık sebebiyle gerçekleşebilecek hata oranları minimum düzeyde olmaktadır. INA159 bileşeni sebebiyle ölçümlerde gerçekleşebilecek hata oranı en fazla %0,024 olmaktadır.

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü ve RADFET sensörlerinden alınan analog verilerin, mikro işlemci tarafından işlenebilmesi/okunabilmesi için dijital verilere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, çözünürlüğünün çok yüksek olması sebebiyle dedektör üzerinde 24-bit'lik analog-dijital çevirici (ADC) kullanılmıştır. Kullanılan ADC Linear Technology firmasının LTC2404 kodu ile ürettiği elektronik bileşendir.



Şekil 3.10. LTC2404 analog-dijital çeviricinin fonksiyonel blok diyagramı [96]

LTC2404 analog-dijital çevirici (ADC) – 50 C° ile + 125 C° sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Bu tez kapsamında üretilen radyasyon dedektörünün çalışacak olduğu ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 25 C° olacağından, ölçümlerde ADC kaynaklı oluşabilecek hata oranı yaklaşık 1 milyonda 1 (1 ppm) seviyelerindedir. En kötü durumda, LTC2404 sebebiyle ölçümlerde gerçekleştirilecek hata oranı en fazla 4 ppm olacaktır.

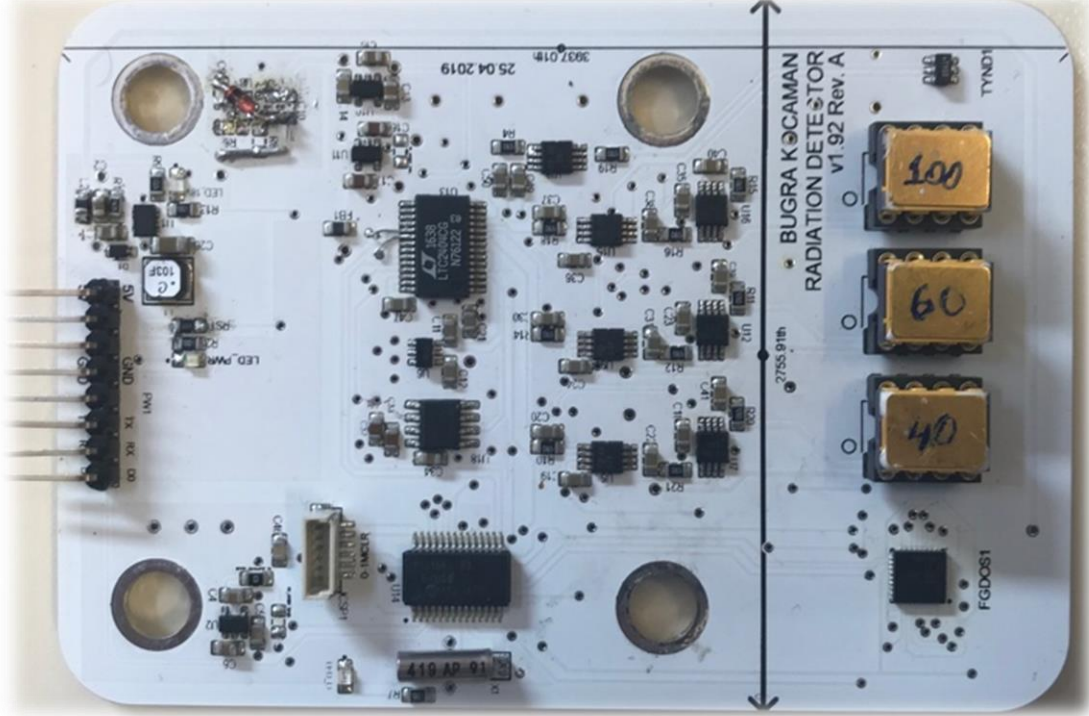


Şekil 3.11. LTC2404 analog-dijital çeviricinin sıcaklığa bağlı hata oranı [96]

Ölçümler, LT3085, REF200, INA159 ve LTC2404 bileşenleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple ölçümler esnasında gerçekleştirilecek belirsizlikler temel olarak bu bileşenlerinden gelmektedir. İlgili bileşenlerden gelebilecek olan belirsizlik miktarları “±” şeklinde (en kötü durumlar düşünülerek) ilgili ölçüm tablolarında verilmiştir. Elektronik bileşenler ile ilgili daha detaylı bilgilere ilgili referans dokümanlardan ulaşılabilir [93 – 96].

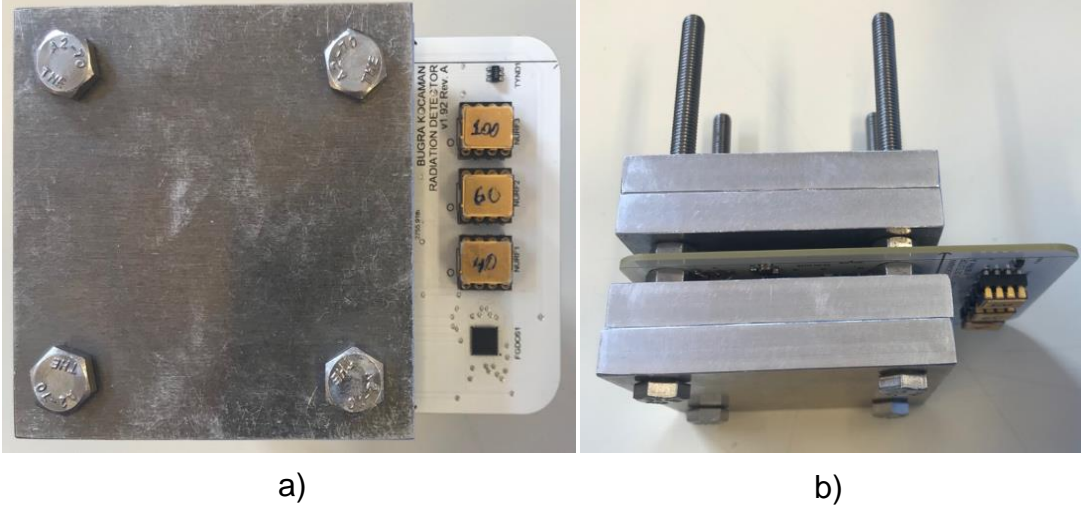
Şekil 3.12’de bu tez kapsamında tasarlanıp üretilmiş olan radyasyon dedektörü gösterilmektedir. Dedektörün sağ tarafında, üstten alt tarafa doğru bir şekilde, sırasıyla RADFET (TYND1), 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü, 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü,, 40 nm oksit tabaka kalınlığına

sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü ve FGDOS sensörleri bulunmaktadır. Dedektörün "sağ tarafı" sensörlerden, "sol tarafı" da elektronik devreden (sensör elektroniğinden) oluşmaktadır.



şekil 3.12. Bu tez kapsamında üretmiş olduğumuz radyasyon dedektörünün nden çekilmiş fotoğrafı

Radyasyon sebebiyle elektronik bileşenlerin olası bozulmalarının önüne geçmek amacıyla, dedektör kartının sensör elektroniği kısmının rahat bir şekilde kalkanlanması amacıyla dedektör bu şekilde tasarlanmıştır.



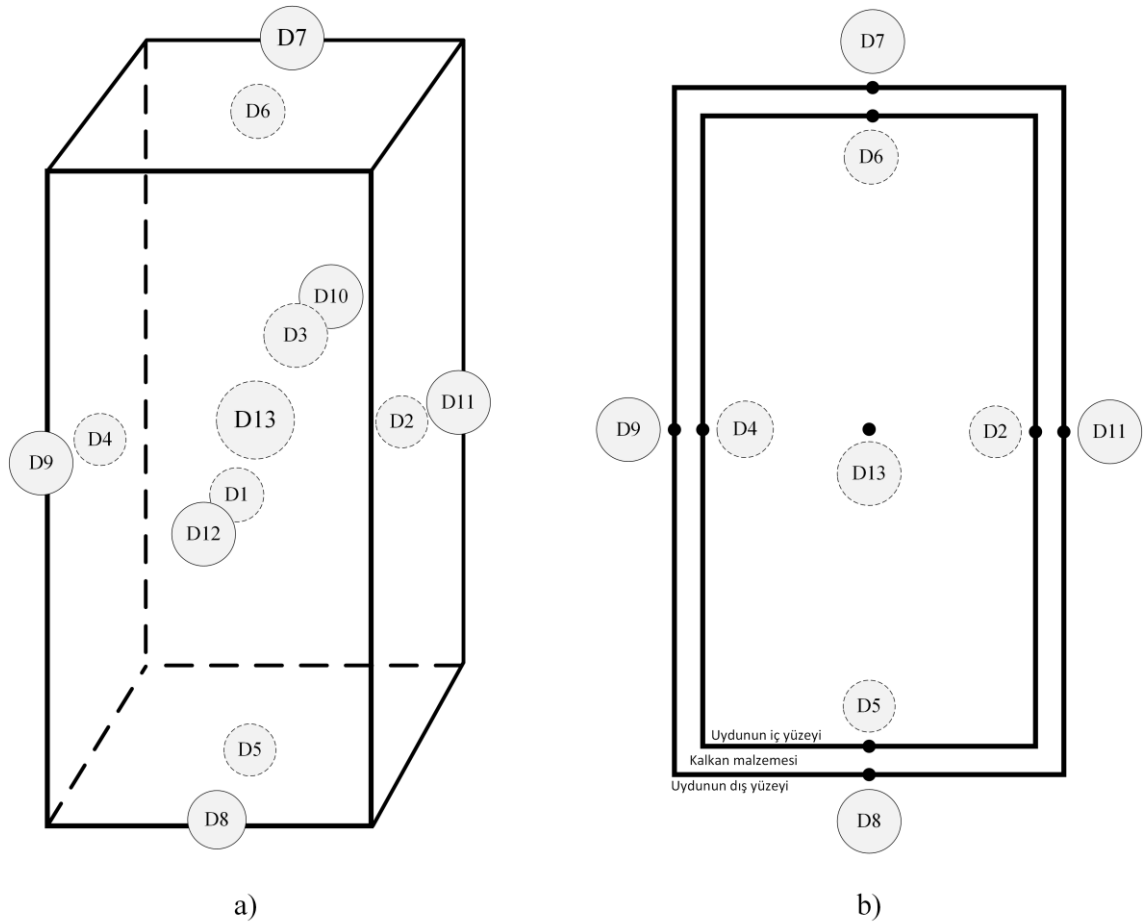
Şekil 3.13. a) Alüminyum plakalarla kalkanlanmış olan dedektörün önden görünüşü, b) kalkanlanmış dedektörün üstten görünüşü

Dedektörün üzerinde, her biri 5 mm kalınlığa sahip dört adet alüminyum plaka kullanılmıştır. Bu plakaların ikisi sensör elektroniğinin ön kısmında, ikisi de sensör elektroniğinin arka kısmında kullanılmıştır. Dedektör üzerinde kullanılan elektronik bileşenler, hazır raf ürünü (commercial off the shelf – COTS) olarak adlandırılan rahatça bulunabilecek elektronik bileşenler olmalarından ötürü radyasyon altında elektronik devrenin bozulmaması adına kalkanlama işlemi yapılmıştır. Bu bileşenlerin (COTS) yerine, radyasyona dayanımlı (Radhard) bileşenler kullanılarak kalkanlamaya ihtiyaç duyulmadan da dedektör tasarlanabilir. Fakat radyasyona dayanımlı bileşenlerin, COTS bileşenlere göre çok pahalı olması sebebiyle maliyet artacaktır.

3.3. Radyasyon Simülasyon Analizleri

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen radyasyon dedektörü uydularda da kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Dedektörün uyduda kullanılmasına yönelik olarak, maruz kalacağı radyasyonu tespit etmek amacıyla radyasyon analizleri yapılmıştır. Bu analiz, dedektörün maruz kalacağı ve muhtemelen maruz kalacağı doz seviyelerini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Analiz, FASTRAD yazılımı (versiyon 3.7.0.0) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uydunun dış yapısal malzemesi olarak dört farklı malzeme tipi seçilmiştir. Polimetil metakrilat (PMMA), silisyum dioksit (SiO_2 - α quartz cam), alüminyum (Al) ve kurşun (Pb) malzemeleri kalkanlama (dış yüzey) malzemeleri olarak seçilmiştir.

Bu malzemelerin her biri için 0,5, 1, 2, 3, 4 ve 5 mm'lik farklı kalınlıklar özelinde bu analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin yapılması için, 10 cm x 10 cm x 30 cm boyutlarına sahip (3U sınıfı) kavramsal bir küp uydu modeli oluşturulmuştur. Bu uydu modeli üzerinde, 13 tane silisyum (Si) nokta dedektörü atanarak (oluşturularak) hem uydunun dışında hem de uydunun içerisinde ne kadarlık bir radyasyon dozuna maruz kalınacağı tespit edilmiştir. 6 nokta uydunun dış yüzeyinde, 6 nokta uydunun iç yüzeyinde, 1 nokta da uydunun tam ortasında olacak şekilde tanımlanmış/atanmıştır [97].

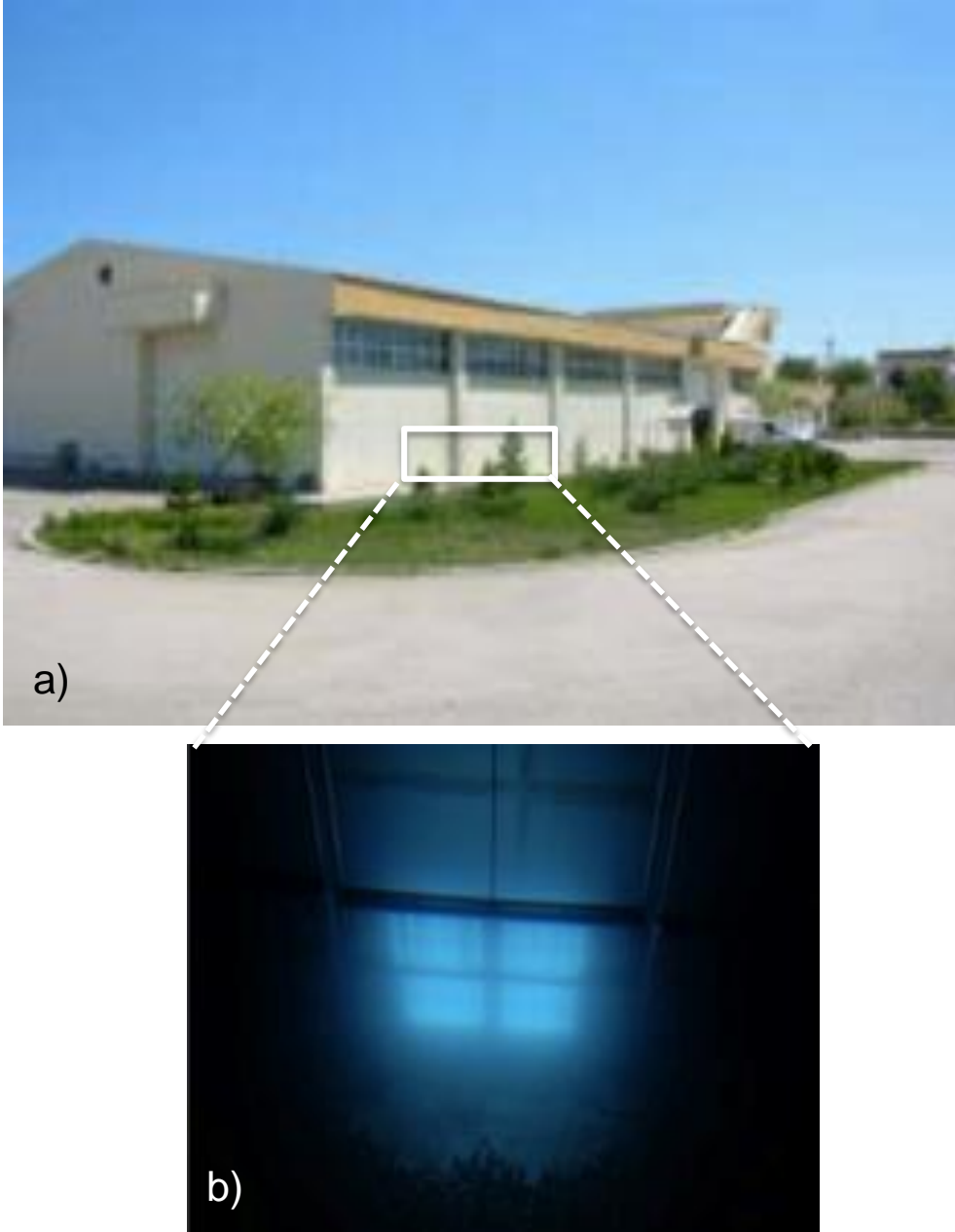


Şekil 3.14. a) Kavramsal uydu modeli üzerinde tanımlanan silisyum nokta dedektörleri (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13), b) uydunun kesit görüntüsü

3.4. Radyasyon Testleri

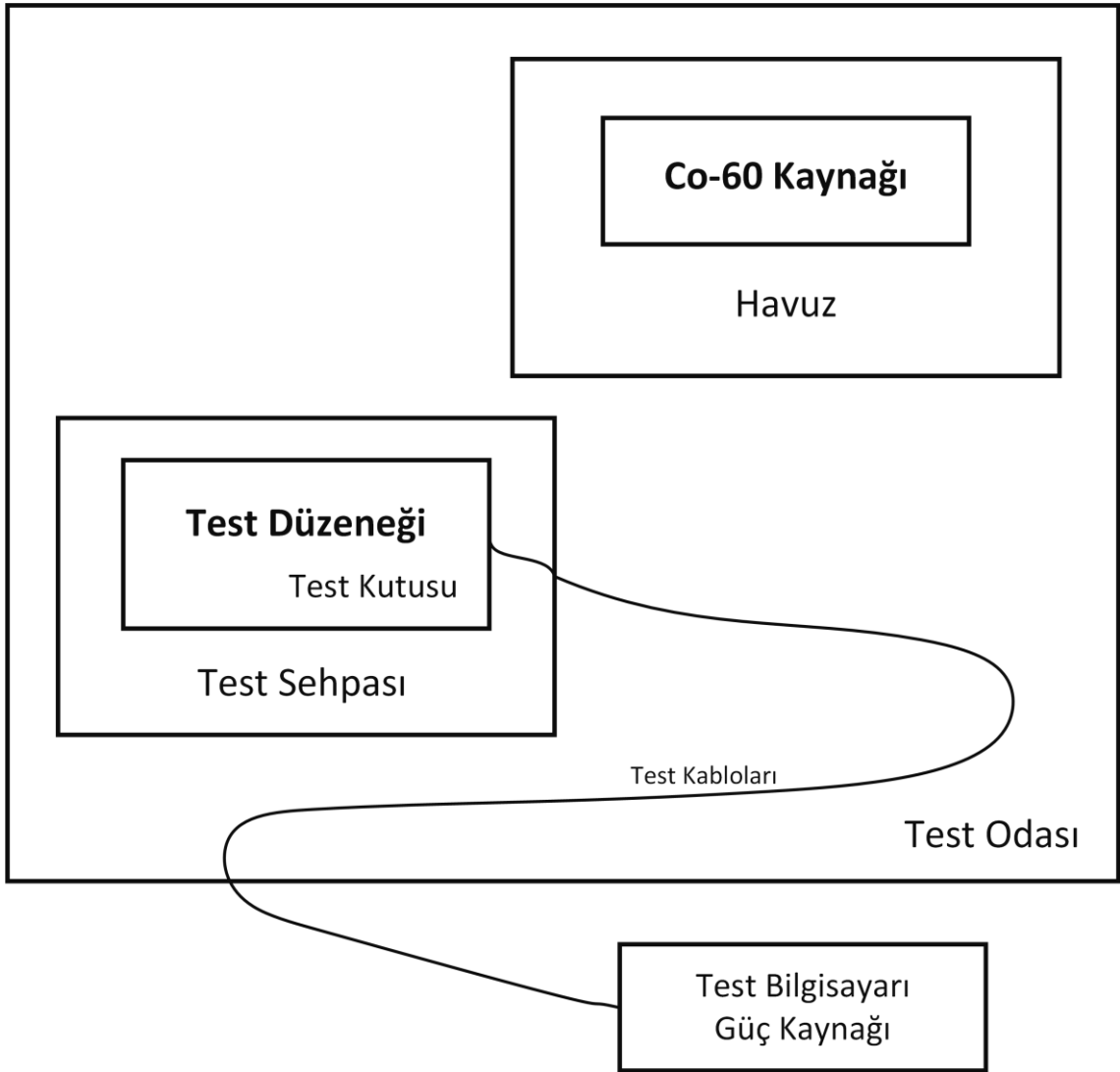
Radyasyon testleri, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (TAEK – SANAEM) bulunmakta olan Kobalt – 60 (Co – 60) radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanımının ve kontrolünün

nispeten diğer radyasyon kaynaklarına göre daha kolay olması sebebiyle, Co-60 Toplam iyonize doz testlerinde en sık kullanılan radyasyon kaynaklarından biridir. Verilen radyasyon dozu, TAEK yetkilileri tarafından 6,6 krad/saat olarak ölçülmüştür. Radyasyon testleri, ESCC (European Space Components Coordination) 22900 radyasyon test standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir [98].



Şekil 3.15. a) TAEK SANAEM gama ışınlama tesisi, b) tesis içerisinde yer alan Co-60 radyasyon kaynağı [99]

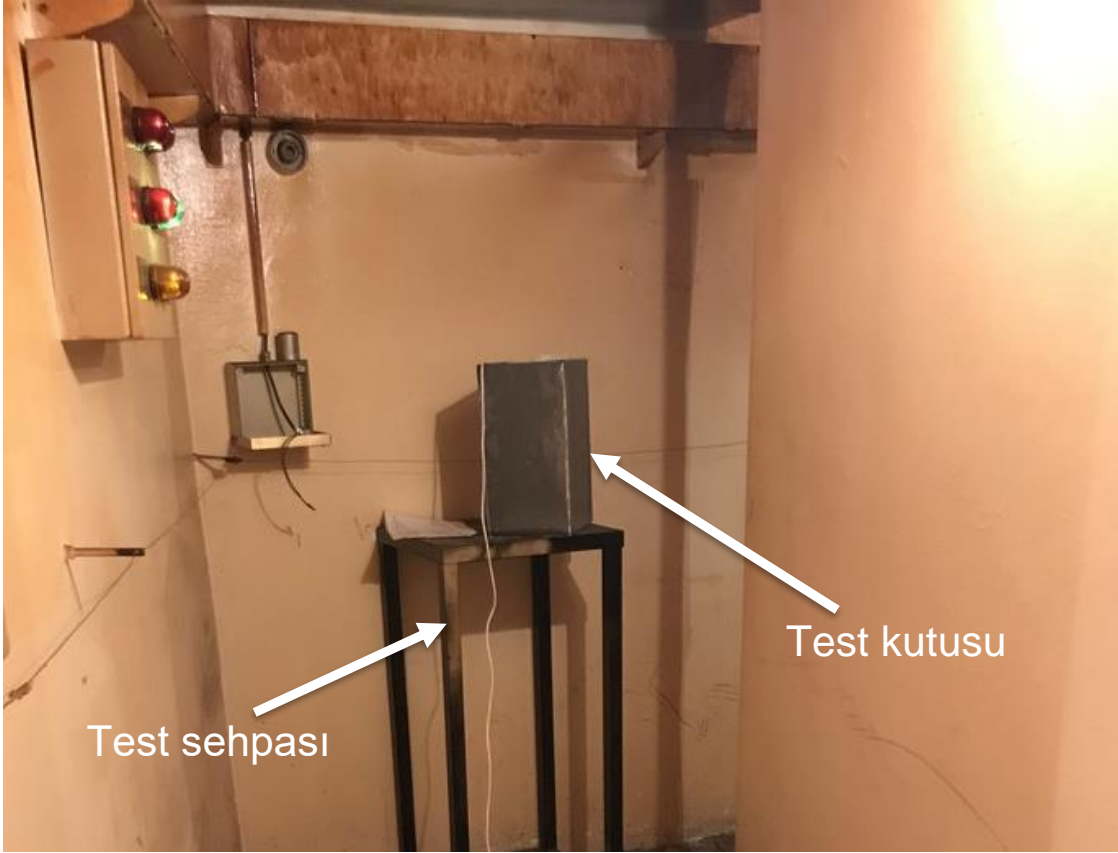
Radyasyon testleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Güç kaynağı ve düzenleyicileri kullanılarak, yaklaşık 15 metre mesafeden radyasyon dedektörüne güç verilmiştir. Radyasyon altında dedektörden alınan veriler, LabView tabanlı yazılım aracılığıyla bilgisayar tarafından kontrol edilerek kayıt altına alınmıştır. Radyasyon kaynağı olarak, Şekil 3.15'te mavi renk ile gösterilmiş olan Co-60 gama ışını kaynağı kullanılmıştır. Bu radyasyon kaynağı radyasyon güvenliği sebebiyle havuzun (suyun) içerisinde tutulmaktadır. Şekil 3.16'da gerçekleştirilmiş olan radyasyon testinin krokisi gösterilmiştir.



Şekil 3.16. TAEK SANAEM'de gerçekleştirilen radyasyon testinin krokisi

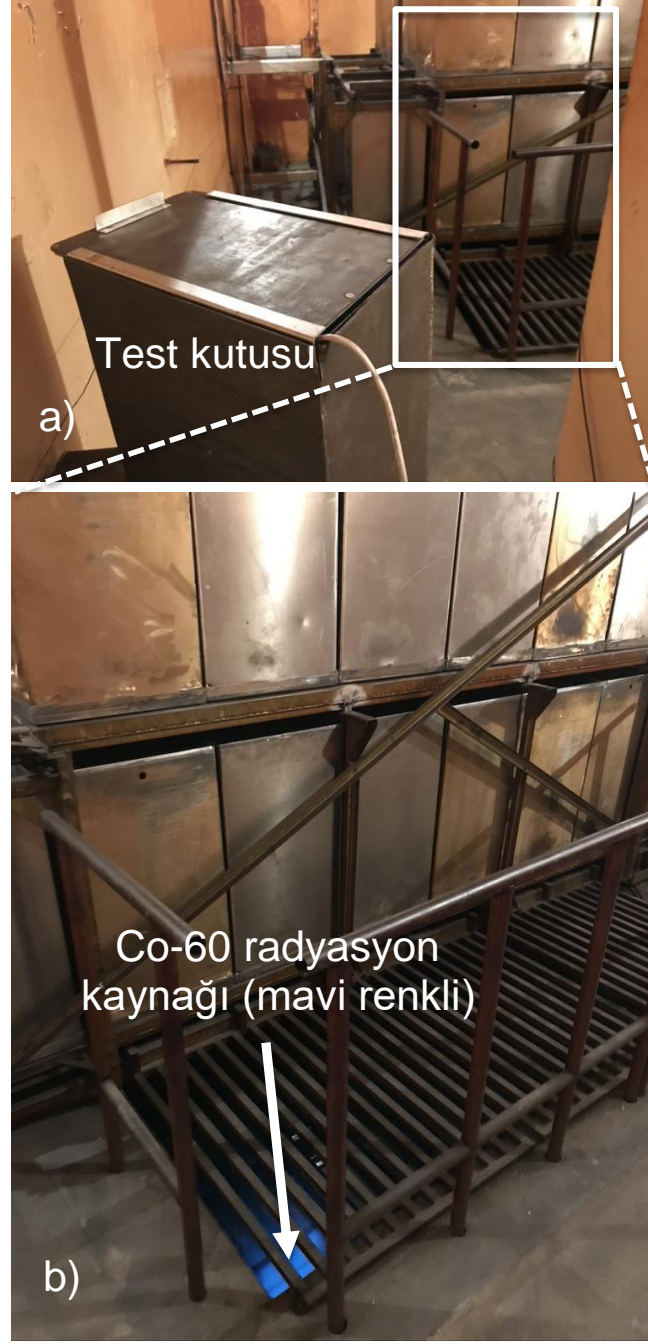
Co-60 radyasyon kaynağının aktivite seviyesi çok yüksek olduğu için, hem testin standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi hem de dedektör elektroniğinin zarar görmemesi adına testler, test sehпасı üzerinde yer alan test kutusu

içerisinde gerçekleştirilmektedir. Test kutusu alüminyum ve kurşun levhalardan oluşmaktadır.



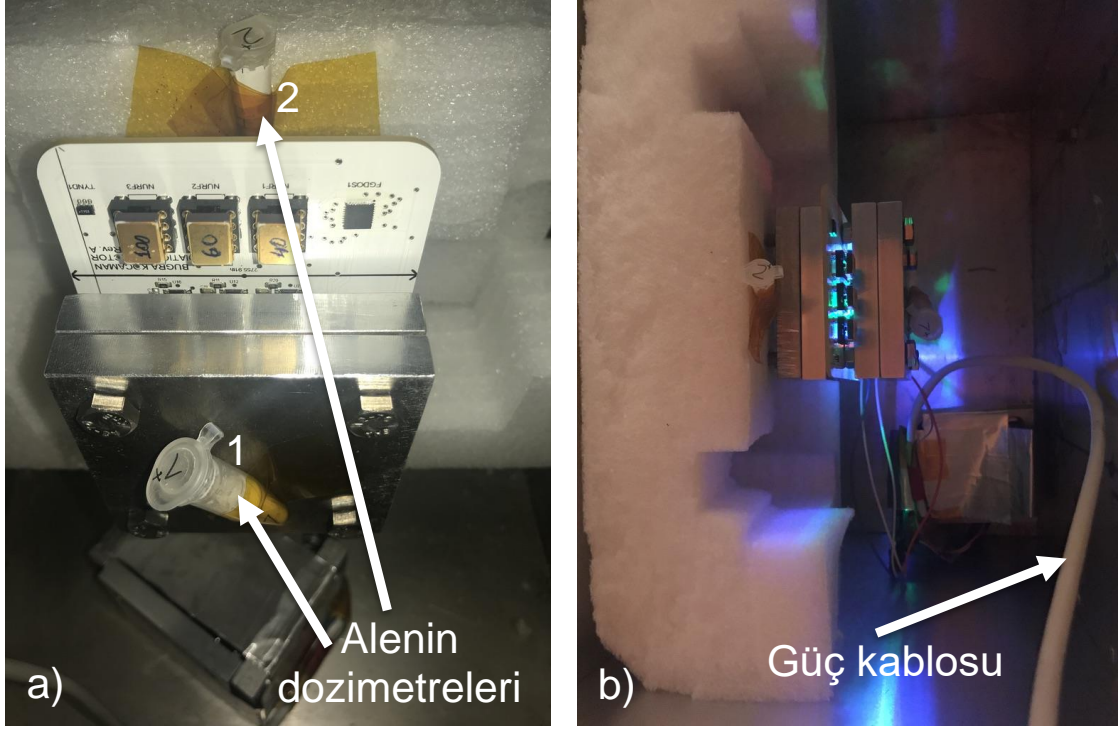
Şekil 3.17. Radyasyon test sehpası ve test kutusu

Radyasyon dedektörünün içerisinde bulunduğu test kutusu, radyasyon kaynağını tam karşıdan göreceğ şekilde ayarlanmıştır. Radyasyon kaynağı suyla dolu havuzun içerisinde bulunmaktadır. Gama ışınları, ışığın su içerisindeki hızını geçmeleri sebebiyle (enerjilerini kaybederken) Çerenkov Radyasyonu veya Çerenkov Işıması adı verilen mavi renkte elektromanyetik ışımaya yapmaktadır. Radyasyon testi esnasında, test odası boşaltılmaktadır. Suyun içerisinde bulunan radyasyon kaynağı suyun içerisinden uzaktan kontrollü bir şekilde çıkartılarak radyasyon testi başlamaktadır. Test esnasında gerekli olan tüm emniyet tedbirleri TAEK yetkilileri ile birlikte alınmaktadır.



Şekil 3.18. a) Test kutusunun Co-60 radyasyon kaynağına göre konumu, b) Co-60 radyasyon kaynağı

Radyasyon testi esnasında dedektör, test kabloları yardımıyla uzaktan enerji verilerek çalıştırılmıştır.



Şekil 3.19. a) Alenin dozimetreleri, b) dedektörün güç kabloları ile enerji verilerek çalıştırılmış hali

Alenin dozimetreleri “1” ve “2” numaralı işaretlenmiş şekilde plastik tüpler içerisinde bulunmaktadır. Elektrostatik boşalmaya (deşarja) sebep olmaması adına, dozimetreler sarı renkli kapton bantlar ile tutturulmuştur. Maruz kalınan radyasyon doz hızı alenin dozimetreleri ile TAEK tarafından 6,6 krad/saat olarak ölçülmüştür.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tezin bu kısmında, radyasyon analizleri sonucu elde edilen simülasyon sonuç değerleri ve radyasyon testleri kapsamında dedektörden alınan (okunan) sonuçlar sunulmuştur.

4.1. Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları

Radyasyon analizleri kapsamında elde edilen sonuçlar bu başlık altında sunulmuştur. Kavramsal bir uydunun, 800 km irtifada, 5 yıllık bir görev ömrüne sahip olduğu varsayılarak bu radyasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Görev parametreleri Çizelge 4.1'de belirtildiği gibi seçilmiştir.

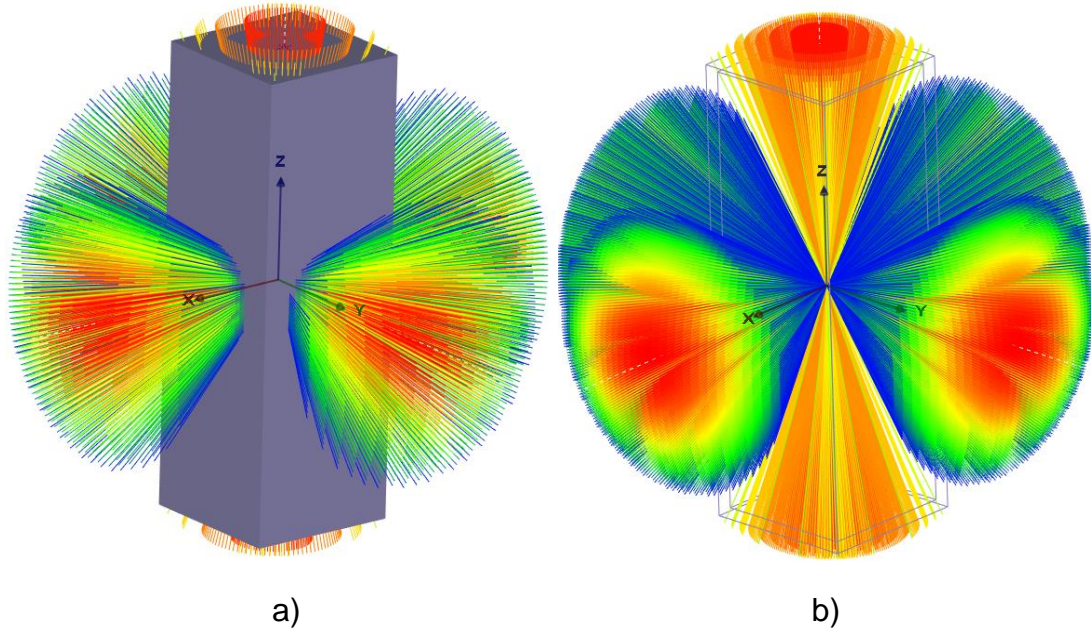
Çizelge 4.1. Uydu yörünge parametreleri

Fırlatma tarihi	Mayıs 2019
Yeröte (apogee) irtifa	800 km
Yerberi (perigee) irtifa	800 km
Eğim (inclination)	98,00°
Yükseliş düğümü açısı (longitude of ascending node)	0,0°
Gerçek ayrıklık açısı (true anomaly)	0,0°
Periyot	100,9 dk
Büyük yarıçap eksenini (semi-major axis)	7178,1 km
Görev süresi	5 yıl

Fırlatma tarihi radyasyon analizlerin başlangıç tarihini, yeröte irtifa uydunun dünyadan en uzakta olduğu noktayı, yerberi irtifa uydunun dünyaya en yakın olduğu noktayı, eğim ekvator düzlemi ile uydunun yörüngesinin yaptığı açıyı, periyot uydunun Dünya çevresini ne kadar sürede aldığını, büyük yarıçap eksenini uydunun dünya merkezine olan uzaklığını, görev süresi de uydunun çalışacağı toplam süreyi temsil etmektedir.

Radyasyon analizlerinde, 4 farklı uydu dış malzeme tipi (PMMA, SiO₂ (cam), alüminyum ve kurşun) seçilip, bu malzemelerin karşılaştırmalı olarak ne kadar radyasyon dozunu tuttuğu (silisyum (Si) nokta dedektörler için ne kadar kalkanlama özelliği gösterdiği) incelenmiştir. Bu radyasyon analizlerindeki amaç, uydu dış yapısalı olarak bu dört farklı malzemenin kullanılması durumunda,

radyasyon dedektörünün yörüngede maruz kalacağı toplam doz seviyelerinin belirlenmesidir.



Şekil 4.1. Radyasyon analiz programından alınan ekran görüntüleri, a) uydunun yapısal görüntüsü , b) uydunun iskelet görüntüsü

Analizlerde belirlenmiş/oluşturulmuş olan 13 nokta (Si) dedektörün her biri için, farklı kalkanlama malzemeleri özelinde maruz kalınan doz değerleri belirlenmiş ve aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Herbir kalkanlama malzemesi için hesaplanan doz değerlerindeki hata payı oranları Monte Carlo simülasyonları sonucu FASTRAD programı tarafından sağlanmıştır.

4.1.1. Polimetil metakrilat (PMMA) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları

PMMA malzemesi için farklı kalınlıklar (0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm 4mm ve 5mm) özelinde yapılmış olan analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Kalkanlama malzemesi olarak seçilen PMMA'nın yoğunluğu 1,180 g/cm³tür. Analizler sonucunda PMMA malzemesi için elde edilen değerlerin belirsizlik oranı %0,5'ten küçüktür.

Çizelge 4.2. 0,5 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	0,5 mm PMMA
D1	270,4 ± 1,3520 krad
D2	270,4 ± 1,3520 krad
D3	271,0 ± 1,3550 krad
D4	271,0 ± 1,3550 krad
D5	267,1 ± 1,3355 krad
D6	267,9 ± 1,3395 krad
D7	6,265 ± 0,0314 Mrad
D8	6,261 ± 0,0313 Mrad
D9	6,249 ± 0,0312 Mrad
D10	6,294 ± 0,0315 Mrad
D11	6,267 ± 0,0313 Mrad
D12	6,263 ± 0,0313 Mrad
D13	291 ± 1,4550 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $291 \pm 1,4550$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3. 1 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	1 mm PMMA
D1	83,88 ± 0,4194 krad
D2	83,91 ± 0,4195 krad
D3	83,85 ± 0,4193 krad
D4	83,48 ± 0,4174 krad
D5	82,80 ± 0,4140 krad
D6	82,82 ± 0,4141 krad
D7	6,248 ± 0,0312 Mrad
D8	6,230 ± 0,0312 Mrad
D9	6,250 ± 0,0313 Mrad
D10	6,246 ± 0,0312 Mrad
D11	6,252 ± 0,0313 Mrad
D12	6,223 ± 0,0312 Mrad
D13	90,56 ± 0,4528 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $90,56 \pm 0,4528$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. 2 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	2 mm PMMA
D1	29,05 ± 0,1452 krad
D2	29,02 ± 0,1451 krad
D3	29,02 ± 0,1451 krad
D4	29,07 ± 0,1453 krad
D5	28,79 ± 0,1439 krad
D6	28,76 ± 0,1438 krad
D7	6,228 ± 0,0311 Mrad
D8	6,225 ± 0,0311 Mrad
D9	6,229 ± 0,0311 Mrad
D10	6,228 ± 0,0311 Mrad
D11	6,230 ± 0,0311 Mrad
D12	6,246 ± 0,0312 Mrad
D13	31,69 ± 0,1585 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $31,69 \pm 0,1585$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. 3 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	3 mm PMMA
D1	$15,59 \pm 0,0779$ krad
D2	$15,58 \pm 0,0779$ krad
D3	$15,66 \pm 0,0783$ krad
D4	$15,59 \pm 0,0779$ krad
D5	$15,52 \pm 0,0776$ krad
D6	$15,47 \pm 0,0774$ krad
D7	$6,208 \pm 0,0310$ Mrad
D8	$6,206 \pm 0,0310$ Mrad
D9	$6,211 \pm 0,0311$ Mrad
D10	$6,217 \pm 0,0311$ Mrad
D11	$6,219 \pm 0,0311$ Mrad
D12	$6,236 \pm 0,0312$ Mrad
D13	$17,03 \pm 0,0852$ krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $17,03 \pm 0,0852$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6. 4 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	4 mm PMMA
D1	9,672 ± 0,0484 krad
D2	9,646 ± 0,0482 krad
D3	9,655 ± 0,0483 krad
D4	9,650 ± 0,0483 krad
D5	9,574 ± 0,0479 krad
D6	9,595 ± 0,0479 krad
D7	6,201 ± 0,0310 Mrad
D8	6,219 ± 0,0310 Mrad
D9	6,209 ± 0,0310 Mrad
D10	6,209 ± 0,0310 Mrad
D11	6,206 ± 0,0310 Mrad
D12	6,208 ± 0,0310 Mrad
D13	10,57 ± 0,0529 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $10,57 \pm 0,0529$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7. 5 mm kalınlığa sahip PMMA için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	5 mm PMMA
D1	6,526 ± 0,0326 krad
D2	6,524 ± 0,0326 krad
D3	6,533 ± 0,0327 krad
D4	6,536 ± 0,0327 krad
D5	6,494 ± 0,0325 krad
D6	6,505 ± 0,0325 krad
D7	6,190 ± 0,0310 Mrad
D8	6,208 ± 0,0310 Mrad
D9	6,193 ± 0,0310 Mrad
D10	6,198 ± 0,0310 Mrad
D11	6,183 ± 0,0309 Mrad
D12	6,222 ± 0,0311 Mrad
D13	7,171 ± 0,0359 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silik silisyum on nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $7,171 \pm 0,0359$ krad olarak tespit edilmiştir.

PMMA malzemesi için yapılmış olan analiz sonuçlarına göre malzeme kalınlıklarının artmasıyla maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

4.1.2. Silisyum Dioksit (SiO_2 - α quartz cam) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları

SiO_2 (α -quartz) malzemesi için farklı kalınlıklar (0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm 4mm ve 5mm) özelinde yapılmış analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, Çizelge 4.9, Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'te verilmiştir. Kalkanlama malzemesi olarak seçilen SiO_2 'nin yoğunluğu $2,648 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Analizler sonucunda SiO_2 malzemesi için elde edilen değerlerin belirsizlik oranı %0,7'den küçüktür.

Çizelge 4.8. 0,5 mm kalınlığa sahip SiO_2 için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	0,5 mm SiO_2
D1	$69,67 \pm 0,4877$ krad
D2	$69,71 \pm 0,4880$ krad
D3	$69,57 \pm 0,4870$ krad
D4	$69,89 \pm 0,4892$ krad
D5	$69,01 \pm 0,4831$ krad
D6	$68,96 \pm 0,4827$ krad
D7	$6,421 \pm 0,0449$ Mrad
D8	$6,400 \pm 0,0448$ Mrad
D9	$6,409 \pm 0,0449$ Mrad
D10	$6,423 \pm 0,0450$ Mrad
D11	$6,406 \pm 0,0448$ Mrad
D12	$6,417 \pm 0,0449$ Mrad
D13	$74,53 \pm 0,5217$ krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $74,53 \pm 0,5217$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9. 1 mm kalınlığa sahip SiO₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	1 mm SiO₂
D1	24,41 ± 0,1709 krad
D2	24,42 ± 0,1709 krad
D3	24,29 ± 0,1700 krad
D4	24,40 ± 0,1708 krad
D5	24,07 ± 0,1685 krad
D6	24,04 ± 0,1683 krad
D7	6,419 ± 0,0449 Mrad
D8	6,439 ± 0,0450 Mrad
D9	6,418 ± 0,0449 Mrad
D10	6,401 ± 0,0448 Mrad
D11	6,409 ± 0,0449 Mrad
D12	6,413 ± 0,0449 Mrad
D13	26,25 ± 0,1838 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $26,25 \pm 0,1838$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. 2 mm kalınlığa sahip SiO₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	2 mm SiO₂
D1	7,868 ± 0,0551 krad
D2	7,862 ± 0,0550 krad
D3	7,856 ± 0,0550 krad
D4	7,880 ± 0,0551 krad
D5	7,777 ± 0,0544 krad
D6	7,769 ± 0,0544 krad
D7	6,414 ± 0,0449 Mrad
D8	6,419 ± 0,0449 Mrad
D9	6,430 ± 0,0450 Mrad
D10	6,434 ± 0,0449 Mrad
D11	6,410 ± 0,0449 Mrad
D12	6,412 ± 0,0449 Mrad
D13	8,504 ± 0,0595 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $8,504 \pm 0,0595$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.11. 3 mm kalınlığa sahip SiO₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	3 mm SiO₂
D1	3,966 ± 0,0278 krad
D2	3,987 ± 0,0279 krad
D3	3,969 ± 0,0278 krad
D4	3,973 ± 0,0278 krad
D5	3,955 ± 0,0277 krad
D6	3,941 ± 0,0276 krad
D7	6,421 ± 0,0449 Mrad
D8	6,423 ± 0,0450 Mrad
D9	6,426 ± 0,0450 Mrad
D10	6,407 ± 0,0448 Mrad
D11	6,425 ± 0,0450 Mrad
D12	6,446 ± 0,0451 Mrad
D13	4,320 ± 0,0302 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $4,320 \pm 0,0302$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.12. 4 mm kalınlığa sahip SiO₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	4 mm SiO₂
D1	2,701 ± 0,0189 krad
D2	2,710 ± 0,0190 krad
D3	2,709 ± 0,0190 krad
D4	2,700 ± 0,0189 krad
D5	2,682 ± 0,0188 krad
D6	2,697 ± 0,0189 krad
D7	6,431 ± 0,0450 Mrad
D8	6,423 ± 0,0450 Mrad
D9	6,426 ± 0,0450 Mrad
D10	6,421 ± 0,0450 Mrad
D11	6,425 ± 0,0450 Mrad
D12	6,417 ± 0,0449 Mrad
D13	2,945 ± 0,0206 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $2,945 \pm 0,0206$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13. 5 mm kalınlığa sahip SiO₂ için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	5 mm SiO ₂
D1	2,215 ± 0,0155 krad
D2	2,220 ± 0,0155 krad
D3	2,220 ± 0,0155 krad
D4	2,212 ± 0,0155 krad
D5	2,205 ± 0,0154 krad
D6	2,204 ± 0,0154 krad
D7	6,427 ± 0,0450 Mrad
D8	6,432 ± 0,0450 Mrad
D9	6,419 ± 0,0450 Mrad
D10	6,424 ± 0,0450 Mrad
D11	6,435 ± 0,0450 Mrad
D12	6,430 ± 0,0450 Mrad
D13	2,428 ± 0,0170 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $2,428 \pm 0,0170$ krad olarak tespit edilmiştir.

SiO₂ (α -quartz) malzemesi için yapılmış olan analiz sonuçlarına göre malzeme kalınlıklarının artmasıyla maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

4.1.3. Alüminyum (Al) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları

Alüminyum (Al) malzemesi için farklı kalınlıklar (0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm 4mm ve 5mm) özelinde yapılmış olan analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.14, Çizelge 4.15, Çizelge 4.16, Çizelge 4.17, Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.19'da verilmiştir. Kalkanlama malzemesi olarak seçilen alüminyumun yoğunluğu $2,70 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Analizler sonucunda alüminyum malzemesi için elde edilen değerlerin belirsizlik oranı %1'den küçüktür.

Çizelge 4.14. 0,5 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	0,5 mm Al
D1	69,81 ± 0,6981 krad
D2	69,74 ± 0,6974 krad
D3	69,60 ± 0,6960 krad
D4	69,85 ± 0,6985 krad
D5	68,92 ± 0,6992 krad
D6	68,80 ± 0,6880 krad
D7	6,482 ± 0,0648 Mrad
D8	6,487 ± 0,0649 Mrad
D9	6,489 ± 0,0649 Mrad
D10	6,495 ± 0,0650 Mrad
D11	6,481 ± 0,0648 Mrad
D12	6,480 ± 0,0648 Mrad
D13	74,39 ± 0,7439 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $74,39 \pm 0,7439$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.15. 1 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	1 mm Al
D1	24,31 ± 0,2431 krad
D2	24,25 ± 0,2425 krad
D3	24,25 ± 0,2425 krad
D4	24,33 ± 0,2433 krad
D5	23,90 ± 0,2390 krad
D6	23,99 ± 0,2399 krad
D7	6,472 ± 0,0647 Mrad
D8	6,493 ± 0,0649 Mrad
D9	6,491 ± 0,0649 Mrad
D10	6,512 ± 0,0651 Mrad
D11	6,515 ± 0,0652 Mrad
D12	6,483 ± 0,0648 Mrad
D13	26,1 ± 0,2610 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $26,1 \pm 0,2610$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.16. 2 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	2 mm Al
D1	$7,774 \pm 0,0777$ krad
D2	$7,768 \pm 0,0777$ krad
D3	$7,754 \pm 0,0775$ krad
D4	$7,748 \pm 0,0775$ krad
D5	$7,671 \pm 0,0767$ krad
D6	$7,689 \pm 0,0769$ krad
D7	$6,499 \pm 0,0650$ Mrad
D8	$6,511 \pm 0,0651$ Mrad
D9	$6,516 \pm 0,0652$ Mrad
D10	$6,511 \pm 0,0651$ Mrad
D11	$6,503 \pm 0,0650$ Mrad
D12	$6,501 \pm 0,0650$ Mrad
D13	$8,356 \pm 0,0836$ krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $8,356 \pm 0,0836$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.17. 3 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	3 mm Al
D1	3,983 ± 0,0398 krad
D2	3,959 ± 0,0396 krad
D3	3,962 ± 0,0396 krad
D4	3,964 ± 0,0396 krad
D5	3,928 ± 0,0393 krad
D6	3,930 ± 0,0393 krad
D7	6,497 ± 0,0650 Mrad
D8	6,512 ± 0,0651 Mrad
D9	6,506 ± 0,0651 Mrad
D10	6,500 ± 0,0650 Mrad
D11	6,506 ± 0,0651 Mrad
D12	6,489 ± 0,0649 Mrad
D13	4,281 ± 0,0428 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $4,281 \pm 0,0428$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.18. 4 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	4 mm Al
D1	2,733 ± 0,0273 krad
D2	2,734 ± 0,0273 krad
D3	2,737 ± 0,0274 krad
D4	2,739 ± 0,0274 krad
D5	2,713 ± 0,0271 krad
D6	2,724 ± 0,0272 krad
D7	6,495 ± 0,0650 Mrad
D8	6,511 ± 0,0651 Mrad
D9	6,501 ± 0,0650 Mrad
D10	6,517 ± 0,0652 Mrad
D11	6,513 ± 0,0651 Mrad
D12	6,511 ± 0,0651 Mrad
D13	2,965 ± 0,0297 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $2,965 \pm 0,0297$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.19. 5 mm kalınlığa sahip alüminyum (Al) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	5 mm Al
D1	$2,269 \pm 0,0227$ krad
D2	$2,273 \pm 0,0227$ krad
D3	$2,265 \pm 0,0227$ krad
D4	$2,270 \pm 0,0227$ krad
D5	$2,281 \pm 0,0228$ krad
D6	$2,257 \pm 0,0226$ krad
D7	$6,516 \pm 0,0652$ Mrad
D8	$6,520 \pm 0,0652$ Mrad
D9	$6,519 \pm 0,0652$ Mrad
D10	$6,506 \pm 0,0651$ Mrad
D11	$6,503 \pm 0,0650$ Mrad
D12	$6,519 \pm 0,0652$ Mrad
D13	$2,472 \pm 0,0247$ krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $2,472 \pm 0,0247$ krad olarak tespit edilmiştir.

Alüminyum malzemesi için yapılmış olan analiz sonuçlarına göre malzeme kalınlıklarının artmasıyla maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

4.1.4. Kurşun (Pb) Uydu Dış Malzemesi İçin Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçları

Kurşun (Pb) malzemesi için farklı kalınlıklar (0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm 4mm ve 5mm) özelinde yapılmış olan analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.20, Çizelge 4.21, Çizelge 4.22, Çizelge 4.23, Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25'te verilmiştir. Kalkanlama malzemesi olarak seçilen Pb'nin yoğunluğu 11,35 g/cm³'tür. Analizler sonucunda kurşun malzemesi için elde edilen değerlerin belirsizlik oranı %3,2'den küçüktür.

Çizelge 4.20. 0,5 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	0,5 mm Pb
D1	5,330 ± 0,1706 krad
D2	5,344 ± 0,1710 krad
D3	5,369 ± 0,1718 krad
D4	5,352 ± 0,1713 krad
D5	5,330 ± 0,1706 krad
D6	5,301 ± 0,1696 krad
D7	7,135 ± 0,2283 Mrad
D8	7,123 ± 0,2279 Mrad
D9	7,124 ± 0,2280 Mrad
D10	7,107 ± 0,2274 Mrad
D11	7,127 ± 0,2281 Mrad
D12	7,110 ± 0,2275 Mrad
D13	5,822 ± 0,1863 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi 5,822 ± 0,1863 krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.21. 1 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	1 mm Pb
D1	3,020 ± 0,0966 krad
D2	3,023 ± 0,0967 krad
D3	3,013 ± 0,0964 krad
D4	3,000 ± 0,0960 krad
D5	2,980 ± 0,0954 krad
D6	2,991 ± 0,0957 krad
D7	7,125 ± 0,2280 Mrad
D8	7,101 ± 0,2272 Mrad
D9	7,132 ± 0,2282 Mrad
D10	7,139 ± 0,2284 Mrad
D11	7,113 ± 0,2276 Mrad
D12	7,110 ± 0,2275 Mrad
D13	3,270 ± 0,1046 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $3,270 \pm 0,1046$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.22. 2 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	2 mm Pb
D1	2,231 ± 0,0714 krad
D2	2,236 ± 0,0716 krad
D3	2,237 ± 0,0716 krad
D4	2,232 ± 0,0714 krad
D5	2,230 ± 0,0714 krad
D6	2,214 ± 0,0708 krad
D7	7,117 ± 0,2277 Mrad
D8	7,111 ± 0,2275 Mrad
D9	7,124 ± 0,2280 Mrad
D10	7,119 ± 0,2278 Mrad
D11	7,112 ± 0,2276 Mrad
D12	7,095 ± 0,2270 Mrad
D13	2,428 ± 0,0777 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $2,428 \pm 0,0777$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.23. 3 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	3 mm Pb
D1	$1,896 \pm 0,0607$ krad
D2	$1,892 \pm 0,0605$ krad
D3	$1,898 \pm 0,0607$ krad
D4	$1,873 \pm 0,0599$ krad
D5	$1,866 \pm 0,0597$ krad
D6	$1,876 \pm 0,0600$ krad
D7	$7,117 \pm 0,2277$ Mrad
D8	$7,091 \pm 0,2269$ Mrad
D9	$7,106 \pm 0,2273$ Mrad
D10	$7,117 \pm 0,2277$ Mrad
D11	$7,116 \pm 0,2277$ Mrad
D12	$7,108 \pm 0,2275$ Mrad
D13	$2,067 \pm 0,0661$ krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $2,067 \pm 0,0661$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.24. 4 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	4 mm Pb
D1	1,652 ± 0,0529 krad
D2	1,657 ± 0,0530 krad
D3	1,651 ± 0,0528 krad
D4	1,661 ± 0,0532 krad
D5	1,661 ± 0,0532 krad
D6	1,640 ± 0,0525 krad
D7	7,110 ± 0,2275 Mrad
D8	7,104 ± 0,2273 Mrad
D9	7,115 ± 0,2277 Mrad
D10	7,105 ± 0,2274 Mrad
D11	7,117 ± 0,2277 Mrad
D12	7,126 ± 0,2280 Mrad
D13	1,839 ± 0,0588 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $1,839 \pm 0,0588$ krad olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.25. 5 mm kalınlığa sahip kurşun (Pb) için elde edilen toplam iyonize doz analiz sonuçları

Dedektör	5 mm Pb
D1	1,478 ± 0,0473 krad
D2	1,509 ± 0,0482 krad
D3	1,477 ± 0,0473 krad
D4	1,475 ± 0,0473 krad
D5	1,460 ± 0,0467 krad
D6	1,474 ± 0,0472 krad
D7	7,114 ± 0,2276 Mrad
D8	7,101 ± 0,2272 Mrad
D9	7,125 ± 0,2280 Mrad
D10	7,137 ± 0,2283 Mrad
D11	7,114 ± 0,2276 Mrad
D12	7,123 ± 0,2279 Mrad
D13	1,641 ± 0,0525 krad

Uydu dış yüzeyinde tanımlanmış olan D7, D8, D9, D10, D11 ve D12 silisyum nokta dedektörlerinin uydu iç yüzeyinde tanımlanmış olan D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 silisyum nokta dedektörlerine göre daha fazla radyasyona maruz kalacağı gösterilmiştir. Uydunun tam orta noktası için tanımlanmış olan D13 silisyum nokta dedektörüne göre maruz kalınacak olan doz seviyesi $1,641 \pm 0,0525$ krad olarak tespit edilmiştir.

Kurşun malzemesi için yapılmış olan analiz sonuçlarına göre malzeme kalınlıklarının artmasıyla maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

4.1.5. Radyasyon Simülasyon Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yörüngede maruz kalınan radyasyon dozu uydu dış yapısalı tipi (kalkanlama malzemesi), yörünge, görev süresi gibi durumlara bağlı olarak değişmektedir [100, 101]. Radyasyon analizlerinden elde edilen sonuçlara göre malzeme yoğunluğu arttıkça malzemelerin kalkanlama yeteneği de artmaktadır. Yüksek enerjili parçacıkların, malzeme içinde, malzeme yoğunluklarıyla ters orantılı olarak hareket etmesi (mesafe kat etmesi) sebebiyle yüksek yoğunluğa sahip malzemelerin kalkanlama özelliği daha iyi olmaktadır [102]. Maruz kalınan radyasyon doz seviyeleri direkt olarak uydu ve görevi özelinde değişmesiyle (belirlenmesiyle) birlikte, elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış olan analiz sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir [103, 104]. Kalkanlama veya uydu dış yapısalı malzemesi olarak seçilen bu dört malzemedan, en yüksek kalkanlama özelliğini kurşun (Pb), en düşük kalkanlama özelliğini ise PMMA malzemesi gösterdiği tespit edilmiştir.

4.2. Radyasyon Testleri Sonuçları

Radyasyon testi (ışınlama) iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada (ışınlamada), üç sensör de (FGDOS, RADFET ve nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü) başarılı bir şekilde çalıştırılıp radyasyon altında ölçümler alınmıştır. FGDOS sensörünün yüksek radyasyon dozu sebebiyle kendini tekrar çalıştıramaması tüm elektronik devrenin tıkanmasına (dedektörden mantıklı sonuç alınamamasına) sebep olmuştur. Bu nedenle, FGDOS sensörü ikinci ışınlama aşamasında yazılım aracılığıyla dedektör devresinden çıkarılmıştır. İlk

ışınlama 256 saniye, ikinci ışınlama 416 saniye sürmüştür. Radyasyon testinin ikinci aşamasında RADFET ve nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerden sonuçlar alınmıştır.

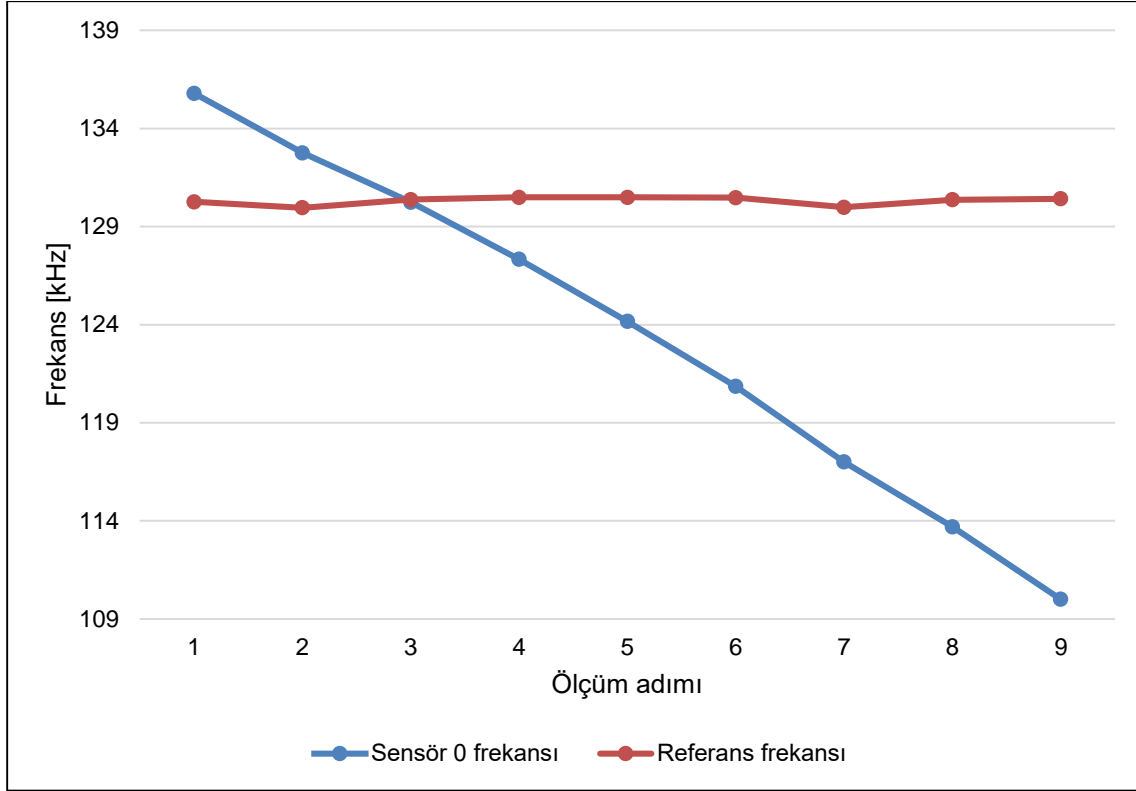
Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerin uzay uygulamalarına yönelik olarak, radyasyon altında gerçek zamanlı bir şekilde test edilmesi ilk defa bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin oksit tabaka kalınlıkları 40 nm, 60 nm ve 100 nm olarak büyütülmüştür.

RADFET ve nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerin, radyasyona maruz kaldıkça eşik gerilim değerlerinin kayması beklendiği gibi bu tez çalışmasında da tespit edilmiş ve sunulmuştur. FGDOS, RADFET ve nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi radyasyon sensörlerinin her birinden alınan sonuçlar ilgili sensör başlıklarının altında verilmiştir.

4.2.1. FGDOS Radyasyon Sensörüne Yönelik Radyasyon Testi ve Ölçüm Sonuçları

FGDOS sensörünün frekansı radyasyona maruz kaldıkça değişmektedir ve frekansta meydana gelen bu değişim maruz kalınan radyasyon ile orantılıdır [106]. FGDOS sensörü içten yedekliliğe sahip bir radyasyon sensörüdür. Sensör 0 ve Sensör 1 olarak adlandırılan bu sensörlerin ikisinden de radyasyon altında ölçüm alınmış ve aşağıdaki gibi sunulmuştur. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. FGDOS sensörünün radyasyon hassasiyeti 5 kHz/Gy'dir. Sensör her 1 Gy'lik (100 rad) doza maruz kaldığında, frekansı 5 kHz azalmaktadır. FGDOS sensörünün üreticisi tarafından yaklaşık olarak 0,5 kHz'lik bir hata payı olduğu bildirilmiştir.

İşınlama öncesi, Sensör 0'ın frekansı 135,798 kHz'e kadar şarj edilmiştir. 256 saniyelik ilk ışınlama sonrası FGDOS Sensör 0'ın frekansı 110,002 kHz'e düşmüştür. İlk ışınlama sonrası sensör frekansındaki değişim 25,796 kHz olarak ölçülmüştür. Sensör hassasiyeti, 5 kHz/Gy (5.000 Hz/100 rad) olduğu için, ilk ışınlamada maruz kalınan radyasyon dozu 516 ± 10 rad olarak ölçülmüştür. FGDOS Sensör 0'dan radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 0'a ait ölçüm sonuçları

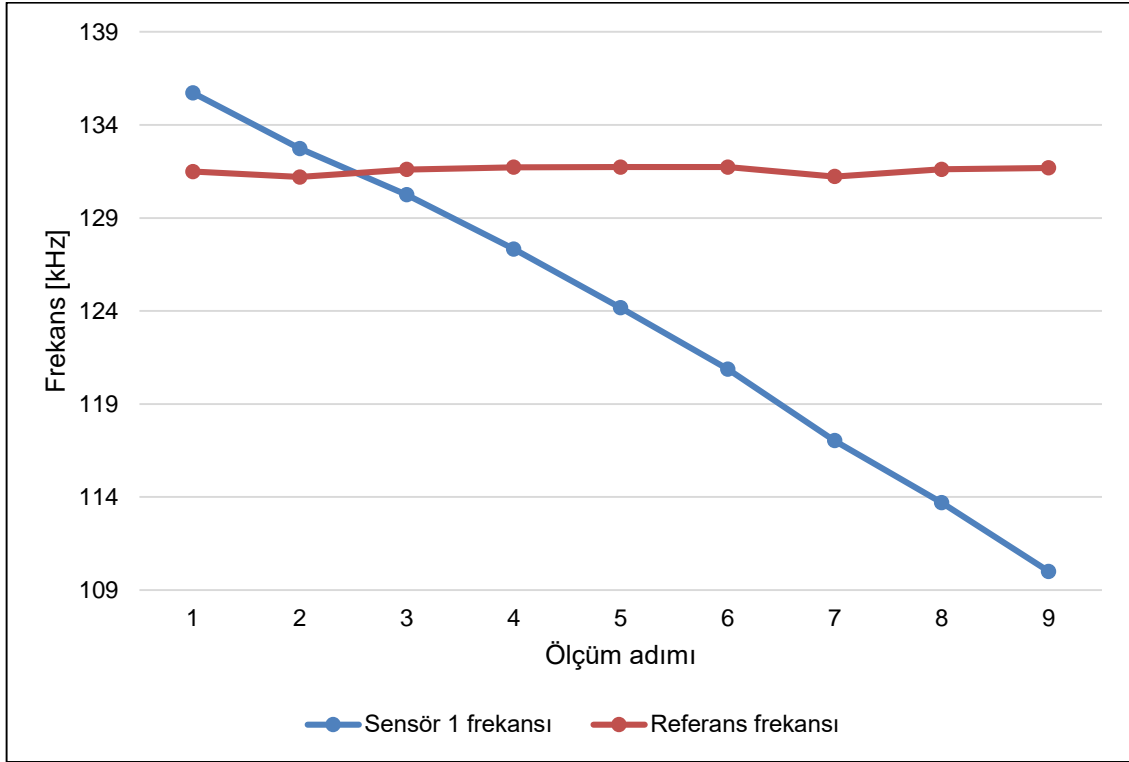
Her bir ölçüm adımı için FGDOS Sensör 0'dan alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.26'da verilmiştir.

Çizelge 4.26. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 0'a ait ölçüm sonuçları

Ölçüm Adımı	Frekans (kHz)
1	135,798 ± 0,5
2	132,763 ± 0,5
3	130,250 ± 0,5
4	127,336 ± 0,5
5	124,171 ± 0,5
6	120,853 ± 0,5
7	117,003 ± 0,5
8	113,699 ± 0,5
9	110,002 ± 0,5

Işınlama öncesi, Sensör 1'in frekansı ise 135,723 kHz'e kadar şarj edilmiştir. 256 saniyelik ilk ışınlama sonrası FGDOS Sensör 1'in frekansı 110,002 kHz'e düşmüştür. İlk ışınlama sonrası sensör frekansındaki değişim 25,721 kHz olarak ölçülmüştür. Sensör hassasiyeti, 5 kHz/Gy (5.000 Hz/100 rad) olduğu için, ilk

ışınlamada maruz kalınan radyasyon dozu 514 ± 10 rad olarak ölçülmüştür. FGDOS Sensör 1'den radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 1'e ait ölçüm sonuçları

Her bir ölçüm adımı için FGDOS Sensör 1'den alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.27. Tedarik edilen tarihçeli FGDOS içerisinde yer alan Sensör 1'e ait ölçüm sonuçları

Ölçüm Adımı	Frekans (kHz)
1	135,723 ± 0,5
2	132,735 ± 0,5
3	130,249 ± 0,5
4	127,328 ± 0,5
5	124,171 ± 0,5
6	120,873 ± 0,5
7	117,030 ± 0,5
8	113,699 ± 0,5
9	110,002 ± 0,5

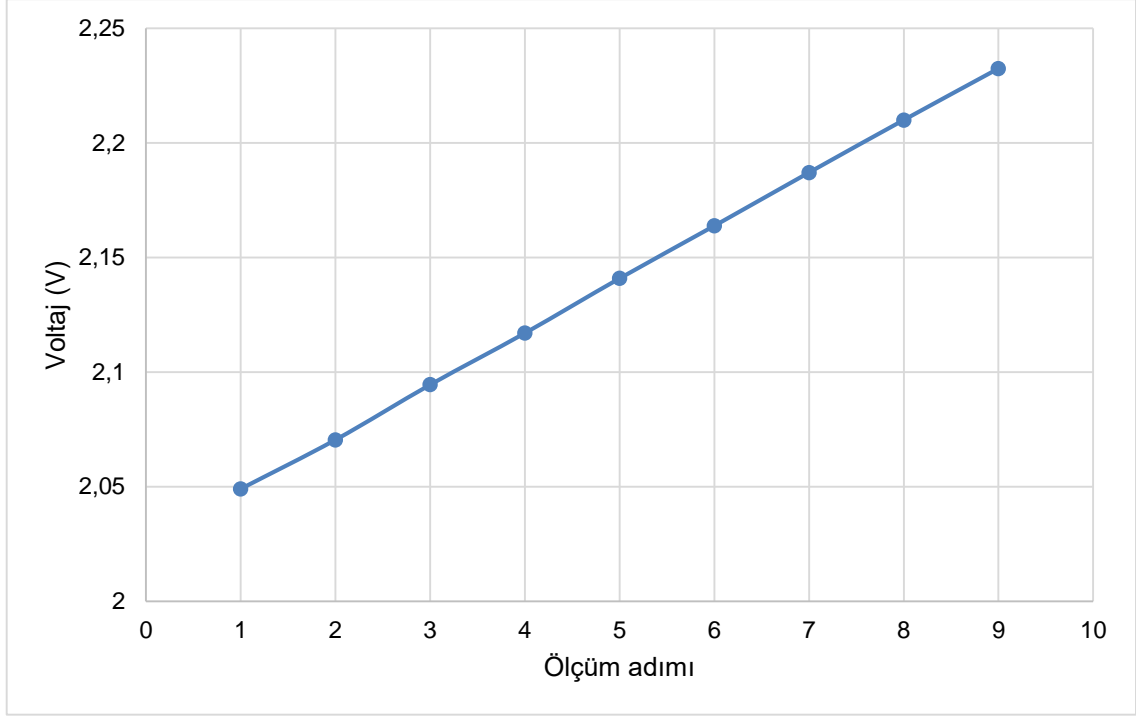
Sensör, radyasyona maruz kaldıkça yükler deşarj olmakta ve bu yük değişimi frekans değişimi şeklinde okunmaktadır. FGDOS sensöründen bu tez

kapsamında alınan ölçümlerin (ölçülen doz değerlerinin) literatürde yapılmış olan daha önceki çalışmalar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir [105 – 107].

FGDOS sensöründen alınan sonuçlar elektronik devrenin başarılı bir şekilde çalıştırıldığını da göstermektedir. FGDOS sensörü; yedekli yapıda olması, elektronik kart üzerinde küçük yer kaplaması (5 mm (en) x 5 mm (boy)) ve düşük hata oranı ile ölçüm yapılabilmesi gibi birçok avantaj sunmaktadır.

4.2.2. RADFET Radyasyon Sensörüne Yönelik Radyasyon Testi ve Ölçüm Sonuçları

RADFET sensörü 10 μ A'lık sabit akım kaynağı ile birlikte kullanılmıştır ve sensörün ışınlama öncesi voltajı 2,049060 V olarak ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra RADFET sensörünün voltajı 2,232506 V olarak ölçülmüştür. RADFET sensörünün üreticisi (Varadis) tarafından sağlanan veri föyünde (EK 2) yer alan denklemler kullanılarak maruz kalınan radyasyon dozu $396 \pm 3,962$ rad olarak ölçülmüştür. RADFET sensöründen radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ilk ışınlama)

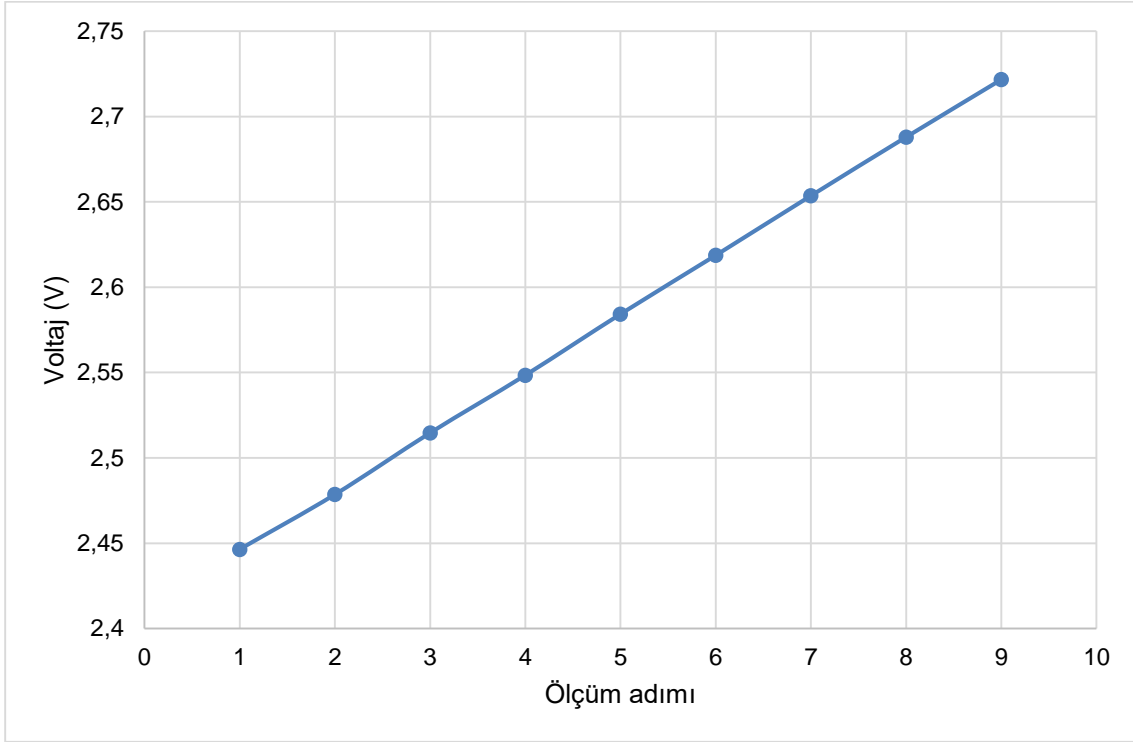
İlk ışınlama aşamasında her bir ölçüm adımı için RADFET sensöründen alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.28. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	2,049060 ± 0,020499
2	2,070456 ± 0,020713
3	2,094504 ± 0,020953
4	2,117037 ± 0,021179
5	2,140908 ± 0,021418
6	2,163848 ± 0,021647
7	2,187127 ± 0,021880
8	2,210033 ± 0,022109
9	2,232506 ± 0,022334

İkinci ışınlama öncesi RADFET sensörünün başlangıç voltajı 2,446466 V olarak ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İkinci ışınlama sonrası RADFET’in voltajı 2,721635 V olarak ölçülmüştür. RADFET sensörünün üreticisi (Varadis) tarafından sağlanan veri föylerinde (datasheet) yer alan

denklemler kullanılarak ikinci ışınlamadaki maruz kalınan radyasyon dozu $618 \pm 6,182$ rad olarak ölçülmüştür. RADFET sensöründen radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ikinci ışınlama)

İkinci ışınlama aşamasında her bir ölçüm adımı için RADFET sensöründen alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.29'da verilmiştir.

Çizelge 4.29. Tedarik edilen tarihçeli RADFET sensörüne ait ölçüm sonuçları (ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	$2,446466 \pm 0,024474$
2	$2,478560 \pm 0,024796$
3	$2,514632 \pm 0,025156$
4	$2,548431 \pm 0,025495$
5	$2,584238 \pm 0,025853$
6	$2,618648 \pm 0,026197$
7	$2,653566 \pm 0,026546$
8	$2,687925 \pm 0,026890$
9	$2,721635 \pm 0,027227$

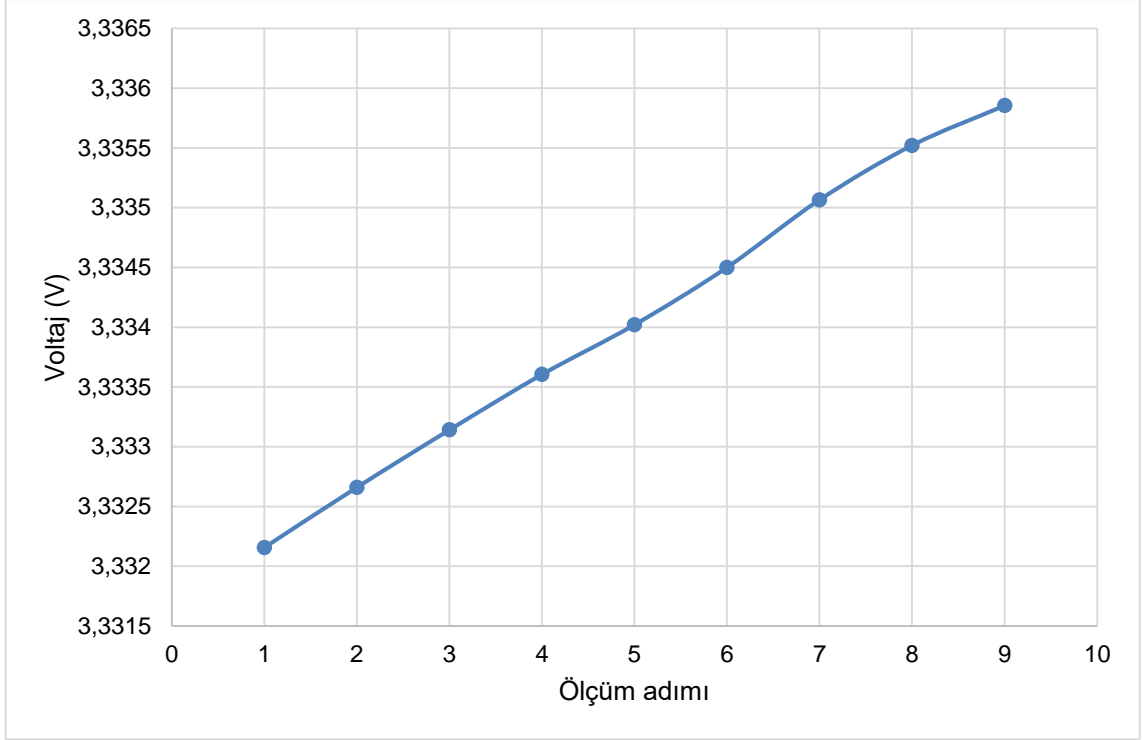
Sensörler radyasyona maruz kaldıkça, eşik gerilim (voltaj) değerleri değişmektedir. Oksit tabakada radyasyon sebebiyle oluşan yükler RADFET sensörünün eşik voltajında kaymalara sebep olmuştur ve eşik voltajlardaki bu kayma miktarı maruz kalınan radyasyon dozu ile orantılıdır. RADFET sensöründen bu tez kapsamında alınan ölçümlerin (ölçülen doz değerlerinin) literatürde yapılmış olan daha önceki çalışmalar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir [108, 109]. RADFET sensöründen alınan sonuçlar elektronik devrenin başarılı bir şekilde çalıştırıldığını da göstermektedir.

4.2.3. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörlerine Yönelik Radyasyon Testi Ve Ölçüm Sonuçları

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi radyasyon sensörleri iki aşamalı olarak radyasyona tabi tutulmuştur. Radyasyon testinin ilk basamağı 256 saniye, ikinci basamağı ise 416 saniye sürmüştür. Oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla birlikte radyasyona olan hassasiyetin arttığı gösterilmiştir [110, 111]. Metal oksit yarı iletken teknolojisine sahip malzemelerin radyasyona maruz kalma sonucu eşik gerilim değerinin kayması birçok çalışma ile gösterilmiştir [112, 113]. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların literatürde belirtilen çalışmalar/sonuçlar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir [114]. NÜRDAM tarafından, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerin 10 μ A'lık sabit akım kaynağı ile çalıştırılmaları (okunmaları) önerilmektedir. Bununla birlikte, uzay çevre koşulları sebebiyle 10 μ A gibi düşük akımların verilmesi çok mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, uydu sistemlerinde (elektronğinde) kullanmanın göreceli olarak daha uygulanabilir olduğu 100 μ A'lık ikinci bir sabit akım kaynağı kullanılarak, 100 μ A'lık sabit akım kaynağı ile nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörlerin çalıştırılıp/çalıştırılmayacağı ve olası ne gibi etkilerin görülebileceği de incelenmiştir.

4.2.3.1. Oksit Tabaka Kalınlığı 40 nm Olan Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörü İçin Radyasyon Testi Sonuçları

İlk ışınlama öncesi oksit tabaka kalınlığı 40 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 3,332157 V olarak ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün voltajı 3,335855 V olarak ölçülmüştür. 10 μ A ile çalıştırılan 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



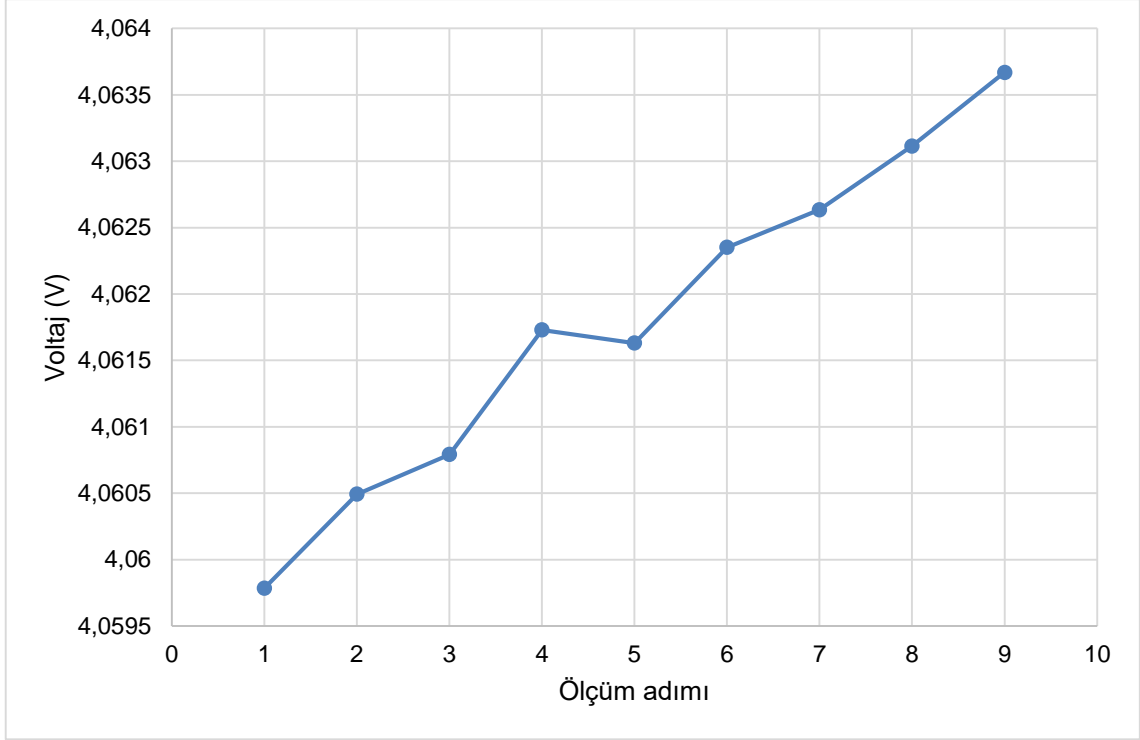
Şekil 4.6. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)

İlk ışınlama aşamasında 10 μ A ile her bir ölçüm adımı için 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.30. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	3,332157 \pm 0,034135
2	3,332660 \pm 0,034140
3	3,333141 \pm 0,034145
4	3,333605 \pm 0,034149
5	3,334021 \pm 0,034154
6	3,334501 \pm 0,034159
7	3,335066 \pm 0,034164
8	3,335522 \pm 0,034169
9	3,335855 \pm 0,034173

Oksit tabaka kalınlığı 40 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün ilk ışınlama öncesi gerilimi 100 μ A ile 4,059785 V olarak ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra oksit tabaka kalınlığı 40 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün voltajı 4,063669 V olarak ölçülmüştür. 100 μ A ile çalıştırılan 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

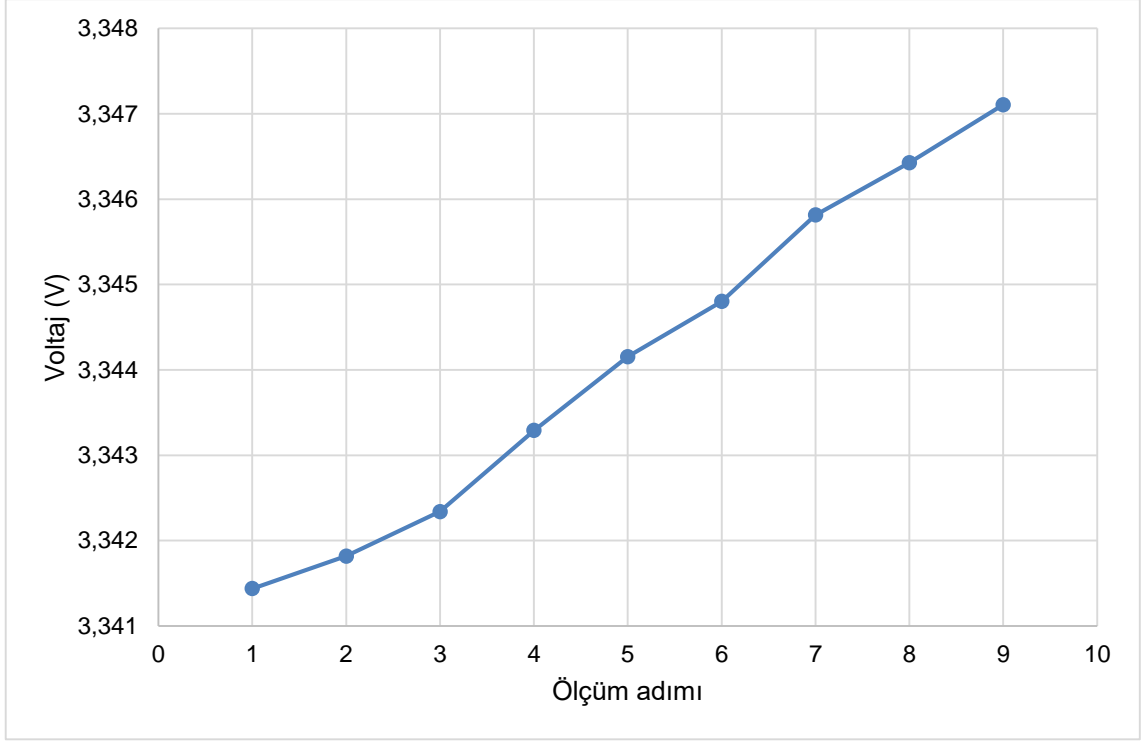


Şekil 4.7. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama) İlk ışınlama aşamasında 100 μ A ile her bir ölçüm adımı için 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.31. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	4,059785 ± 0,021290
2	4,060493 ± 0,021293
3	4,060792 ± 0,021295
4	4,061730 ± 0,021299
5	4,061630 ± 0,021299
6	4,062352 ± 0,021303
7	4,062635 ± 0,021304
8	4,063114 ± 0,021307
9	4,063669 ± 0,021310

İkinci ışınlama öncesi oksit tabaka kalınlığı 40 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 3,341438 V olarak ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İkinci ışınlamadan sonra 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 3,347106 V olarak ölçülmüştür. 10 μ A ile çalıştırılan 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



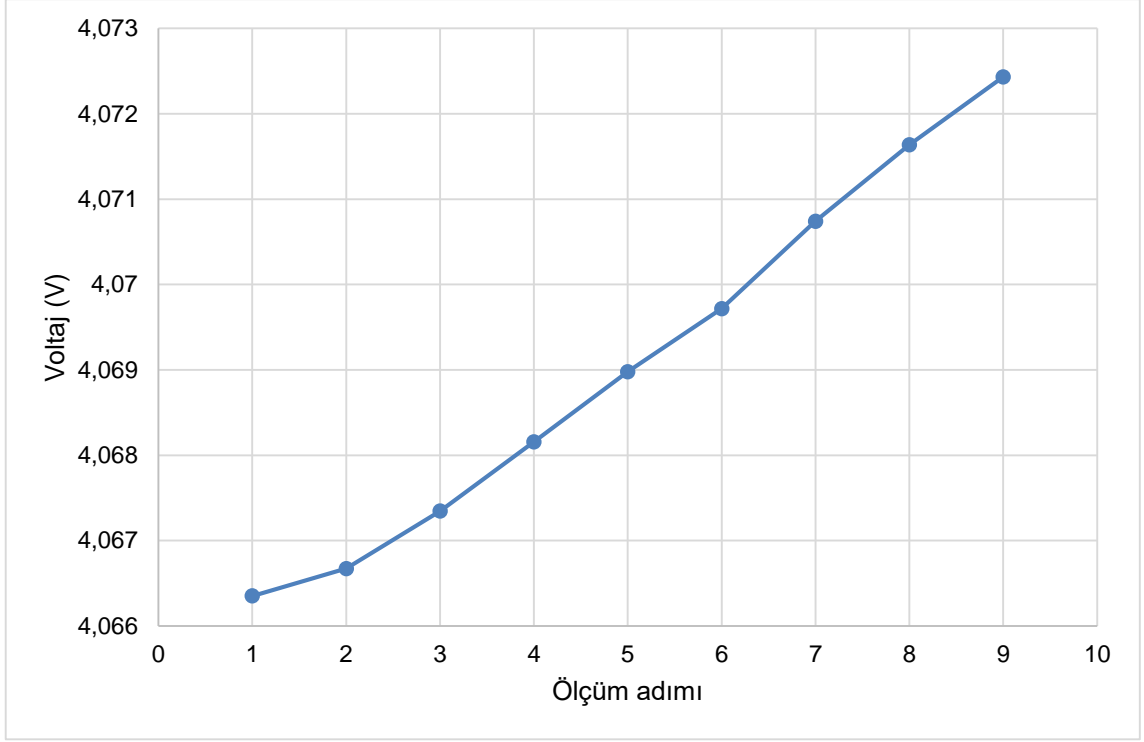
Şekil 4.8. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)

İkinci ışınlama aşamasında 10 μ A ile her bir ölçüm adımı için 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.32’de verilmiştir.

Çizelge 4.32. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	3,341438 \pm 0,034230
2	3,341818 \pm 0,034234
3	3,342340 \pm 0,034239
4	3,343290 \pm 0,034249
5	3,344154 \pm 0,034258
6	3,344801 \pm 0,034264
7	3,345815 \pm 0,034275
8	3,346427 \pm 0,034281
9	3,347106 \pm 0,034288

Oksit tabaka kalınlığı 40 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün ikinci ışınlama öncesi gerilimi 100 μ A ile 4,066351 V olarak ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İkinci ışınlamadan sonra 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün gerilimi 4,072432 V olarak ölçülmüştür. 100 μ A ile çalıştırılan 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistörü tipi sensörün radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)

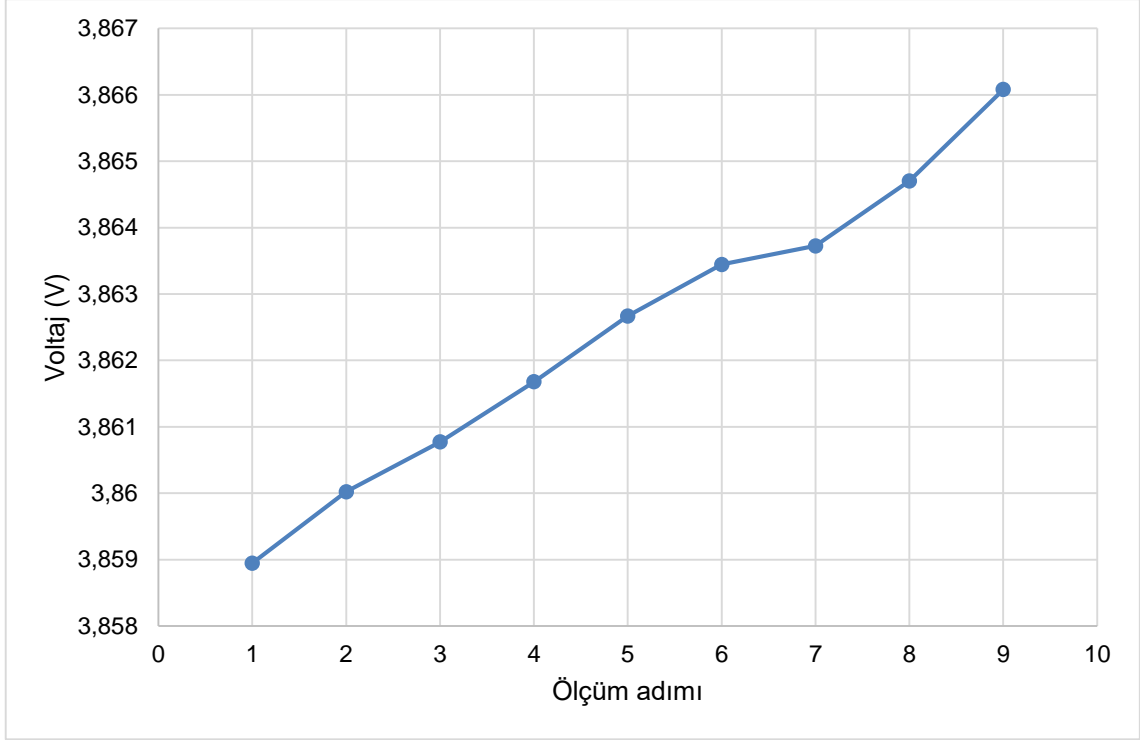
İkinci ışınlama aşamasında 100 μ A ile her bir ölçüm adımı için 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensöründen alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.33'te verilmiştir.

Çizelge 4.33. 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	4,066351 \pm 0,021324
2	4,066672 \pm 0,021326
3	4,067345 \pm 0,021329
4	4,068158 \pm 0,021333
5	4,068978 \pm 0,021338
6	4,069717 \pm 0,021342
7	4,070741 \pm 0,021347
8	4,071638 \pm 0,021352
9	4,072432 \pm 0,021356

4.2.3.2. Oksit Tabaka Kalınlığı 60 nm Olan Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörü İçin Radyasyon Testi Sonuçları

İlk ışınlama öncesi oksit tabaka kalınlığı 60 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 3,858945 V olarak ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün voltajı 3,866079 V olarak ölçülmüştür. 10 μ A ile çalıştırılan 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

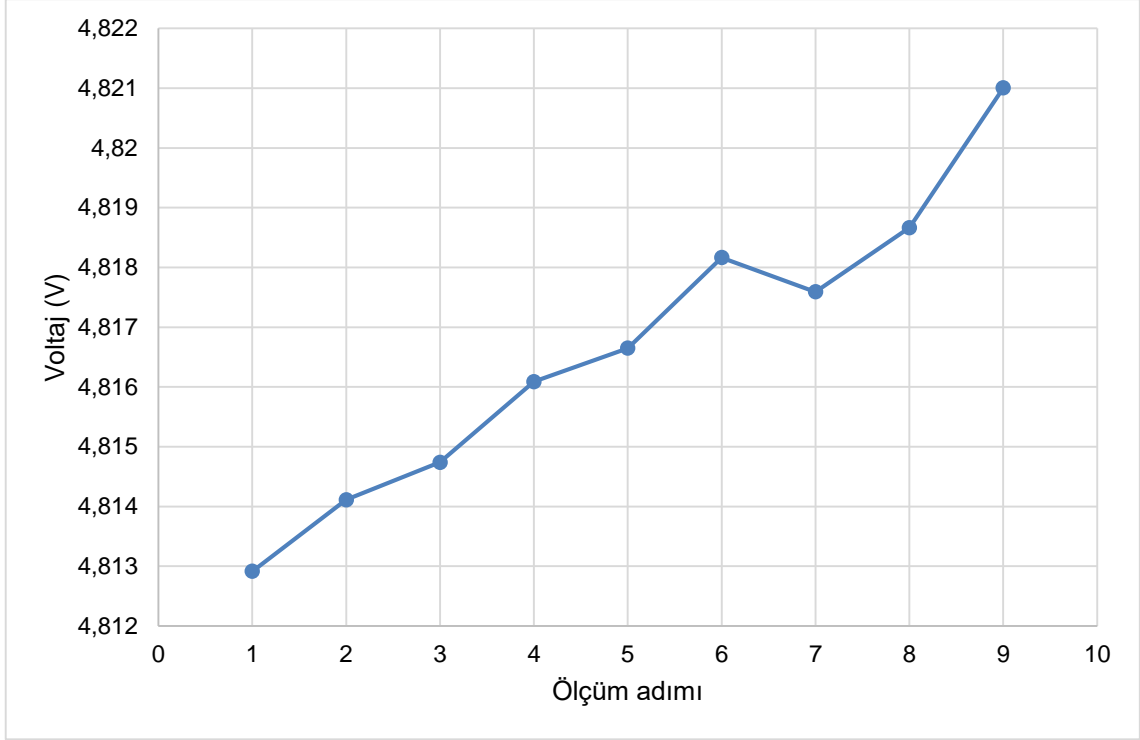


Şekil 4.10. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama) İlk ışınlama aşamasında 10 μ A ile her bir ölçüm adımı için 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.34'te verilmiştir.

Çizelge 4.34. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	3,858945 \pm 0,039531
2	3,860021 \pm 0,039542
3	3,860771 \pm 0,039550
4	3,861677 \pm 0,039559
5	3,862668 \pm 0,039569
6	3,863444 \pm 0,039577
7	3,863724 \pm 0,039580
8	3,864703 \pm 0,039590
9	3,866079 \pm 0,039604

Oksit tabaka kalınlığı 60 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün ilk ışınlama öncesi gerilimi 100 μ A ile 4,812914 V olarak ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörünün gerilimi 4,821005 V olarak ölçülmüştür. 100 μ A ile çalıştırılan 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensöründen radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

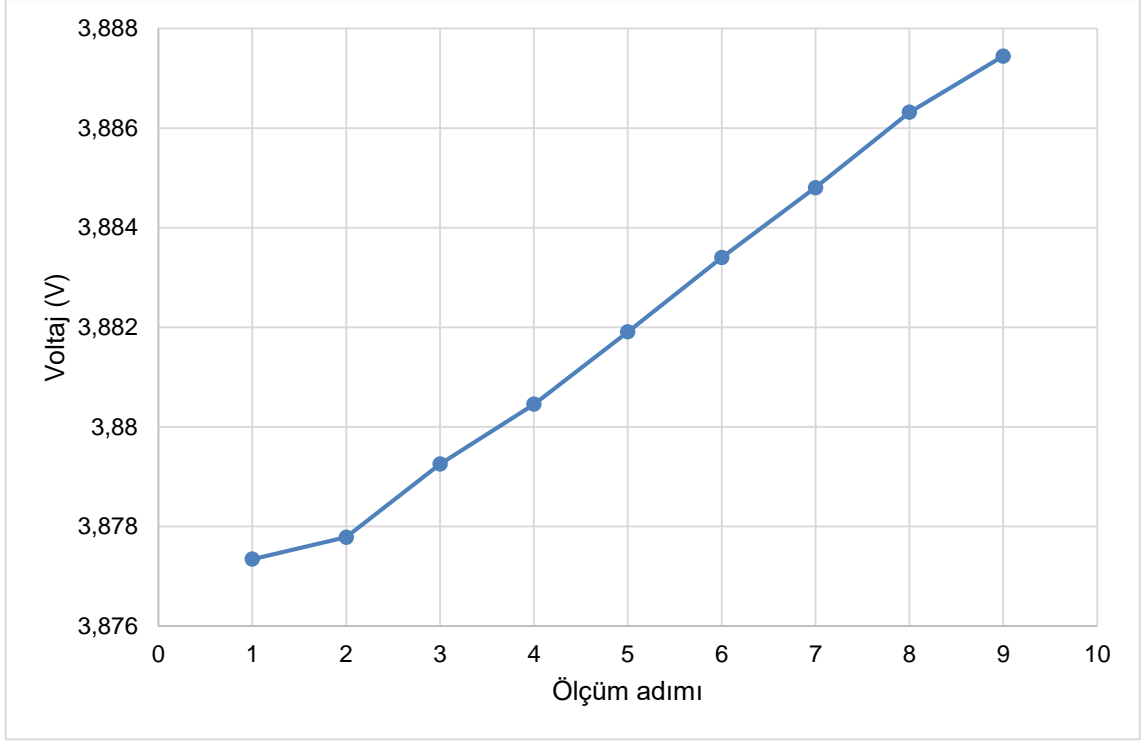


Şekil 4.11. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)
İlk ışınlama aşamasında 100 μ A ile her bir ölçüm adımı için 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.35'te verilmiştir.

Çizelge 4.35. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	4,812914 \pm 0,025239
2	4,814112 \pm 0,025245
3	4,814738 \pm 0,025248
4	4,816089 \pm 0,025256
5	4,816649 \pm 0,025259
6	4,818164 \pm 0,025266
7	4,817593 \pm 0,025263
8	4,818665 \pm 0,025269
9	4,821005 \pm 0,025281

İkinci ışınlama öncesi oksit tabaka kalınlığı 60 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 3,877341 V olarak ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İkinci ışınlamadan sonra 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 3,887444 V olarak ölçülmüştür. 10 μ A ile çalıştırılan 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



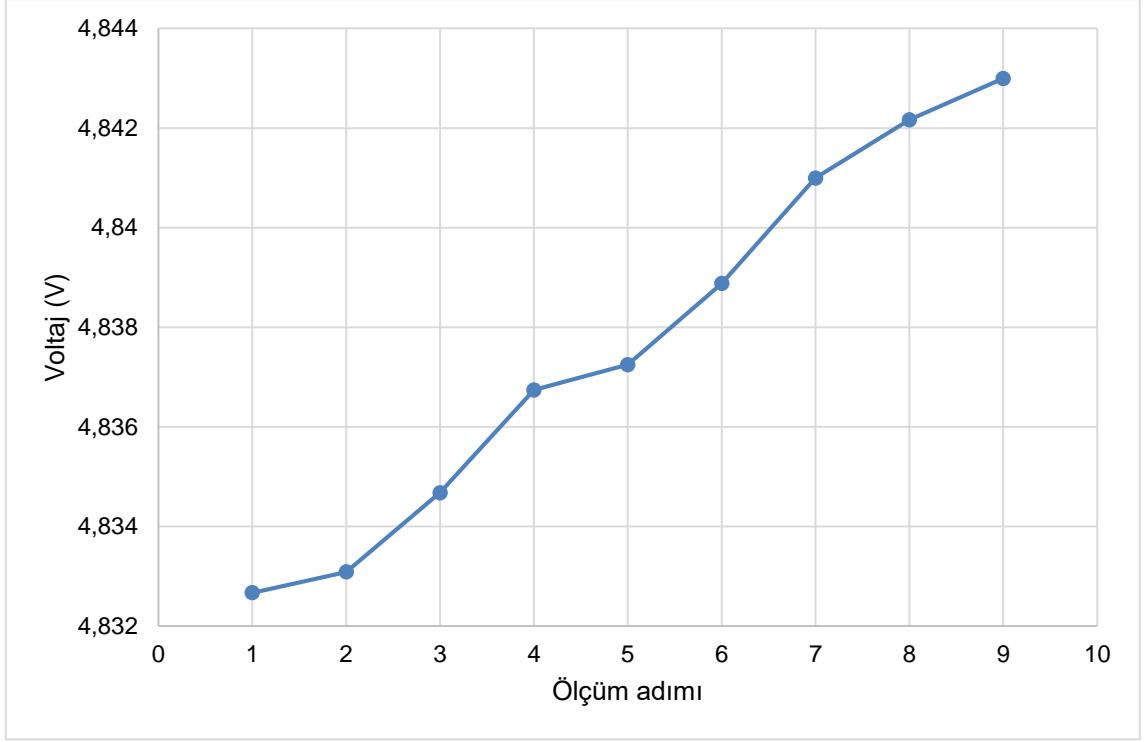
Şekil 4.12. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)

İkinci ışınlama aşamasında 10 μ A ile her bir ölçüm adımı için 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.36'da verilmiştir.

Çizelge 4.36. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	3,877341 \pm 0,039720
2	3,877781 \pm 0,039724
3	3,879250 \pm 0,039739
4	3,880454 \pm 0,039751
5	3,881908 \pm 0,039766
6	3,883398 \pm 0,039782
7	3,884802 \pm 0,039796
8	3,886317 \pm 0,039811
9	3,887444 \pm 0,039823

Oksit tabaka kalınlığı 60 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün ikinci ışınlama öncesi gerilimi 100 μ A ile 4,832666 V olarak ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 4,842996 V olarak ölçülmüştür. 100 μ A ile çalıştırılan 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)

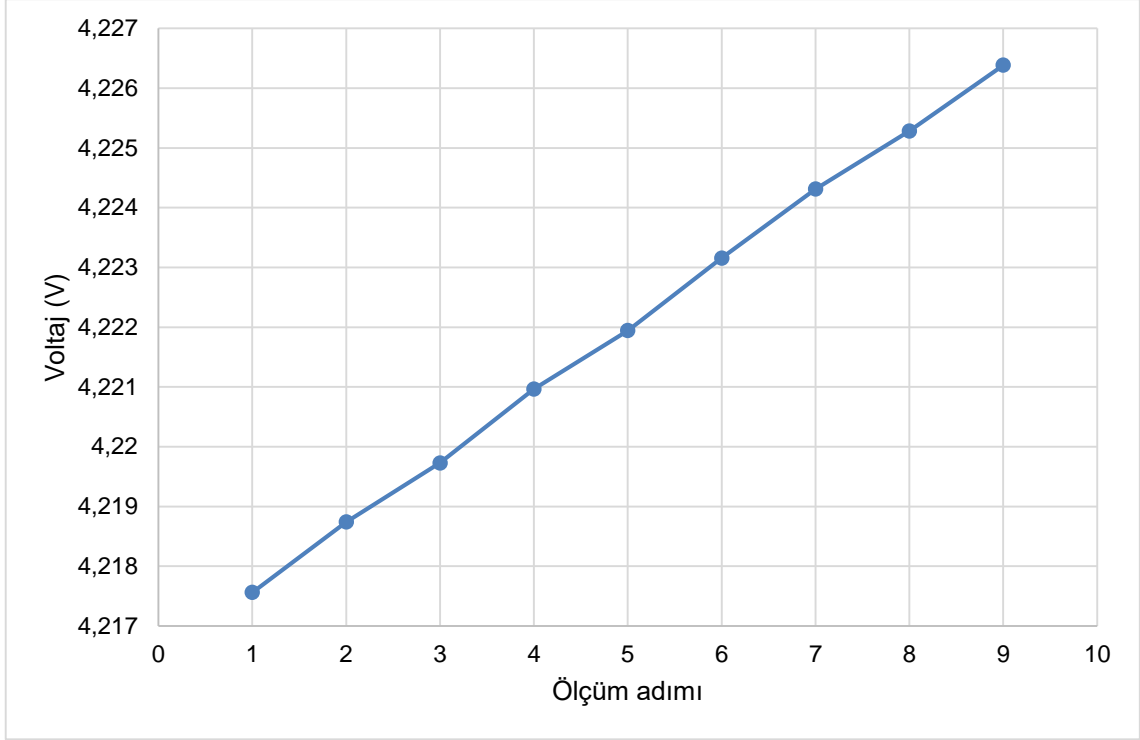
İkinci ışınlama aşamasında 100 μ A ile her bir ölçüm adımı için 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.37’de verilmiştir.

Çizelge 4.37. 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	4,832666 ± 0,025342
2	4,833083 ± 0,025345
3	4,834675 ± 0,025353
4	4,836739 ± 0,025364
5	4,837246 ± 0,025367
6	4,838876 ± 0,025375
7	4,840995 ± 0,025386
8	4,842167 ± 0,025392
9	4,842996 ± 0,025396

4.2.3.3. Oksit Tabaka Kalınlığı 100 nm Olan Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörü İçin Radyasyon Testi Sonuçları

İlk ışınlama öncesi oksit tabaka kalınlığı 100 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 4,217560 V olarak ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilim 4,226386 V olarak ölçülmüştür. 10 μ A ile çalıştırılan 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



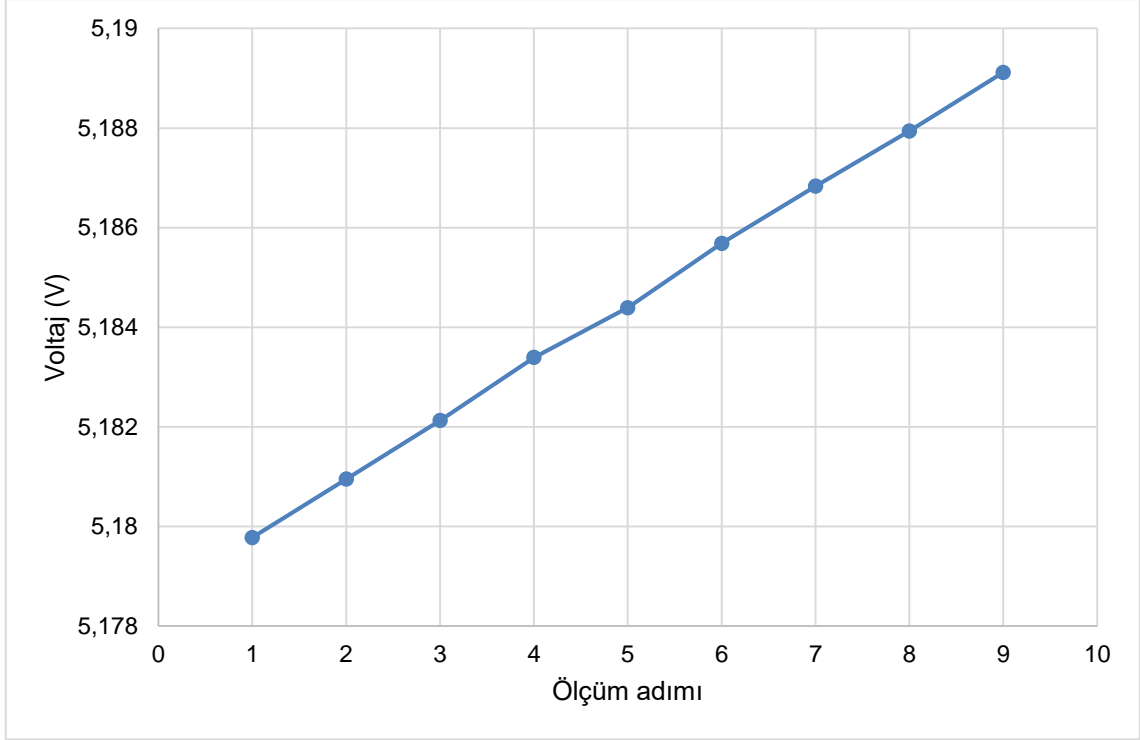
Şekil 4.14. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama) İlk ışınlama aşamasında 10 μ A ile her bir ölçüm adımı için 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.38’de verilmiştir.

Çizelge 4.38. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	4,217560 ± 0,043205
2	4,218740 ± 0,043217
3	4,219727 ± 0,043227
4	4,220965 ± 0,043240
5	4,221943 ± 0,043250
6	4,223156 ± 0,043262
7	4,224313 ± 0,043274
8	4,225284 ± 0,043284
9	4,226386 ± 0,043295

Oksit tabaka kalınlığı 100 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün ilk ışınlama öncesi gerilimi 100 μ A ile 5,179776 V olarak

ölçülmüştür. İlk ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 32 saniyedir ve ilk ışınlama toplamda 256 saniye sürmüştür. İlk ışınlamadan sonra 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 5,189118 V olarak ölçülmüştür. 100 μ A ile çalıştırılan 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



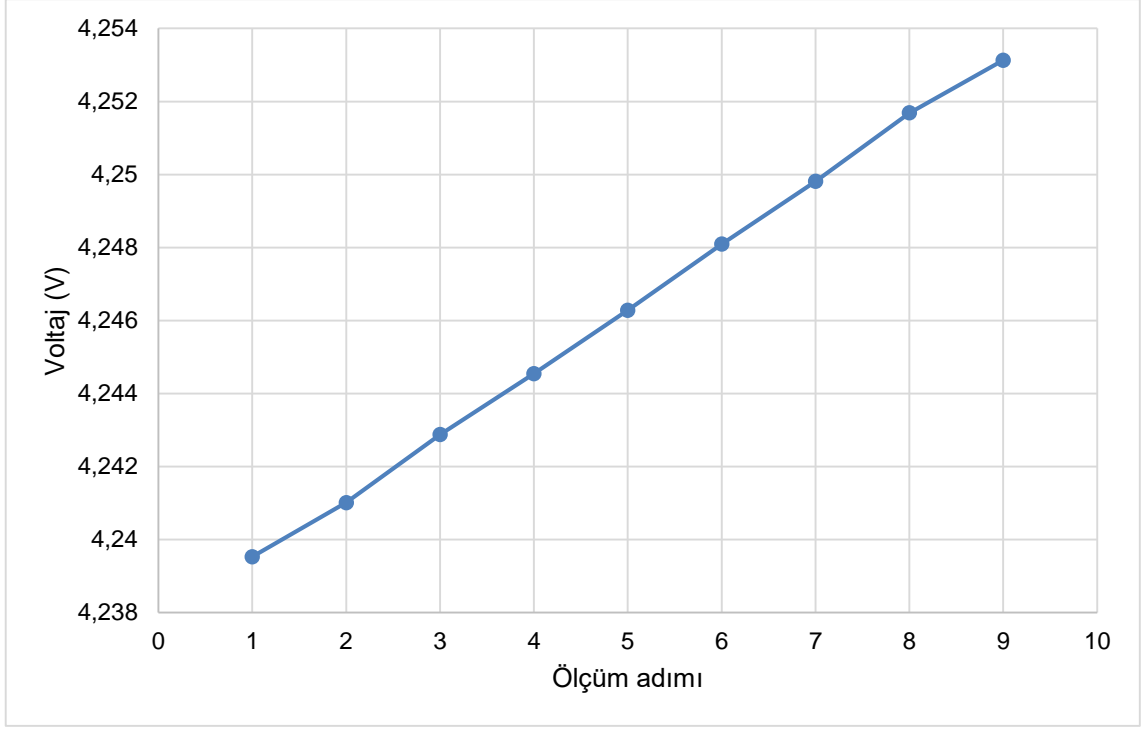
Şekil 4.15. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama) İlk ışınlama aşamasında 100 μ A ile her bir ölçüm adımı için 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.39’da verilmiştir.

Çizelge 4.39. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ilk ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	5,179776 \pm 0,027163
2	5,180948 \pm 0,027169
3	5,182124 \pm 0,027175
4	5,183392 \pm 0,027182
5	5,184393 \pm 0,027187
6	5,185683 \pm 0,027194
7	5,186831 \pm 0,027200
8	5,187940 \pm 0,027206
9	5,189118 \pm 0,027212

İkinci ışınlama öncesi oksit tabaka kalınlığı 100 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 4,239528 V olarak

ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İkinci ışınlamadan sonra 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 10 μ A ile 4,253131 V olarak ölçülmüştür. 10 μ A ile çalıştırılan 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



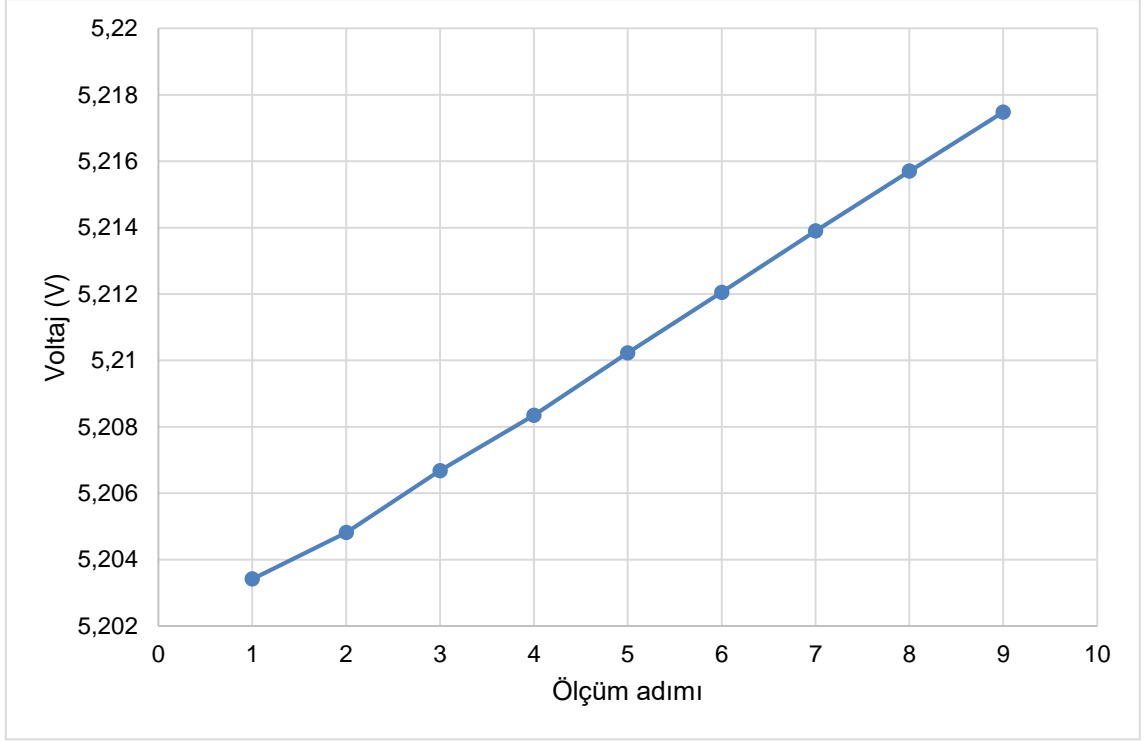
Şekil 4.16. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)

İkinci ışınlama aşamasında 10 μ A ile her bir ölçüm adımı için 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.40'ta verilmiştir.

Çizelge 4.40. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (10 μ A, ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	4,239528 \pm 0,043430
2	4,241011 \pm 0,043445
3	4,242871 \pm 0,043464
4	4,244544 \pm 0,043481
5	4,246281 \pm 0,043499
6	4,248093 \pm 0,043517
7	4,249808 \pm 0,043535
8	4,251686 \pm 0,043554
9	4,253131 \pm 0,043569

Oksit tabaka kalınlığı 100 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün ikinci ışınlama öncesi gerilimi 100 μ A ile 5,203415 V olarak ölçülmüştür. İkinci ışınlamada, dedektörden alınan her bir ölçüm adımı arası süre 52 saniyedir ve ikinci ışınlama toplamda 416 saniye sürmüştür. İkinci ışınlamadan sonra 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün gerilimi 5,217481 V olarak ölçülmüştür. 100 μ A ile çalıştırılan 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden radyasyon altında alınan veriler Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)

İkinci ışınlama aşamasında 100 μ A ile her bir ölçüm adımı için 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 4.41’de verilmiştir.

Çizelge 4.41. 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörüne ait ölçüm sonuçları (100 μ A, ikinci ışınlama)

Ölçüm Adımı	Voltaj (V)
1	5,203415 ± 0,027287
2	5,204815 ± 0,027294
3	5,206677 ± 0,027304
4	5,208349 ± 0,027313
5	5,210230 ± 0,027322
6	5,212050 ± 0,027332
7	5,213900 ± 0,027342
8	5,215702 ± 0,027351
9	5,217481 ± 0,027361

4.2.3.4. Nükleer Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör Tipi Radyasyon Sensörlerinden Alınan Sonuçların Değerlendirilmesi

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörleri hem 10 μA 'lık hem de olası diğer etkileri görmek adına 100 μA 'lık iki ayrı sabit akım kaynağı ile birlikte çalıştırılmıştır (sürülmüştür). Oksit tabaka kalınlıkları sırasıyla 40 nm, 60 nm ve 100 nm olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin radyasyon altındaki performansları hem 10 μA hem de 100 μA sabit akım kaynakları ile incelenmiştir. Oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla radyasyona olan hassasiyetin arttığı gösterilmiştir. Radyasyon sensörleri iki aşamalı olarak radyasyona maruz bırakılmıştır. İlk radyasyon testi (ışınlama) 256 saniye, ikinci radyasyon testi (ışınlama) 416 saniye sürmüştür.

Çizelge 4.42. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin 10 μA ile ölçülen eşik gerilimindeki kayma miktarları (ΔV)

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün oksit tabaka kalınlıkları	Birinci Işınlama	İkinci Işınlama
40 nm	3,698 \pm 0,038 mV	5,668 \pm 0,058 mV
60 nm	7,134 \pm 0,073 mV	10,103 \pm 0,103 mV
100 nm	8,826 \pm 0,090 mV	13,603 \pm 0,139 mV

40 nm'lik oksit tabaka kalınlığına sahip olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensör için eşik geriliminde tespit edilen kayma miktarı, ilk ışınlamada 10 μA ile 3,698 mV, ikinci ışınlamada 10 μA ile 5,668 mV olarak ölçülmüştür. 60 nm'lik oksit tabaka kalınlığına sahip olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensör için eşik geriliminde tespit edilen kayma miktarı, ilk ışınlamada 10 μA ile 7,134 mV, ikinci ışınlamada 10 μA ile 10,103 mV olarak ölçülmüştür. 100 nm'lik oksit tabaka kalınlığına sahip olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensör için eşik geriliminde tespit edilen kayma miktarı, ilk ışınlamada 10 μA ile 8,826 mV, ikinci ışınlamada 10 μA ile 13,603 mV olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla radyasyona olan hassasiyetin arttığı gösterilmiştir.

Çizelge 4.43. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin 100 μ A ile ölçülen eşik gerilimindeki kayma miktarları (ΔV)

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörün oksit tabaka kalınlıkları	Birinci Işınlama	İkinci Işınlama
40 nm	3,884 \pm 0,020 mV	6,081 \pm 0,032 mV
60 nm	8,091 \pm 0,042 mV	10,330 \pm 0,054 mV
100 nm	9,342 \pm 0,049 mV	14,066 \pm 0,074 mV

40 nm'lik oksit tabaka kalınlığına sahip olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensör için eşik geriliminde tespit edilen kayma miktarı, ilk ışınlamada 100 μ A ile 3,884 mV, ikinci ışınlamada 100 μ A ile 6,081 mV olarak ölçülmüştür. 60 nm'lik oksit tabaka kalınlığına sahip olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensör için eşik geriliminde tespit edilen kayma miktarı, ilk ışınlamada 100 μ A ile 8,091 mV, ikinci ışınlamada 100 μ A ile 10,330 mV olarak ölçülmüştür. 100 nm'lik oksit tabaka kalınlığına sahip olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensör için eşik geriliminde tespit edilen kayma miktarı, ilk ışınlamada 100 μ A ile 9,342 mV, ikinci ışınlamada 100 μ A ile 14,066 mV olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla radyasyona olan hassasiyetin arttığı gösterilmiştir.

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin eşik gerilim (voltaj) değerleri radyasyona maruz kaldıkça değişmektedir. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin içerisinde yer alan oksit tabakada, radyasyon sebebiyle oluşan yükler, sensörlerin eşik voltajlarında (gerilimlerinde) kaymalara sebep olmuştur [115 – 120]. Eşik gerilimde meydana gelen bu kayma sabit akım kaynakları ile tespit edilerek sensörlerin radyasyon altındaki performansları incelenmiştir. Maruz kalınan radyasyon doz seviyesiyle eşik gerilimde meydana gelen kayma miktarı doğru orantılı olduğu için, maruz kalınan doz seviyesi eşik gerilimlerdeki kayma miktarı olarak tespit edilmiştir [120, 121].

Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla radyasyona olan hassasiyetlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, daha ince oksit tabaka kalınlıklarına sahip

Daha ince oksit tabaka kalınlıklarına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin radyasyondan daha az etkilendiği de gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin sadece bir radyasyon sensörü olarak değil, daha ince oksit tabakalar ile üretilip radyasyona dayanıklı (radyasyondan etkilenmeyen) bir elektronik bileşen (elektronik devre elemanı) olarak kullanılabilceğini de göstermektedir. Tedariği çok sıkı kurallara ve denetlemelere tabi olan bu tarz elektronik bileşenlerin sadece uydu/uzay teknolojileri alanında değil her türlü askeri, biyomedikal, sivil vb. elektronik uygulamalara yönelik olarak da kullanılması mümkün olabilecektir.

5. YORUM

Bu tez çalışmasında, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör (NürFET) tipi radyasyon sensörlerinin kullanıldığı, uzay uygulamalarına yönelik olarak uydularda kullanılabilecek bir radyasyon dedektörünün geliştirilmesi ve bu dedektörün yer testleri ile radyasyon altında çalışma performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Ek olarak, bu tez kapsamında tasarlanıp üretilmiş olan radyasyon dedektörünün, uydu üzerinde kullanılması durumunda, yörüngede maruz kalacağı radyasyon dozunun tahminine yönelik olarak radyasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında;

- Uzay uygulamalarına yönelik olarak, radyasyonun ölçülmesini mümkün kılan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin içerisindeki SiO₂ oksit tabaka kalınlıkları, 40 nm, 60 nm ve 100 nm olarak büyütülmüş ve radyasyon altındaki performansları gerçek zamanlı olarak incelenmiştir.
- Oksit tabaka kalınlıklarının artmasıyla radyasyona olan hassasiyetin arttığı gösterilmiştir. Radyasyona olan hassasiyetin artması, sensörler üzerinde meydana gelen eşik gerilim voltajının daha fazla olması şeklinde görülmektedir. Daha kalın oksit tabaka kalınlığına sahip sensörlerin eşik gerilimlerinde meydana gelen kayma miktarı daha fazla ölçülmüştür. Bu sebeple, uzay/uydu sistemlerinde kullanılacak elektronik devreler üzerinde daha kalın oksit tabaka kalınlığına sahip sensörlerin kullanılmasının, radyasyon dozunun tespit edilmesi bakımından daha avantajlı olduğu değerlendirilmektedir.
- Uzay uygulamalarına yönelik olarak, uydular üzerinde kullanılabilecek bir radyasyon dedektörü tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu dedektörün deneysel uydu projelerinde kullanılması ve yörüngede radyasyon dozunun ölçülmesi planlanmaktadır.
- Bu radyasyon dedektöründe, nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi sensörlerin radyasyon altındaki performanslarını gerçek zamanlı olarak tespit edebilmek ve karşılaştırabilmek için, daha önce çeşitli uzay görevlerinde kullanılan (uzay tarihçesine sahip) iki farklı radyasyon sensörü (RADFET ve FGDOS) tedarik edilerek kullanılmıştır. Radyasyon testleri

sırasındaki ölçümler gerçek zamanlı olarak, tüm verilerin anlık olarak bilgisayar ortamından kontrol edildiği ve kayıt altına alındığı bir şekilde TAEK SANAEM yerleşkesinde bulunan Co-60 radyasyon kaynağı ile yapılmıştır.

- Elektronik bileşenler radyasyona karşı çeşitli tepkiler verebilmektedir. Radyasyon dozunu doğru bir şekilde ölçmek amacıyla kullanılacak olan bir elektronik bileşenin veya sensörün vermiş olduğu tepkilerin anlamlandırılabilir olması gerekmektedir. Radyasyonun gerçek zamanlı olarak ölçülmesindeki en büyük zorluklardan biri sensörlerden mümkün olduğunca “lineer/doğrusal” sonuç alınmasıdır. Bu tez kapsamında bu durumun başarılı bir şekilde sağlandığı değerlendirilmektedir. Uzay tarihçesine sahip radyasyon sensörlerinin ve nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin kendilerinden beklendiği gibi doğrusal sonuç vermesi üretilmiş olan radyasyon dedektörünün doğru bir şekilde çalıştığını göstermektedir.
- Radyasyon dedektörü üzerinde farklı sabit akım kaynakları kullanmanın, radyasyon dozunun gerçek zamanlı ölçülmesinde ne gibi etkiler yaratacağı da incelenmiştir. Nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin üreticisi olan Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından kullanılması önerilen sabit akım kaynağı (10 μ A) ile alınan ölçümlerin, 100 μ A ile alınan ölçümlerden daha iyi (daha lineer/doğrusal) sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, uzay çevre koşulları (titreşim, şok, ısı (sıcak/soğuk) döngüler vb.) sebebiyle uydu elektroniğinde “10 μ A” gibi çok küçük akımların düzgün bir şekilde verilebilmesi çok kolay olmamaktadır. Bu nedenle, “100 μ A” gibi uydu elektroniğinde kullanılabilmesi göreceli olarak daha kolay olan sabit akım kaynaklarının da radyasyon ölçümlerinde kullanılabileceği bu tez kapsamında gösterilmiştir. Dedektör üzerinde hem 10 μ A hem de 100 μ A’lık akım kaynağı başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Uygun devre tasarımı ve bileşen seçimi ile alternatif akım kaynaklarının kullanılabileceği değerlendirilmektedir.
- 10 μ A’lık sabit akım kaynağı ile 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik

geriliminde meydana gelen kayma miktarı ilk ışınlamada 3,698 mV, ikinci ışınlamada 5,668 mV olarak ölçülmüştür.

- 10 μ A'lık sabit akım kaynağı ile 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı ilk ışınlamada 7,134 mV, ikinci ışınlamada 10,103 mV olarak ölçülmüştür.
- 10 μ A'lık sabit akım kaynağı ile 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı ilk ışınlamada 8,826 mV, ikinci ışınlamada 13,603 mV olarak ölçülmüştür.
- 100 μ A'lık sabit akım kaynağı ile 40 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı ilk ışınlamada 3,884 mV, ikinci ışınlamada 6,081 mV olarak ölçülmüştür.
- 100 μ A'lık sabit akım kaynağı ile 60 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı ilk ışınlamada 8,091 mV, ikinci ışınlamada 10,330 mV olarak ölçülmüştür.
- 100 μ A'lık sabit akım kaynağı ile 100 nm oksit tabaka kalınlığına sahip nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörünün eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı ilk ışınlamada 9,342 mV, ikinci ışınlamada 14,066 mV olarak ölçülmüştür.
- Yukarıda belirtilmiş olan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinden alınan verilerle, oksit tabaka kalınlığı arttıkça radyasyona olan hassasiyetin arttığı ve (voltaj farklarının daha fazla olmasından dolayı) radyasyonun daha rahat bir şekilde ölçülebildiği gösterilmiştir. Bu sonuçlar, radyasyon dozunun, gerçek zamanlı olarak 100 nm'den daha ince oksit tabaka kalınlığına sahip sensörler ile de ölçülebileceğini göstermesi bakımından önem arz etmektedir.
- Bu çalışma kapsamında nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörleri kullanılarak geliştirilen radyasyon dedektörü ile gerçek

zamanlı olarak radyasyon dozu ölçülmüştür. Radyasyon dozunun gerçek zamanlı olarak ölçmede ki en büyük avantaj, maruz kalınan dozun anlık olarak takip edilmesidir. Bu avantaj özellikle uydu teknolojileri için bir alarm mekanizması olarak da kullanılabilir.

- Bu tez kapsamında başarılı bir şekilde üretilmiş olan radyasyon dedektörü sadece uzay/uydu uygulamalarına yönelik olarak değil aynı zamanda tıp, biyomedikal, nükleer santraller vb. radyasyonun bulunduğu her türlü ortamda rahatlıkla kullanılabilir.
- Elektronik bileşen üretimi ülkemizde yapılamadığı için herhangi bir elektronik devrede/kartta kullanılan devre bileşenlerinin tamamı yurt dışından tedarik edilerek gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında üretilen ve başarı bir şekilde çalıştırılan nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin, bir “elektronik bileşen” (komponent) olarak da kullanılabilirliği gösterilmiştir. Oksit tabaka kalınlıklarının azalmasıyla bileşenler radyasyondan daha az etkilenmeye başlamaktadır. Bu nedenle nükleer radyasyona duyarlı alan etkili transistör tipi radyasyon sensörlerinin, tasarım ve üretim basamaklarında gerçekleştirilecek modifikasyonlarla özellikle güç elektroniğinde kullanılan radyasyon dayanımına sahip bir transistör (radhard power metal oxide semiconductor field effect transistor) olarak da kullanılabilirliği gösterilmiştir. Radyasyona karşı dayanıklı olan elektronik bileşenlerin maliyeti oldukça yüksektir ve bu bileşenlerin yurt dışından tedarik edilmesi stratejik önem arz eden projeler için önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu tarz bileşenlerin tedarik edilme süreçleri hem çok uzun hem de çok sıkı denetimlere tabidir. Örnek olarak, güç elektroniğinde sıklıkla kullanılan bu tarz bileşenlerin yerli imkanlar ile üretilecek olması, ülkemiz için önem arz eden sadece uzay/uydu projelerinde değil, özellikle askeri, sivil, biyomedikal vb. projeler için de stratejik önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar sayesinde ülkemiz için bu gibi alanlarda var olan üretim açığının kapatılmasına yönelik olarak önemli bir adım atıldığı değerlendirilmektedir.
- Bu tez çalışması kapsamında, uydunun farklı malzeme türlerine göre radyasyon analizleri de gerçekleştirilmiştir. Radyasyon analizlerinin temel amacı uydu içerisinde yer alan elektronik bileşenlerin üzerine gelecek olan

radasyon dozunun tespit edilebilmesidir. Uyduda yer alacak kartlar üzerindeki elektronik bileşenler genellikle radasyon analizleri sonucunda tespit edilen radasyon dozuna göre tercih edilmektedir. Örnek olarak, radasyon analizleri sonucunda elektronik bileşenler en fazla 10 krad'lık radasyon dozuna maruz kalacak ise "hazır raf ürünü" veya "ticari" bileşenler olarak da adlandırılan her zaman bulunabilecek ve tedarik edilmesi kolay olan bileşenler tercih edilebilmektedir. Bununla birlikte, radasyon analizleri sonucu elektronik bileşenlerin maruz kalacakları doz seviyesi 100 krad mertebelerinde çıkarsa, "radasyon dayanımlı" (radhard) olarak adlandırılan elektronik bileşenlerin kullanılması gerekmektedir. Örnek olarak, analizler sonucu elde edilen radasyon doz değerleri 10 krad civarında ise toplam iyonize doz özelinde radasyon dayanımlı malzemelerin kullanılmasına gerek kalmamaktadır ve bu sayede maliyetlerin azaltılması mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, analizler sonucu elde edilen radasyon doz değerleri 100 krad civarında ise radasyon dayanımlı malzemelerin kullanılması başarılı uzay görevleri için şart olmaktadır. Radasyon analizlerinin en önemli çıktısı uydu tasarımcıları için bu bilgileri sağlıyor olmasıdır. Elde edilen sonuçlara göre, maruz kalınacak olan radasyon doz seviyesi düşükse, radasyon dayanımlı bileşenlerin kullanılmasına gerek kalmayacak ve dolayısıyla üretim maliyetleri azalacaktır. Maruz kalınacak olan radasyon doz seviyesi yüksekse, uydu elektroniğinde radasyon dayanımlı bileşenlerin kullanılması gerekir bu sayede başarılı bir uzay görevi temin edilecektir. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar ile, uydu projelerinin üretim sürecinin kısaltılması ve maliyetin azaltılması mümkün olacağı için ülkenin rekabet gücü artacaktır. Analizler için kavramsal bir uydu modeli yaratılmış ve bu uydunun dış yapısal olarak PMMA, SiO₂ (cam), alüminyum, ve kurşun malzemeleri seçilmiştir. Uydu teknolojilerinde, uydu dış yapısal malzemesi olarak genellikle alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum, kolay bulunabilmesi, rahat işlenebilmesi, görece ucuz olması gibi sebeplerle tercih edilmektedir. Uydularda maliyeti arttıran en önemli etmenlerden biri uydu kütesidir. Uydu ne kadar ağırta taşıma ve fırlatma maliyetleri o kadar artmaktadır. Dolayısıyla, uyduları mümkün olduğunca hafif yapmak çok büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla analiz sonuçları ile alüminyumdan daha hafif olan,

daha düşük özkütleli PMMA ve SiO₂ (cam) gibi malzemelerin belirli kalınlıklarla kullanılabilecekleri gösterilmiştir.

- Uydu dış yüzey malzemesi olarak polimetil metakrilat kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm uydu yapısal kalınlıkları için sırasıyla 291 krad, 90,56 krad, 31,69 krad, 17,03 krad, 10,57 krad ve 7,171 krad olarak hesaplanmıştır.
- Uydu dış yüzey malzemesi olarak cam kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm uydu yapısal kalınlıkları için sırasıyla 74,53 krad, 26,25 krad, 8,504 krad, 4,320 krad, 2,945 krad ve 2,428 krad olarak hesaplanmıştır.
- Uydu dış yüzey malzemesi olarak alüminyum kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm uydu yapısal kalınlıkları için sırasıyla 74,39 krad, 26,10 krad, 8,356 krad, 4,281 krad, 2,965 krad ve 2,472 krad olarak hesaplanmıştır.
- Uydu dış yüzey malzemesi olarak kurşun kullanıldığında yörüngede maruz kalınacak olan radyasyon doz seviyeleri, uydunun merkez noktasında tanımlanmış olan silisyum nokta dedektörüne göre, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm uydu yapısal kalınlıkları için sırasıyla 5,822 krad, 3,270 krad, 2,428 krad, 2,067 krad, 1,839 krad ve 1,641 krad olarak hesaplanmıştır.
- Radyasyon analiz sonuçlarına göre malzeme kalınlıklarının ve özkütlelerin artmasıyla, uydu içerisinde maruz kalınacak olan doz seviyelerinin azaldığı gösterilmiştir.
- Analiz sonuçlarına göre radyasyon etkileri özelinde bu malzemelerin tercih edilebilir olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin kullanılabilirlikleri ve uzay ortamının zorlayıcı koşulları sebebiyle atomik oksijen, UV ışınlar, atmosferik etkiler, sıcak/soğuk döngüler, vakum ortamı gibi diğer etkiler altındaki davranışları da ayrıca incelenmelidir.

6. KAYNAKLAR

- [1] S. Rajiv, S. Santosh, and S. Sugandha, Nanotechnology: The Future Medicine, Journal of Cutaneous and Aesthetic Surgery, 3 (2010) 1.
- [2] What is Nanotechnology? IOP Publishing, 14 (2003) 1.
- [3] Nanotechnology: A Realistic Market Assessment, Global Markets, A BCC Research Reports, 2014.
- [4] M. C. Roco, The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years, Journal of Nanoparticle Research, (2011) 13.
- [5] S. Çıracı, E. Özbay, O. Gülseren, H. Volkan Demir, M. Bayındır, A. Oral, T. Senger, A. Aydınli, A. Dana, Türkiye’de Nanoteknoloji, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Ağustos 2015.
- [6] H. N. Khan, D. A. Hounshell and E. R. H. Fuchs, Science and research policy at the end of Moore’s law, Nature Electronics, (2018) 1.
- [7] K. Rupp, 42 Years of Microprocessor Trend Data, <https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/> (Erişim Tarihi: 20 Mart 2020).
- [8] T. B. Hook, Power and Technology Scaling into the 5 nm Node with Stacked Nanosheets, Joule, 2, (2018) 1.
- [9] S. Mobasser and A. Firoozi, Review of Nanotechnology Applications in Science and Engineering, Journal of Civil Engineering and Urbanism, 6 (2016) 4.
- [10] R. Bayford, T. Rademacher, I. Roitt and S. Xiaoyan Wang, Emerging applications of nanotechnology for diagnosis and therapy of disease: a review, Physiological Measurement, 38, (2017) 8.
- [11] O. Salata, Applications of nanoparticles in biology and medicine, Journal of Nanobiotechnology, 2 (2004) 3.
- [12] T. Singh, S. Shukla, P. Kumar, V. Wahla, V. K. Bajpai and I. A. Rather, Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview, Frontiers in Microbiology, (2017) 8.
- [13] M. Thiruvengadam, G. Rajakumar, and Ill-M. Chung, Nanotechnology: current uses and future applications in the food industry,8 (2018) 1.
- [14] K. S. Dhathathreyan, N. Rajalakshmi, R. Balaji, Nanomaterials for Fuel

Cell Technology, Chapter 24, **2017**.

- [15] Dr. V. K. Sethi, Dr. M. Pandey, and Ms. Pr. Shukla, Use of Nanotechnology in Solar PV Cell, International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2 (**2011**) 2.
- [16] D. R. Paul, L. M. Robeson, Polymer nanotechnology: Nanocomposites, Polymer, 49 (**2008**) 15.
- [17] H. S. Mohapatra, A. Chatterjee, S. Maity, Nanotechnology in Fibres and Textiles, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, 2 (**2013**) 5.
- [18] M. Haque, Nano Fabrics in the 21st century: a review, Asian Journal of Nanoscience and Materials, 2 (**2018**) 2.
- [19] P. J. Rivero, A. Urrutia, J. Goicoechea, and F. J. Arregui, Nanomaterials for Functional Textiles and Fibers, Nanoscale Research Letters, 10 (**2015**) 501.
- [20] I. S. Yunus, Harwin, A. Kurniawan, D. Adityawarman and A. Indarto, Nanotechnologies in water and air pollution treatment, Environmental Technology Reviews, 1 (**2012**) 1.
- [21] E. F. Mohamed, Nanotechnology: Future of Environmental Air Pollution Control, Environmental Management and Sustainable Development, 6 (**2017**) 2.
- [22] M. K. Patra, K. Manzoor, M. Manoth, S.C. Negi, S.R. Vadera, and N. Kumar, Nanotechnology Applications for Chemical and Biological Sensors, Defence Science Journal, 58 (**2008**) 5.
- [23] S. M. Mousavi, S. A. Hashemi, M. Zarei, A. M. Amani and A. Babapoor, Nanosensors for Chemical and Biological and Medical Applications, Medicinal Chemistry, 8 (**2018**) 8.
- [24] A. Ansary and L. M. Faddah, Nanoparticles as biochemical sensors, Nanotechnology, Science and Applications, (**2010**) 3.
- [25] X. Zhang, Q. Guo, and D. Cui, Recent Advances in Nanotechnology Applied to Biosensors, Sensors (Basel), 9 (**2009**) 2.
- [26] M. Meyyappan and M. Dastoor, Nanotechnology in Space Exploration, Report of the National Nanotechnology Initiative Workshop August 24–26, Palo Alto, CA, **2004**.
- [27] L. Winkless and A. Cuenat, Nano launches into space, Materials Today,

14 **(2011)** 1-2.

- [28] A. Korkin, P. S. Krstić, J. C., Wells, Nanotechnology for Electronics, Photonics, and Renewable Energy, Nanostructure Science and Technology, Springer **2010**.
- [29] V. Subramanian and T. Lee, Nanotechnology-based flexible electronics, Nanotechnology, 23 **(2012)** 34.
- [30] K. Bhattacharya, S. Singh, J. Patel, P. Inaniya, Recent Developments in Electronics Under Nanotechnology-Nanoelectronics, International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 1 **(2012)** 4.
- [31] G. Chryssolouris, P. Stavropoulos, G. Tsoukantas, K. Salonitis and A. Stournaras, Nanomanufacturing Processes: A Critical Review, International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, 1-4 October, Leira, Portugal, **2003**.
- [32] Y. Chen and A. Pepin, Nanofabrication: Conventional and nonconventional methods, Electrophoresis, 22 **(2001)** 2.
- [33] W. Kern, The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology, Journal of the Electrochemical Society, 137 **(1990)** 6.
- [34] J. M. Quero and F. Perdigones C. Aracil, Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications, Smart Sensors and MEMS, Chapter 10, Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications, Woodhead Publishing, Cambridge, 281-304, **2014**.
- [35] A. Hierlemann, O. Brand, C. Hagleitner, And H. Baltes, Microfabrication Techniques For Chemical/Biosensors, Proceedings of the IEEE, 91 **(2003)** 6.
- [36] X. Tan, Z. Tao, M. Yu, H. Wu and H. Li, Anti-reflectance investigation of a micro-nano hybrid structure fabricated by dry/wet etching methods, Scientific Reports, 8 **(2018)** 7863.
- [37] T. Betancourt and L. Brannon-Peppas, Micro- and nanofabrication methods in nanotechnological medical and pharmaceutical devices, International Journal of Nanomedicine, 1 **(2006)** 4.
- [38] A. H. Becquerel, On Radioactivity, a new property of matter, Nobel Lecture, December 11, **1903**.

- [39] M. Dutra R. Silva, Ionizing Radiation Detectors, Evolution of Ionizing Radiation Research, Chapter 8, 189-209, **2015**.
- [40] B. D. Milbrath, A.J. Peurrung, M. Bliss and W.J. Weber, Radiation detector materials: An overview, Cambridge University Press, Volume 23, Issue 10, pp. 2561-2581, October **(2008)**.
- [41] P. Habrma, Directional Geiger-Müller detector with improved response to gamma radiation, Journal of Instrumentation, Volume 14, September **2019**.
- [42] F. N. Flakus, Detecting and measuring ionizing radiation - a short history Radiation detection, IAEA Bulletin, 23 **(1981)** 4.
- [43] S. H. Byun, Gas Filled Detectors, Med. Phys. 4R06/6R03, Radioisotopes and Radiation Methodology, Chapter 3, **2016**.
- [44] T. A. DeVol, L. Pruitt, J. Gallaird, L. Sexton, J. Cordaro, A. Rao, S. M. Serkiz, Toward a carbon nanotube anode gas-filled radiation detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **(2011)** 652.
- [45] A. T. Krebs, Scintillation Counters, Report No. 89, Radiobiology Department, Army Medical Research Laboratory, Fort Knox, Kentucky 11 August **1952**.
- [46] T. Kron, Thermoluminescence dosimetry and its applications in medicine- Part 1: Physics, materials and equipment, Australasian physical & engineering sciences in medicine, 17 **(1995)** 4.
- [47] Individual Monitoring, Practical Radiation Technical Manual, IAEA-PRTM-2 (Rev. 1), Vienna, **2004**.
- [48] S. I. Parker, C. J. Kenney, J. Segal, 3D — A proposed new architecture for solid-state radiation detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 395 **(1997)** 3.
- [49] Nanotechnology Signature Initiative: Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology: Improving and Protecting Health, Safety, and the Environment, **2012**.
- [50] T. H. Lee, A Review of MOS Device Physics, Cambridge University Press, pp 167-201, **2003**.

- [51] IEEE Std 315 – Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Including Reference Designation Letters), 57 – 58, **1975**.
- [52] Bipolar (BJT) Transistor NPN/PNP, <https://pixelelectric.com/bipolar-bjt-transistor-npn-pnp/> (Erişim Tarihi: **20 Mart 2020**).
- [53] Field Effect Transistors, <https://www.indiamart.com/proddetail/field-effect-transistors-11695043662.html> (Erişim Tarihi: **20 Mart 2020**).
- [54] S. Zafar, M. Lu, and A. Jagtiani, Comparison between Field Effect Transistors and Bipolar Junction Transistors as Transducers in Electrochemical Sensors, *Scientific Reports*, 7 (**2017**) 41430.
- [55] P. Spirito, G. V. Persiano and A. G. M. Strollo, The bipolar mode FET: a new power device combining FET with BJT operation, *Microelectronics Journal*, 24 (**1993**) 1-2.
- [56] R. C. Jaeger, T. N. Blalock, *Microelectronic Circuit Design*, Chapter 4 Field Effect Transistors, Mc Graw Hill, **2010**.
- [57] S. Kaya and E. Yilmaz, Use of BiFeO₃ layer as a dielectric in MOS based radiation sensors fabricated on a Si substrate, 319 (**2014**).
- [58] S. Kaya, A. Jaksic, R. Duane, N. Vasovic, E. Yilmaz, FET-based radiation sensors with Er₂O₃ gate dielectric, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 430 (**2018**).
- [59] A. Kahraman, E. Yilmaz, A comprehensive study on usage of Gd₂O₃ dielectric in MOS based radiation sensors considering frequency dependent radiation response, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 152 (**2018**).
- [60] A. Kahraman, E. Yilmaz, A. Akdag, S. Kaya, Evaluation of Radiation Sensor Aspects of Er₂O₃ MOS Capacitors under Zero Gate Bias, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 63 (**2016**) 2.
- [61] N. D. Vasović, G. S. Ristić, A new microcontroller-based RADFET dosimeter reader, *Radiation Measurements*, 47 (**2012**) 4.
- [62] A. Kahraman, and E. Yilmaz, Proposal of alternative sensitive region for MOS based radiation sensors: Yb₂O₃, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 35 (**2017**) 6.

- [63] V. D. Kuznetsova, V. M. Sinelnikova, S. N. Alpertb, Yakov Alpert: Sputnik-1 and the first satellite ionospheric experiment, *Advances in Space Research*, 55 (2015) 12.
- [64] M. Bille and E. Lishock, *The First Space Race: Launching the World's First Satellites*, Texas A&M University Press, Chapter 5, 2004.
- [65] *Satellite Anatomy*,
http://teachers.henrico.k12.va.us/deeprun/lambert_r/satellite/satellite/5/5.html (Erişim Tarihi: 20 Mart 2020).
- [66] S. R. Preethi, Selection of an Orbit for Communication Satellite Based On Inclination and Eccentricity, *International Journal of Current Research* 9 (2017) 07.
- [67] J. P. Hagen, The Exploration of Outer Space with an Earth Satellite, *Proceedings of the IRE*, 44 (1956) 6.
- [68] Sharmila, A Study on Satellite Communication Network, *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 4 (2016) 12.
- [69] *The EM Spectrum*,
<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> (Erişim Tarihi: 20 Mart 2020).
- [70] Why Space Radiation Matters, <https://www.nasa.gov/analogs/nsrl/why-space-radiation-matters> (Erişim Tarihi: 20 Mart 2020).
- [71] Space Radiation,
https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/space_radiation_ebook.pdf (Erişim Tarihi: 20 Mart 2020).
- [72] Coronal Mass Ejections, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml> (Erişim Tarihi: 25 Mart 2020).
- [73] NASA Scientist Dives into Perfect Space Storm,
http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/perfect_space_storm.html (Erişim Tarihi: 10 Mart 2020).
- [74] J. E. Borovsky and J. A. Valdivia, The Earth's Magnetosphere: A Systems Science Overview and Assessment, *Surveys in Geophysics*, 39 (2018).
- [75] E. J. Daly, The radiation belts, *Radiation Physics and Chemistry*, 43 (1994) 1–2.

- [76] I. R. Mann, L. G. Ozeke, K. R. Murphy, S. G. Claudepierre, D. L. Turner, D. N. Baker, I. J. Rae, A. Kale, D. K. Milling, A. J. Boyd, H. E. Spence, G. D. Reeves, H. J. Singer, S. Dimitrakoudis, I. A. Daglis & F. Honary, Explaining the dynamics of the ultra-relativistic third Van Allen radiation belt, *Nature Physics*, 12 **(2016)**.
- [77] J. Feynman, S. B. Gabriel, On space weather consequences and predictions, *Journal Of Geophysical Research-Space Physics*, 105 **(2000)** A5.
- [78] Uydularımız Tehdit Altında – Uzay Radyasyonu, Buğra Kocaman, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Ekim **2019**.
- [79] R. H. Maurer, M. E. Fraeman, M. N. Martin, and D. R. Roth, Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 28 **(2008)** 1.
- [80] F. Tan, R. Huang, X. An, W. Wu, H. Feng, L. Huang, J. Fan, X. Zhang and Y. Wang, Total ionizing dose (TID) effect and single event effect (SEE) in quasi-SOI nMOSFETs, *Semiconductor Science and Technology*, *Semiconductor Science and Technology*, 29 **(2013)** 1.
- [81] E. E. Allam, C. Inguibert, S. Addarkaoui, A. Meulenberg, A. Jorio and I. Zorkani, NIEL calculations for estimating the displacement damage introduced in GaAs irradiated with charged particles, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 186 **(2017)** 012005.
- [82] A. Kahraman, E. Yılmaz, Farklı B+ İmplantasyon Koşulları İçin RADFET'lerin Elektriksel Karakterizasyonunun Tcad Benzetim Programı İle İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22 **(2017)** 2.
- [83] S. Abubakar, S. Kaya, H. Karacali, E. Yılmaz, The Gamma Irradiation Responses of Yttrium Oxide Capacitors and First Assessment Usage in Radiation Sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 258 **(2017)**.
- [84] S. Kaya, Fabrication and Characterization of Nuclear Radiation Sensing Field Effect Transistors (NürFETs) with High-K Dielectrics, *Doktora Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu, 2018*.
- [85] R. H. Sørensen, C. Poivey, N. Fleurinck, K. Puimege, A. Zadeh, F.-X. Guerre, F. Lochon, M. Kaddour, L. Li, D. Walter, A. Keating, A. Jaksic, and

- M. Poizat, The Technology Demonstration Module On-Board PROBA-II, IEEE Transactions on Nuclear Science, 58 (2011) 3.
- [86] M. L. Bhadra, P. Beck, T. Berger, A. Jaksic, M. Latocha, S. Rollet, M. Vuotila, A. Zechner, G. Reitz, Response calculations for silicon-based direct-reading dosimeters for use at the international space station (ISS), Radiation Measurements 45 (2010) 10.
- [87] Varadis RADFET VT01, <https://www.varadis.com/products/#VT01>, (Erişim Tarihi: **25 Mart 2020**).
- [88] A. Jaksic, G. Ristic, M. Pejovic, A. Mohammadzadeh, C. Sudre, and W. Lane, Gamma-Ray Irradiation and Post-Irradiation Responses of High Dose Range RADFETs, IEEE Transactions on Nuclear Science, 49 (2002) 3.
- [89] C. Joan; P., Alvaro; B., Angel; R., Ghislain; M., Hubert; B. Matteo; Dr D. Salvatore, FGDOS: Floating Gate DOSimeter for Space applications. Introduction. Tests and results. Moon Flyby, SPACEMON: Space Environment Monitoring Workshop **2017**.
- [90] R. Ferraro, S. Danzeca, M. Brucoli, A. Masi, M. Brugger and L. Dilillo, Design of a radiation tolerant system for total ionizing dose monitoring using floating gate and RadFET dosimeters, JINST, 12 (2017).
- [91] M. Álvarez, C. Hernando, J. Cesari, Á. Pineda, and E. G. Moreno, Total Ionizing Dose Characterization of a Prototype Floating Gate MOSFET Dosimeter for Space Applications, IEEE Transactions on Nuclear Science, 60 (2013) 6.
- [92] Radiation Sensor Information, http://www.ic-malaga.com/servicios_rad_en.html (Erişim Tarihi: **20 Mart 2020**).
- [93] LT3085, Adjustable 500mA Single Resistor Low Dropout Regulator, Linear Technology, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3085fb.pdf> (Erişim Tarihi: **4 Mart 2020**).
- [94] REF200 Dual Current Source and Current Sink, Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref200.pdf> (Erişim Tarihi: **4 Mart 2020**).
- [95] INA159, Precision, Gain of 0.2 Level Translation DIFFERENCE AMPLIFIER, Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina159.pdf>, (Erişim Tarihi: **10 Mart 2020**).

- [96] LTC2404/LTC2408 4-/8-Channel 24-Bit μ Power No Latency $\Delta\Sigma$ TM ADCs, Linear Technology, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/24048fa.pdf> (Erişim Tarihi: **10 Mart 2020**).
- [97] B. Kocaman, M. Harmandali, M. Koprü, B. Solak, T. Ergin, E. Yılmaz, and E. Guven, Total ionizing dose analysis of a native detector and a satellite on orbit, AIP Conference Proceedings 2178, **(2019) 1**.
- [98] Total Dose Steady-State Irradiation Test Method, ESCC Basic Specification No. 22900, Issue 5, June **2016**.
- [99] SANAEM Tanıtım Kitabı, <http://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/sanaem/SANAEM-Tanitim-Kitabi/lang.tr-tr/> (Erişim Tarihi: **20 Mart 2020**).
- [100] L. M. S. Martines, Analysis of LEO Radiation Environment And Its Effects On Spacecraft's Critical Electronic Devices, Yüksek Lisans Tezi, Embry-Riddle Aeronautical University Daytona Beach, Florida, **2011**.
- [101] S. W. Samwel, A. A. Hady, J. S. Mikhail, M. Ibrahim and Y. S. Hanna, Studying the Total Ionizing Dose and Displacement Damage Dose effects for various orbital trajectories, First Middle East and Africa IAU-Regional Meeting Proceedings MEARIM No. 1, **2008**.
- [102] W. Suparta, S. K. Zulkeple, An Assessment of the Space Radiation Environment in a Near-Equatorial Low Earth Orbit Based on the RazakSAT-1 Satellite, **2015**.
- [103] D. Sinclair and J. Dyer, Radiation Effects and COTS Parts in SmallSats, 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC13-IV-3, **2013**.
- [104] M. Poizat, TID Total Ionizing Dose, Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications, CERN-ESA-SSC workshop, **2017**.
- [105] E. G. Moreno, E. Isern, M. Roca, R. Picos, J. Font, J. Cesari, and A. Pineda, Floating Gate CMOS Dosimeter With Frequency Output, IEEE Transactions on Nuclear Science, 60 **(2013) 6**.
- [106] R. Ferraro, S. Danzeca, M. Brucoli, A. Masi, M. Brugger and L. Dilillo, Design of a radiation tolerant system for total ionizing dose monitoring using floating gate and RadFET dosimeters, JINST, 12 **(2017)**.

- [107] S. Danzeca, J. Cesari, M. Brugger, L. Dusseau, A. Masi, A. Pineda, and G. Spiezia, Characterization and Modeling of a Floating Gate Dosimeter with Gamma and Protons at Various Energies, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60 **(2014)** 6.
- [108] T. R. Oldham, and F. B. McLean, Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50 **(2003)** 3.
- [109] M. Hao, H. Hu, C. Liao, H. Kang, H. Su, Q. Zhang, and Y. Zhao, Total ionizing dose radiation effect on the threshold voltage for the uniaxial strained Si nano NMOSFET, *IEICE Electronics Express*, 14 **(2017)** 11.
- [110] I. Yoshii, Radiation effects on MOS devices and radiation-hard CMOS Technologies, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 342 **(1994)** 1.
- [111] J. Schwank, Radiation Effects in MOS Oxides, 9th European Conf. Radiation & Its Effects on Components and Systems, Deauville, France, **2007**.
- [112] J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood, J. A. Felix, P. E. Dodd, P. Paillet, and V. Ferlet-Cavrois, Radiation Effects in MOS Oxides, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55 **(2008)** 4.
- [113] M. S. Andjelković, G. S. Ristić and A. B. Jakšić, Using RADFET for the real-time measurement of gamma radiation dose rate, *Measurement Science and Technology*, 26 **(2015)** 2.
- [114] S. M. Pejović, M. M. Pejović, M. Živanović, Small dose effect in RADFET with thick gate oxide, *Applied Radiation and Isotopes*, 152 **2019**.
- [115] E. Yilmaz, A. Kahraman, A. M. McGarrigle, N. Vasovic, Yegen D., Jaksic A., Investigation of RadFET response to X-ray and electron beams, *Applied Radiation and Isotopes*, 127 **(2017)**.
- [116] A. Jaksic, K. Rodgers, C. Gallagher, and P.J. Hughes, Use of RADFETs for Quality Assurance of Radiation Cancer Treatments, *Proc. 25th International Conference On Microelectronics (MIEL 2006)*, Belgrade, Serbia And Montenegro, 14-17 May, **2006**.
- [117] S. Kaya and E. Yilmaz, A Detailed Study on Frequency Dependent Electrical Characteristics of MOS Capacitors with Dysprosium Oxide Gate Dielectrics, *Semiconductor Science and Technology*, 35 **(2019)** 025002.

- [118] S. Kaya, S. Abubakar, E. Yilmaz, Co-60 gamma irradiation influences on device characteristics of n-SnO₂/p-Si heterojunction diodes, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 445 **(2019)**.
- [119] S. Kaya, A. Jaksic, R. Duane, N. Vasovic, E. Yilmaz, FET-based radiation sensors with Er₂O₃ gate dielectric, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 430 **(2018)**.
- [120] F. B. Ergin, R. Turan, S. T. Shishiyanu, E. Yilmaz, Effect of γ -radiation on HfO₂ based MOS capacitor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 268 **(2010)** 9.
- [121] E. Yilmaz, B. Kaleli, R. Turan, A systematic study on MOS type radiation sensors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 264 **(2007)** 2.

EKLER

EK 1 – Tezden Türetilmiş Bildiriler

1. Bugra Kocaman, Murat Harmandali, Mehmet Kopru, Bekir Solak, Tulun Ergin, Ercan Yilmaz, and Eylem Guven, Total Ionizing Dose Analysis of a Native Detector and a Satellite on Orbit, AIP Conference Proceedings, Turkish Physical Society 35th International Physics Congress, 4 – 8 Eylül, Bodrum, **2019**. <https://doi.org/10.1063/1.5135404>
2. Bugra Kocaman, Mehmet Kopru, Bekir Solak, Murat Harmandali, Eylem Guven, and Ercan Yilmaz, DEVELOPMENT OF RADIATION DETECTOR (RADIATION MODULE) WITH THREE DIFFERENT SENSORS FOR SPACE APPLICATIONS, RAP Conference Proceedings, vol. 4, pp. 139 – 144, 16 – 19 Eylül, Belgrad, **2019**.
<http://www.dx.doi.org/10.37392/RapProc.2019.28>

EK 2 – RADFET VT01 Radyasyon Sensörünün Veri Föyü (Datasheet)

TECHNICAL DATA

VT01

400nm RADFET

in 6L SOT-23 Plastic package

VT01 Description and Pin-Out

The VT01 is Varadis 400nm RADFET chip packaged in a plastic SOT-23 six lead package.

The part consists of two identical RADFETs, R1 and R2, and a diode (see Figure 1 and Table 1). The RADFETs' gate oxide thickness is 400nm and W/L is 300 μ m/50 μ m. The RADFETs have individual gate and drain terminals, while the source and bulk are common and connected together; this is also the diode bulk contact.

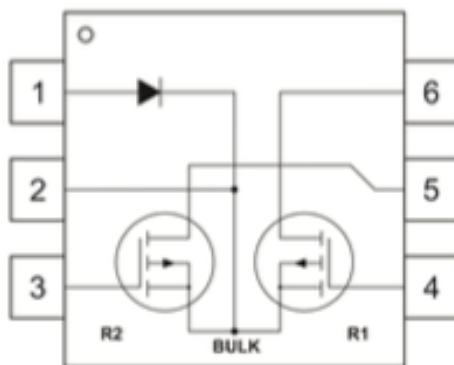


Figure 1: VT01 pin-out drawing.

Table 1: VT01 pin-out description.

Pin Number	Description
1	Diode anode
2	Source/bulk (common)
3	Gate of R2
4	Gate of R1
5	Drain of R2
6	Drain of R1

Maximum Ratings

Maximum ratings of the VT01 RADFET are given in Table 2.

Table 2: Maximum ratings of the VT01. Measured at room temperature.

Characteristics	Symbol	Specification	Unit	Remarks
Drain-Source Voltage	V_{DS}	-25	V	
Gate-Source Voltage	V_{GS}	+/- 50	V	
Drain-Gate Voltage	V_{DG}	-50	V	
Drain Current	I_D	-1	mA	Continuous
Source Current	I_S	-1	mA	Continuous

Modes of Operation

Irradiation Mode (Sense Mode)

In this mode of operation it is recommended that all terminals of the RADFET are connected to ground. For alternative biasing options, contact the manufacturer.

Read-Out Mode (Accumulated Radiation Dose Read-Out)

The RADFET can be read at arbitrary intervals, depending on the application. The period between readings can be from seconds to days or even months. The circuit used to read out the RADFET (Reader Circuit - RC) is shown in Figure 2 with connection configuration in Table 3.

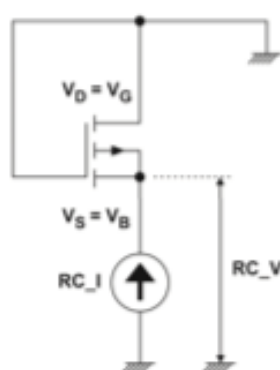


Table 3: Connections in Read-Out mode.

Terminal	Bias
S=B	Current is forced (RC_I) Voltage reading is taken (RC_V)
G=D	0V (common)

Figure 2: Reader Circuit (RC) configuration.

Current RC_I is forced into the RADFET, connected in RC configuration (Figure 2). The voltage at the source (RC_V) is measured; this voltage is called "RC threshold voltage". Typical I-V curve for the un-irradiated device in this configuration is shown in Figure 3. In principle, any read-out current (RC_I) value above $5\mu\text{A}$ can be chosen, as long as the value is kept unchanged after the start of radiation exposure. For best temperature compensation, the RC_I value of $10\mu\text{A}$ is recommended.

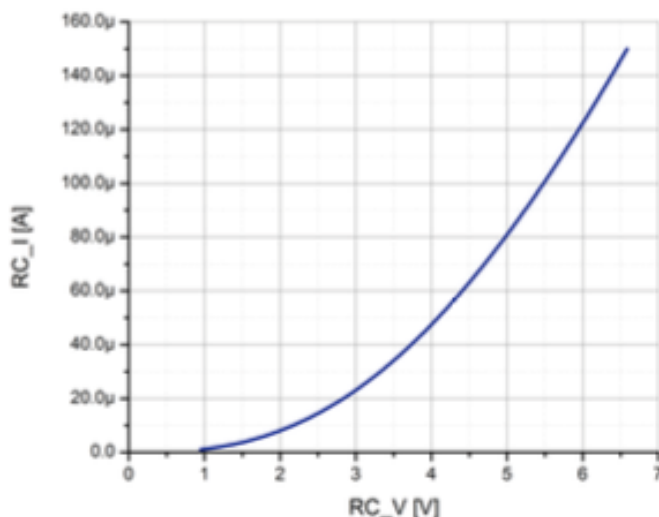


Figure 3: Typical Reader Circuit (RC) I-V curve, pre-irradiation. Measured at room temperature.

Electrical Parameters

The most important electrical parameter of un-irradiated RADFET is RC threshold voltage (RC_V). Specification for RC_V is given in Table 4. Results of RC_V measurements prior to shipment are included in documentation that comes with ordered parts. Typically, the range of RC_V of delivered parts is significantly tighter than in the specification.

Table 4: Specification for RC threshold voltage. Measured at room temperature.

Parameter	Symbol	Test Circuit and Conditions	Limits		Unit
			Min	Max	
RC Threshold Voltage	RC_V	Figure 2 and Table 3 RC_I = 10 μ A	0.8	3.0	V

Calibration Data

The calibration curve for the RADFET shows evolution of ΔV (the change in RC threshold voltage with reference to its pre-irradiation value) with dose. Note that a specific calibration curve, obtained using the Co-60 source, is associated with each RADFET production batch. The calibration curve, together with analytical equation and fitting coefficients, will be provided with the supplied parts. For illustration, typical calibration curve is shown in Figure 4.

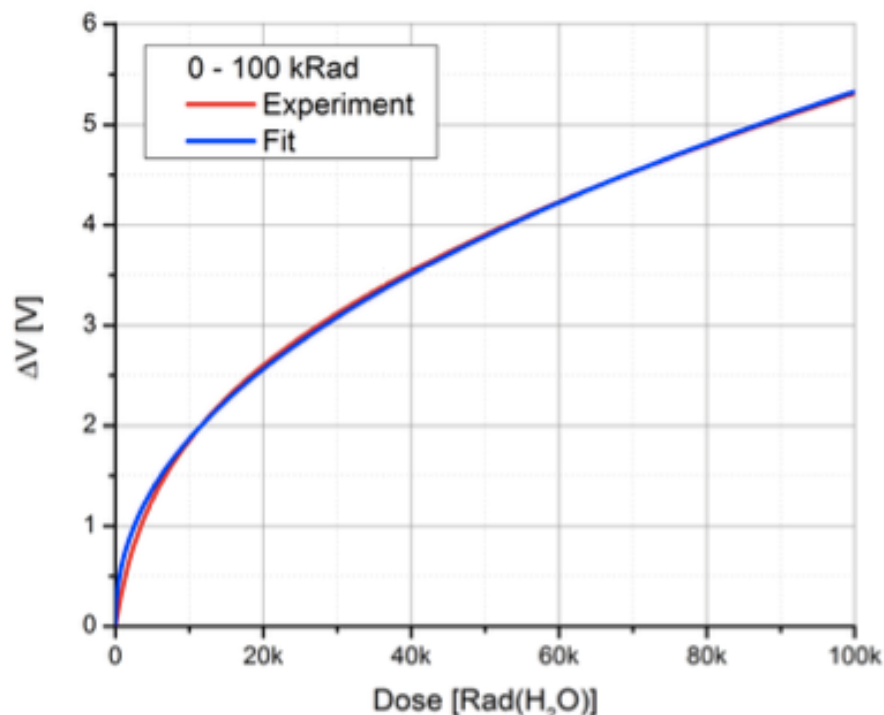


Figure 4: Typical calibration curve indicating change in RC_V during irradiation. Irradiation at room temperature with Co-60 gamma source, dose rate ~50 Gy/h (5 krad/h). All RADFET terminals grounded during irradiation. Measurements at room temperature.

Package Information

VT01 package specifications are given in Table 5, and package diagram in Figure 5.

Table 5: VT01 package specifications.

Description	Specification
Package Type	Six-pin plastic SOT-23 package
Package Dimensions (L x W x H)	2.90 mm x 2.80 mm x 1.10 mm (see Figure 5)

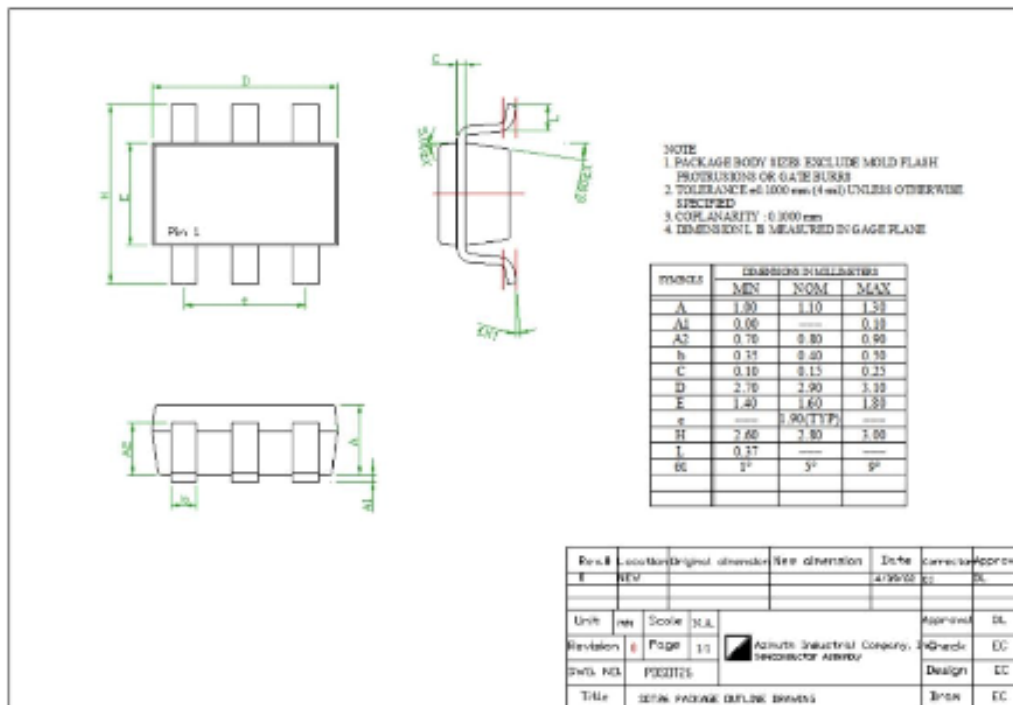


Figure 5: VT01 package diagram.

Recommended dimensions for solder pad layout are given Figure 6.

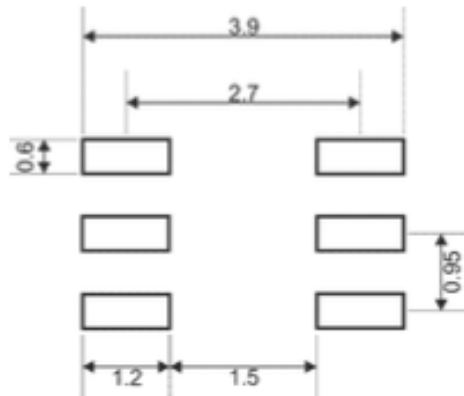


Figure 6: Recommended solder pad layout. All dimensions are in millimeters. Note the drawing is not to scale. Dimensions are inclusive of plating.

Handling

Our RADFETs undergo 100% electrical test and visual inspection immediately prior to shipment. Therefore all parts should reach the customer in excellent condition. To ensure that the RADFETs remain in this condition, please handle the parts as carefully as possible and observe standard precautions related to ESD sensitive devices.

Notes

We calibrate our standard products at room temperature using a Co-60 gamma-ray source. Irradiation is performed in a single event at the dose rate of ~50 Gy[Si]/hour (5 krad[Si]/hour) and includes the dose range from 1–1,000 Gy (100 rad – 100 krad).

Customers whose requirements include conditions significantly different from the above should contact support@varadis.com to discuss the optimum way to implement the RADFETs for their specific applications.

The VT01 has a large dynamic range, from 1 cGy (1 rad) to 1 kGy (100 krad).

While the supplied calibration curve covers doses from 1–1,000 Gy, other measurements at room temperature show that lower doses, down to 1cGy, can be detected. The lower the minimum dose required by the customer, the more accurate must be the RADFET temperature compensation and read-out electronics. Please contact support@varadis.com for further details if your application includes lower dose range.

Regarding the high end of the dose range, VT01 can measure doses even higher than 1 kGy (100 krad). However, the sensitivity decreases with dose and it depends on the actual application requirements whether this sensitivity loss is acceptable. As VT01 comes calibrated up to 1 kGy (100 krad), additional calibration is needed for measurements beyond this limit.