



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Radyoizotop termoelektrik jeneratörlerin (RTG) risk analizi: Uzay görevleri için enerji güvenliği

Ozan ÖZTÜRK¹

¹ Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu, Muğla, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
28.10.2024
Kabul tarihi
10.12.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (RTG)
Uzay Görevleri
Risk Yönetimi
Enerji Güvenliği

ÖZET

Uzay sondaları ve uzay araçları günümüz araştırmalarında en çok dikkat çeken konular arasındadır. Uzay sondalarının görev süresinin uzunluğu bu tükenmeyen dikkatin odağındadır. Bu akademik çalışma, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) uzay görevlerindeki kullanımını incelerken, bu teknolojinin getirdiği avantajları ve potansiyel riskleri ele alır. RTG'ler, güneş enerjisinin ulaşamadığı uzak uzay bölgelerinde güvenilir ve uzun ömürlü enerji sağlama yeteneği nedeniyle değerlidir. Ancak, radyoaktif maddelerle çalışmanın doğası gereği, bu teknoloji ciddi riskler taşır. Bunlar arasında radyoaktif yayılım, atık yönetimi, ısı transfer problemleri ve elektriksel arızalar bulunur. Makale, bu riskleri yönetmek için güçlendirilmiş kaplamalar, sıkı güvenlik protokolleri, düzenli bakım ve eğitim gibi çeşitli önlemlerin alınmasının önemini vurgular. Ayrıca, risk matrisi kullanılarak risklerin önceliklendirilmesi ve yönetim stratejilerinin belirlenmesi sağlanır. Bu stratejik yaklaşım, RTG teknolojisini daha güvenli ve etkili hale getirmeyi amaçlar.

Risk analysis of radioisotope thermoelectric generators (RTG): Energy security for space missions

ARTICLE INFO

Article history:

Received
28.10.2024
Accepted
10.12.2024
Published
31.12.2021

Keywords:

Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)
Space Missions
Risk Management
Energy Security

ABSTRACT

Space probes and spacecraft are among the most important topics in today's research. The length of the mission of space probes is at the center of this unending attention. This academic study examines the use of Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) in space missions, addressing the advantages and potential risks associated with this technology. RTGs are valued for their ability to provide reliable and long-lasting energy in remote regions of space where solar energy cannot reach. However, due to the nature of working with radioactive materials, this technology carries serious risks. These include radioactive emissions, waste management, heat transfer problems and electrical failures. The paper emphasizes the importance of taking various measures to manage these risks, such as reinforced coatings, strict safety protocols, regular maintenance and training. Furthermore, a risk matrix is used to prioritize risks and identify management strategies. This strategic approach aims to make RTG technology safer and more effective.

1. GİRİŞ

Uzay görevleri çeşitli amaçlar için gerçekleştirilmektedir. Bu görevler, dört ana kategoride toplanabilir, bunlar; keşif, bilimsel araştırma, iletişim ve navigasyon görevleri ile savunma ve güvenlik görevleridir [1]. Keşif görevlerinin temel amacı, güneş sistemi içindeki gezegenler, uydular ve diğer gök cisimleri üzerinde bilimsel deneyler yaparak, gezegenlerin yaşanabilirliğini ve dünya dışı yaşamı keşfetme potansiyelini artırmaktır [2,3]. Bunun yanı sıra, uzay turizmi, tüketicilere benzersiz deneyimler sunarak popülaritesini artıran bir alan haline gelmiştir [4].

ORCID ID: Ozan Öztürk: 0000-0002-4959-6808

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Ozan Öztürk, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde Motor Bakım, MUĞLA

Tel: +90 554 70960

E-mail: ozturkozan@mu.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: O. Öztürk, "Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) Risk Analizi: Uzay Görevleri için Enerji Güvenliği", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 125-135, Dec. 2024.

Uydular ya da uzay sondaları onlarca yıllarca süren görevlere çıkmaktadırlar. Uzun vadeli uzay misyonları, özellikle enerji kaynaklarının seçiminde titiz bir planlama gerektirir [5]. Güneş ışığının ulaşmadığı bölgelerde uzay görevleri imkânsız hale gelir [6]. Uzun süreler icra edilecek bu görevlerde uzay araçları enerji kaynağı olarak Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTG) terci ederler. Bu noktada, RTG'ler, uzay araştırmalarında enerji sağlama konusunda üstün bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [7].

Uzay seyahatlerinde RTG tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında uzun ömürlü ve güvenilir enerji sağlaması yer alır. RTG'ler, radyoaktif izotopların bozunması sırasında açığa çıkan ısıyı elektrik enerjisine çevirir ve bu sayede yıllarca kesintisiz enerji sağlar. Özellikle derin uzay görevlerinde güneş enerjisinin yetersiz olduğu ya da kullanılmadığı durumlarda RTG'ler ideal bir enerji kaynağıdır [8]. RTG, Voyager 1 ve 2 gibi derin uzay görevlerinde büyük bir avantaj sağlamışlardır [9]. Ayrıca, RTG'ler bakım gerektirmeyen yapıları ve hareketli parçalara sahip olmamaları sayesinde zorlu ortamlarda dahi güvenilir bir enerji kaynağı sunar. Bu özellik, tamir imkânı olmayan uzak bölgelerdeki uzun süreli görevler için çok önemlidir [1]. Sonuç olarak, RTG'ler güneş enerjisine bağımlı olmadan uzun süreli enerji sağlayabildikleri ve güvenilir oldukları için uzay görevlerinde tercih edilmektedir [7]. Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler ile alakalı yapılan literatür Çalışmaları Özeti olarak aşağıda tablo halinde verilmiştir. Bu çalışmalar;

Tablo 1. Literatür Taraması (Yazar Tarafından Oluşturulmuştur)

Çalışma	Referans	Bulgular
Uzay Keşif Görevleri	[2]	Uzay görevleri gezegenlerin yaşanabilirliğini ve dünya dışı yaşamın potansiyelini anlamayı amaçlamaktadır.
Uzay Görevlerinin Geleceği	[3]	Bilimsel deneyler ve uzay keşifleri güneş sisteminin evrimi ve gezegenlerin keşfine odaklanmaktadır.
Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler	[6]	Radyoaktif izotopların bozunması sonucu açığa çıkan ısının elektrik enerjisine dönüştürülmesi; askeri, endüstriyel ve tıbbi alanlarda kullanımı.
Voyager Misyonları ve RTG Kullanımı	[9]	Voyager misyonları RTG teknolojisi sayesinde 40 yılı aşkın süredir veri göndermeye devam etmektedir.
Alternatif Radyoizotoplar	[10]	238Pu yerine kullanılacak alternatif izotopların uygunluğu ve radyasyon emisyonlarının azaltılması üzerine araştırmalar yapılmıştır.
MMRTG Programı	[11]	Mars ve diğer gezegenlerin keşfi için geliştirilen MMRTG'ler, uzun ömürlü ve güvenilir enerji sağlamaktadır.
RTG Teknolojisinin Tarihçesi	[1]	RTG'lerin Apollo, Viking ve Curiosity misyonlarında uzun ömürlü ve güvenilir enerji kaynağı olarak başarıyla kullanıldığı belirtilmiştir.
Termoelektrik Jeneratörlerin Verimliliği	[12]	Termoelektrik jeneratörlerin genellikle %10'dan daha az verimle çalıştığı ifade edilmiştir.
Termoelektrik Jeneratörlerin Maliyetleri	[13]	Yüksek inşaat maliyetlerinin düşük işletme maliyetleriyle dengelendiği belirtilmiştir.
Gelişmiş Radyoizotop Güç Sistemleri	[14]	Geliştirilen radyoizotop güç sistemlerinin, yüksek özgül güç sağlamayı hedeflediği belirtilmiştir.

Bu makalenin amacı, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin uzay görevlerinde kullanımını, sağladığı avantajları ve karşılaşılan riskleri detaylıca incelemektir. Makale, RTG'lerin tarihsel gelişimini, kullanım alanlarını ve çevresel güvenlik risklerini ele alarak, bu alandaki mevcut düzenlemeleri ve en iyi uygulamaları değerlendirir. RTG'lerin doğru ve güvenli kullanımı, uzay araştırmalarının başarısı ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

2. Temel Kavramlar

2.1. RTG ve Tarihsel Kullanımı

RTG, radyoaktif izotopların doğal bozunması sonucu açığa çıkan ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır [5]. Bu dönüşüm, termoelektrik etki ile gerçekleştirilir; bu etki, ısı farkını doğrudan elektrik voltajına çevirir. RTG teknolojisi, 1950'lerin sonlarına dek uzanmakta ve ilk kullanımı 1961 yılında Transit 4A uydusu için gerçekleştirilmiştir. Bu teknoloji, Apollo, Viking ve Voyager gibi önemli uzay misyonlarında kritik roller oynamış, özellikle Voyager misyonları için sağladığı uzun süreli enerji, bu araçların

günümüze kadar bilgi göndermesini mümkün kılmıştır (NASA, 2013). RTG'ler, güneş ışığından bağımsız olarak çalışabilirler, bu da onları özellikle uzak gezegenler ve güneş sistemimizin dış bölgeleri gibi güneş enerjisinin yetersiz olduğu yerlerde ideal kılar [1].

Önemli RTG Uygulamaları:

- 1961: İlk RTG, Transit 4A uydusunda kullanılarak uzaya fırlatıldı.
- 1969: Apollo 12 misyonunda Ay'a inen ilk insanlı uzay aracı RTG kullandı.
- 1975: Viking 1 ve 2 misyonları, Mars yüzeyinde RTG teknolojisi ile enerji sağladı.
- 1977: Voyager 1 ve 2 misyonları, Jüpiter ve Satürn'e uzun süreli görevler için gönderildi.
- 1988: ABD'de Plütonyum-238 (Pu-238) üretimi askıya alındı.
- 1997: Cassini-Huygens misyonu, Satürn'e yönelik görevinde RTG kullandı.
- 2004: MMRTG programı geliştirildi.
- 2008: Alternatif radyoizotopların RTG'ler için uygunluğu incelendi.
- 2012: Curiosity aracı Mars'a indi ve RTG ile güçlendirildi [1,9,10,11].

RTG'lerin uzay görevlerinde tercih edilme nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Uzun Ömürlü ve Güvenilir Enerji Sağlama [5,7]
2. Güneş Işığına Bağımlı Olmamak [8]
3. Bakım Gerektirmeyen Yapıları [1]
4. Voyager Misyonları Gibi Uzun Süreli Kullanım Deneyimleri [9]

Uzay Görevlerinde RTG Kullanımının Avantajları, dezavantajları ve Potansiyel Riskleri bulunmaktadır. RTG Teknolojisinin Avantajları ve Dezavantajları;

RTG'lerin avantajları arasında uzun ömürlü enerji sağlama kapasitesi, hareketli parça içermemesi nedeniyle yüksek güvenilirlik ve çeşitli ortamlarda çalışma yeteneği bulunmaktadır [15]. RTG'ler, özellikle güneş enerjisinin yetersiz olduğu derin uzay misyonlarında vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Bu jeneratörler, radyoaktif izotopların bozunmasından elde edilen ısıyı termoelektrik dönüştürücülerle elektrik enerjisine çevirir [8]. Uzun ömürlü olmaları ve bakım gerektirmemeleri, onları güvenilir ve stratejik bir çözüm haline getirmiştir [6].

Bununla birlikte, RTG teknolojisinin bazı dezavantajları da vardır. Termoelektrik jeneratörler genellikle %10'dan daha düşük verimlilikle çalışmaktadır [12]. Ayrıca, radyoaktif izotopların taşınması ve kullanımı sırasında radyasyon sızıntısı riski de göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konudur [10].

Potansiyel Riskler:

1. Radyasyon Sızıntısı Riski: RTG'lerin kullanımı, içerdikleri radyoaktif materyaller nedeniyle sağlık ve çevresel riskler taşır. Özellikle, uzay aracı kazalarında radyoaktif materyallerin atmosfere sızması ciddi tehlikeler oluşturabilir [10].
2. Uzun Vadeli Atık Yönetimi: RTG'ler kullanıldıktan sonra yüksek derecede radyoaktif atık üretir. Bu atıkların güvenli bir şekilde yönetilmesi ve depolanması, önemli maliyet ve düzenlemeler gerektirir [1].

2.2. Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin Temel İlkeleri

RTG'ler, Seebeck etkisi olarak bilinen fiziksel ilkeye dayanmakta ve radyoaktif maddelerin doğal bozunması sonucu açığa çıkan ısıyı termoelektrik dönüştürücülerdir. Seebeck etkisi, iki farklı metal veya yarı iletken malzemenin uçlarının birleştirilmesi ve uçlar arasında bir sıcaklık farkı yaratılması durumunda ortaya çıkar. Seebeck katsayısı, malzemenin sıcaklık farkı karşısında ürettiği voltaj miktarını belirler [8]. RTG'lerde kullanılan radyoizotoplar, yüksek enerji yoğunluğuna ve uzun yarı ömre sahip olmalıdır. Plütonyum-238, bu özelliklere sahip ideal bir radyoizotoptur [1]. Plütonyum-238, neptünyum-237'nin nötronlarla bombardıman edilmesiyle üretilir. Üretim süreci ve güvenlik önlemleri, radyoaktif madde ile çalışmanın getirdiği riskleri minimize etmek için dikkatle yönetilmelidir [9].

RTG'lerin ana bileşenleri şunlardır:

- Radyoizotop Isı Kaynağı: Genellikle Plütonyum-238 kullanılır
- Termoelektrik Dönüştürücüler: Isıyı elektrik enerjisine dönüştüren cihazlar
- Isı Yönetim Sistemi: Isının etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar [1,9,15].

Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG), modern RTG tasarımlarından biridir ve esnek modüler tasarımı sayesinde çeşitli uzay görevlerinde kullanılabilir. NASA tarafından belirtilen MMRTG'nin tasarım hedefleri arasında, güç seviyelerinin optimize edilmesi, en az 14 yıl boyunca güvenilir enerji sağlanması ve yüksek güvenlik standartlarının korunması yer almaktadır. MMRTG, Mars Science Laboratory (Curiosity) gibi görevlerde başarıyla kullanılmıştır ve bu görevde, Mars yüzeyinde sürekli enerji sağlayarak önemli bilimsel keşiflerin yapılmasına olanak tanımıştır [9].

3. MATERYAL ve METOT

Bu makalede, RTG teknolojisinin uzay görevlerinde kullanımını ve bu teknolojinin güvenlik risklerini analiz etmek amacıyla bir literatür taraması yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, RTG'lerin tarihsel gelişimi, uzay misyonlarındaki kullanım alanları ve mevcut alternatif enerji kaynakları üzerine yapılmış önceki araştırmalar incelenmiştir. Bu kapsamda, RTG teknolojisinin performansı, güvenilirliği ve çevresel etkilerine odaklanan makaleler, raporlar ve resmî belgeler sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir. Makalenin amacı doğrultusunda, elde edilen veriler RTG'lerin uzun süreli uzay görevlerindeki başarısını ve riskleri minimize etme yollarını belirlemek için yapılandırılmıştır. Veriler, RTG teknolojisinin avantajları, dezavantajları ve güvenlik risklerinin değerlendirilmesi üzerine şekillendirilmiş olup, makalenin tartışma kısmında bu bulgular yorumlanmıştır.

3.1. Risk Analizi

Risk analizi, iş güvenliği ve gıda güvenliği de dahil olmak üzere birçok alanda potansiyel tehditleri ve fırsatları belirlemek, değerlendirmek ve yönetmek için sistematik bir yaklaşımdır. Bu süreç, birkaç temel bileşenden oluşur. İlk olarak, risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak potansiyel tehlikeler tanımlanır. Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Arıza Modları ve Etkileri Analizi (FMEA) gibi araçlar, tehlikelerin tanınmasında önemli rol oynar [16]. Sonrasında, olasılık ve etki analizi yapılır; bu aşamada belirlenen risklerin gerçekleşme olasılığı ve sonuçları değerlendirilir [17]. Özellikle gıda güvenliği bağlamında, nicel risk yönetimi zararların şiddetini ve olasılığını tahmin etmek için bilimsel verilerden yararlanır [18].

Risk yönetimi ise sürekli bir süreçtir ve değerlendirme sonuçları, siyasi önceliklerle uyumlu eyleme geçirilebilir stratejilere entegre edilir [18]. Ancak, risk analizi yapılandırılmış bir yaklaşım olmasına rağmen karmaşık olabilir. Özellikle endüstriyel sistemler veya gıda güvenliği düzenlemeleri gibi belirli bağlamlara adaptasyon gerektirir. Bu, çeşitli analitik araçların entegrasyonunu zorlaştırabilir [19].

Oluşturulan matris, olası risklerin olasılık ve etkilerine dayalı bir değerlendirme sunmakta ve hangi risklerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğini belirlemektedir. Risklerin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için iki temel kriter dikkate alınmıştır: olasılık ve etki. Olasılık, belirli bir riskin gerçekleşme ihtimalini ifade ederken, etki, gerçekleşmesi durumunda doğuracağı sonuçları ölçmektedir. Her iki kriter de 1 ile 5 arasında bir puanlama ile değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Olasılık Skalası ve Etki Skalası

Olasılık Skalası	Etki Skalası
1 = Çok düşük	1 = Çok düşük
2 = Düşük	2 = Düşük
3 = Orta	3 = Orta
4 = Yüksek	4 = Yüksek
5 = Çok yüksek	5 = Çok yüksek

3.2. Potansiyel Riskler ve Hata Türleri

Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTG), radyoaktif izotopların bozunmasından elde edilen ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren güvenilir ve uzun ömürlü cihazlardır. RTG'ler, özellikle güneş enerjisinin yetersiz olduğu uzay görevleri gibi uzun süreli enerji gereksinimlerinde kullanılır [10]. Ana radyoizotop olarak Plütonyum-238 tercih edilir çünkü yarı ömrü uzun ve enerji yoğunluğu yüksektir [6]. RTG'ler, Voyager ve Mars misyonlarında olduğu gibi uzay araçlarına enerji sağlar, ayrıca denizaltılar ve uzak araştırma istasyonlarında da kullanılır [1,9]. Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (RTG) teknolojisinin kullanımı, radyoaktif maddeler, termoelektrik sistemler ve çevresel/operasyonel koşullarla ilgili çeşitli riskleri beraberinde getirir. Bu riskler, doğru önlemler alınmadığı takdirde ciddi sonuçlar doğurabilir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Radyoaktif Yayılım Riski:

Uzay araçlarında kullanılan Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTG), yapısal hasarlar, kaza veya doğal afetler sonucunda radyoaktif izotoplarının çevreye yayılması riskini taşır. Atmosferik giriş sırasında meydana gelebilecek kazalar, bu radyoaktif maddelerin çevreye dağılmasına yol açarak insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde ciddi zararlara neden olabilir. Bu durum radyasyon hastalıklarına, kanser riskinin artmasına ve çevresel kirliliğe yol açabilir. Bu tür riskleri en aza indirmek için RTG'ler, yüksek güvenlik standartlarına uygun olarak üretilmeli, güçlendirilmiş kaplamalar kullanılmalı ve acil durum planları detaylandırılarak düzenli tatbikatlarla test edilmelidir [11].

Radyoaktif maddelerin yayılmasını önlemek için RTG tasarımlarında, malzeme mühendisliği teknikleriyle yüksek mukavemetli kaplamalar kullanılmalıdır. Özellikle, çift katmanlı güvenlik kaplamaları ve termal genişleme dengesi sağlayan malzemeler, uzayda meydana gelebilecek ani darbelere karşı koruma sağlayabilir. Ayrıca, RTG'nin güvenlik analizleri için ileri düzey simülasyon teknikleri ve risk modelleme yöntemleri kullanılmalıdır [20, 21].

4.2. Radyoaktif Atık Yönetimi:

Radyoaktif atıkların uygun olmayan şekilde depolanması veya bertaraf edilmesi, çevresel ve insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturur. Özellikle uzay görevlerinden dönen radyoaktif atıkların yanlış yönetimi, su ve toprak kirliliğine yol açarak ekosistemlere ve doğal yaşama zarar verebilir. Bu atıkların su kaynaklarına sızması, geniş çevresel kirliliğe ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olabilir. Bu risklerin önlenmesi için güvenli depolama kapları kullanılmalı ve ulusal ve uluslararası düzenlemelere uygun güvenli depolama alanları oluşturulmalıdır. Uzay ajansları ve ilgili kurumlar, radyoaktif atık yönetimi protokollerini sürekli gözden geçirerek bu alanda en iyi uygulamaları uygulamalıdır [10].

Radyoaktif atık yönetiminde, termal dirençli kompozit malzemelerden yapılmış kaplar kullanılmalı ve atıkların uzun süreli depolanması için derin jeolojik depolama alanları optimize edilmelidir. Ayrıca, sensör destekli izleme sistemleriyle bu depolama alanlarının güvenliği sürekli kontrol edilmelidir [22].

4.3. Termoelektrik Sistemle İlgili Riskler

4.3.1. Isı Transfer Problemleri:

Malzeme yorgunluğu ve termal stres, RTG'lerin uzun süreli kullanımında ciddi sorunlara yol açabilir. Özellikle aşırı ısı nedeniyle malzemelerde deformasyon oluşabilir ve bu da ısı transferinin yetersiz kalmasına neden olabilir. Yetersiz ısı transferi, RTG'nin ürettiği enerji miktarını azaltarak cihazın arızalanmasına ve verimlilik kaybına yol açabilir. Bu durum, uzay araçlarının kritik görevlerinin başarısız olmasına neden olabilir. Sorunların önüne geçmek için yüksek kaliteli malzemelerin kullanımı, düzenli bakım ve termal stres analizleri yapılmalıdır. Bu önlemler, malzemelerin yıpranmasını erken tespit ederek sistem arızalarının önlenmesine yardımcı olur [23].

Isı transfer sistemlerindeki verimliliği artırmak için, nanoteknolojik kaplamalar ve yüksek termal iletkenlik gösteren yeni nesil malzemeler kullanılabilir. Ayrıca, ısı kaybını azaltmak için termoelektrik bacakların geometrik optimizasyonu sağlanmalıdır. Bu tür iyileştirmeler, enerji üretim verimliliğini artırabilir [24].

4.3.2. Elektriksel Arızalar:

Elektrik bileşenlerinin arızalanması ve kısa devreler, RTG'nin elektrik üretiminde kesintilere neden olabilir. Bu durum, bileşenlerin aşırı yüklenmesi veya yaşlanması sonucu ortaya çıkar ve özellikle uzay görevlerinde uzun süreli kullanımda termal stres gibi faktörlerle tetiklenebilir. Elektriksel arızalar, RTG'nin işlevselliğini kaybetmesine ve bağlı olduğu sistemlerin devre dışı kalmasına yol açarak görevlerin başarısız olmasına neden olabilir. Bu tür sorunların önüne geçmek için yedekleme sistemleri, düzenli testler ve aşırı yük koruma önlemleri alınmalıdır. Elektrik bileşenlerinin düzenli bakımları, aşırı yüklenme ve yaşlanma belirtilerini erken tespit etmeyi sağlar. Ayrıca, aşırı yük koruma sistemleri, elektrik bileşenlerinin güvenliğini artırmada kritik bir rol oynar [25].

Elektriksel arızaların önlenmesi için akıllı kontrol sistemleri ve yedekleme mekanizmaları kullanılmalıdır. Örneğin, devre kesiciler ve güç dengeleme sistemleri, aşırı yüklenmelerin etkisini azaltabilir. Ayrıca, modüler tasarımlar sayesinde elektrik arızalarının etkisi lokalize edilebilir [26].

4.4.Çevresel ve Operasyonel Riskler

4.4.1.Uzay Görevleri ve Çevresel Koşullar:

Uzay ortamının zorlu koşulları, özellikle vakum, sıcaklık dalgalanmaları ve radyasyon, malzemelerin bozulmasına ve sistem hatalarına yol açabilir. Uzaydaki sıcaklık farkları ve radyasyon seviyeleri, Dünya koşullarından çok farklı olduğundan, bu koşullar malzemelerin termal genişleme ve büzülmesini etkileyerek yapısal bütünlüğü bozabilir. Ayrıca, radyasyon malzemelerin zamanla yıpranmasına neden olabilir. Bu durum, RTG'nin işlevselliğini olumsuz etkileyerek uzay görevlerinin başarısını riske atabilir. RTG'nin verimliliğinin azalması, uzay aracının enerji ihtiyacının karşılanamamasına ve görev süresinin kısalmasına yol açabilir. Sistem hataları da uzay aracının kritik işlevlerinin devre dışı kalmasına sebep olabilir. Bu riskler, dayanıklı malzeme seçimi, kapsamlı testler ve çevresel simülasyonlarla minimize edilebilir. Uzay koşullarına dayanıklı malzemelerin kullanılması ve bu malzemelerin vakum, radyasyon ve geniş sıcaklık aralıklarına dayanıklılığının test edilmesi, RTG sistemlerinin güvenilirliğini artırır. Ayrıca, çevresel simülasyonlar, uzay ortamının gerçek koşullarını taklit ederek olası sorunların önceden tespit edilmesini sağlar [1].

Uzay ortamındaki termal şoklar ve radyasyon etkilerine karşı, çok katmanlı izolasyon sistemleri ve radyasyona dayanıklı alaşımlar kullanılabilir. Ayrıca, uzay simülasyon ortamlarında yapılan testler, gerçek koşullara yakın sonuçlar sağlayarak tasarım güvenilirliğini artırabilir [27].

4.4.2. İnsan Hataları:

Eğitim programlarına artırılmış gerçeklik (AR) ve simülasyon tabanlı senaryolar dahil edilmelidir. Bu teknolojiler, operatörlerin gerçek zamanlı tepki verme kabiliyetini geliştirir ve hata oranlarını azaltır [25]. Eğitim eksikliği ve prosedür hataları, RTG'lerin yanlış işletilmesine ve güvenlik ihlallerine neden olabilir. Özellikle acil veya beklenmedik durumlar sırasında, personelin yeterli eğitim almaması, güvenlik protokollerinin ve acil durum prosedürlerinin yanlış uygulanmasına yol açabilir. Yanlış işletim ve güvenlik ihlalleri, radyoaktif maddelerin yanlış yönetimi sonucunda ciddi kazalara ve çevre kirliliğine neden olabilir. Bu durum, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bu risklerin minimize edilmesi için düzenli eğitim programları, net prosedürler ve sürekli denetimler gereklidir. Personel, RTG'lerin kullanımı ve bakımı konusunda düzenli eğitim almalı ve bu eğitim sürekli güncellenmelidir. Ayrıca, güvenlik protokolleri ve acil durum prosedürleri net bir şekilde tanımlanmalı ve düzenli olarak gözden geçirilmelidir. Denetimler, olası hataların önceden tespit edilmesine ve gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olur [25].

4.5. RTG Teknolojisinde Risklerin Yönetimi ve Alınması Gereken Önlemler

RTG kullanımı sırasında karşılaşılabilecek risklerin yönetimi, güvenlik ve verimliliği sağlamak için önemli önlemler gerektirir. Bu önlemler, radyoaktif maddeler, termoelektrik sistemler ve çevresel/operasyonel koşullarla ilgili risklerin her birini spesifik olarak ele almalıdır. RTG teknolojilerinde risk yönetimi için, yapay zekâ tabanlı analiz araçları kullanılarak önleyici bakım algoritmaları geliştirilebilir. Bu algoritmalar, sistemin ömrünü uzatırken arızaların erken tespit edilmesine olanak tanır. Ayrıca, uluslararası standartlara uygun bir güvenlik çerçevesi oluşturulmalı ve sürekli güncellenmelidir [28].

4.5.1. Radyoaktif Yayılım Riskinin Yönetimi

Radyoaktif yayılım risklerini en aza indirmek için, kaplama sistemlerinde çok katmanlı kompozit malzemelerin kullanımı önerilmektedir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara ve mekanik şoklara karşı direnç sağlarken radyasyondan kaynaklanan malzeme bozulmasını önleyebilir. Ayrıca, ileri analiz yöntemleri kullanılarak güvenlik senaryoları test edilmeli ve modelleme teknikleriyle risk yönetim planları optimize edilmelidir [20]. RTG'lerin radyoaktif maddelerin yayılmasını önlemek için güçlendirilmiş kaplama sistemlerine sahip olması gerekir. Bu kaplamalar, yüksek mukavemetli ve radyasyona dayanıklı malzemelerden üretilmelidir. Ayrıca, sıkı güvenlik protokolleri uygulanmalı ve acil durum planları hazırlanarak düzenli tatbikatlar yapılmalıdır. Bu önlemler, radyoaktif yayılım risklerini en aza indirir [11].

4.5.2. Radyoaktif Atık Yönetimi

Radyoaktif atık yönetiminde, yeni nesil nano-yapılı kaplama teknolojileri, sızdırmazlık performansını artırabilir. Ek olarak, derin jeolojik depolama alanlarında sensör destekli izleme sistemleri kullanılmalı ve uzun süreli güvenlik raporlamaları oluşturulmalıdır. Bu sistemler, çevresel risklerin gerçek zamanlı takibini sağlayabilir [22]. Radyoaktif atıkların güvenli bir şekilde saklanması ve yönetilmesi, çevresel etkilerin azaltılması açısından önemlidir. Radyoaktif atıkların uygun depolama kaplarında saklanması, sızdırmazlık sağlamalı ve uzun vadeli depolama çözümleri kullanılmalıdır. Ayrıca, ulusal ve uluslararası düzenlemelere uyulmalıdır [10].

4.5.3. Termoelektrik Sistemle İlgili Risklerin Yönetimi

4.5.3.1. Isı Transfer Problemlerinin Yönetimi

Termal stres kaynaklı bozulmaları önlemek için, termoelektrik sistemlerde nano kaplamalar ve yüksek performanslı termal yağlar kullanılabilir. Ayrıca, ileri düzey termal modelleme yöntemleri, potansiyel zayıf noktaların tespiti için kritik öneme sahiptir [24, 29]. RTG'lerin verimliliğini artırmak ve malzeme bozulmasını önlemek için düzenli bakım yapılmalıdır. Ayrıca, termal stres ve aşınmaya dayanıklı yüksek kaliteli malzemeler kullanılmalı ve termal stres analizleri düzenli olarak gerçekleştirilmelidir [23].

4.5.3.2. Elektriksel Arızaların Yönetimi

Elektriksel arızaların etkisini azaltmak için yedekleme sistemleri oluşturulmalı ve düzenli testler yapılmalıdır. Aşırı yük koruması ile elektrik bileşenlerinin güvenliği artırılmalı, böylece kısa devre gibi sorunlar önlenmelidir [25]. Elektriksel arızaların minimize edilmesi için, enerji dengeleme algoritmaları ve akıllı güç yönetim sistemleri kullanılabilir. Özellikle, kısa devre algılama sensörleri ve otomatik devre kesiciler RTG'nin güvenilirliğini artırabilir [26].

4.5.4. Çevresel ve Operasyonel Risklerin Yönetimi

4.5.4.1. Uzak Görevleri ve Çevresel Koşulların Yönetimi

Uzak koşullarına dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi için, termomekanik testler ve radyasyon etkisi analizleri yapılmalıdır. Bu süreç, malzemelerin uzun vadeli dayanıklılığını artırarak görev başarısını garanti altına alır. Ayrıca, modüler tasarım yöntemleriyle sistemlerin bakımı ve onarımı kolaylaştırılabilir [27]. Uzak ortamının sert koşullarına dayanabilecek malzemelerin seçimi, RTG sistemlerinin güvenilirliğini sağlar. Malzemeler, uzak koşullarına dayanıklılık açısından kapsamlı testlerden geçirilmeli ve çevresel simülasyonlarla bu durumlar önceden değerlendirilmelidir [1].

4.5.4.2. İnsan Hatalarının Yönetimi:

İnsan hatalarının önlenmesi için, uzaktan eğitim modülleri ve sanal gerçeklik tabanlı simülasyonlar kullanılabilir. Ayrıca, güvenlik prosedürleri düzenli olarak güncellenmeli ve her görev öncesinde detaylı tatbikatlar yapılmalıdır. Eğitim eksikliği ve prosedür hataları, RTG'lerin yanlış işletilmesine neden olabilir. Bu nedenle, personel düzenli eğitim almalı, net prosedürler oluşturulmalı ve denetimler yapılmalıdır. Böylece güvenlik protokolleri ve acil durum planlarının doğru uygulanması sağlanır [25].

4.6. Risk Matrisinin Oluşturulması

Olasılık ve etki puanları, literatürdeki bilgiler ve risklerin doğası göz önünde bulundurularak atanmıştır. Aşağıda bazı önemli risklerin olasılık ve etki puanları verilmiştir:

- **Radyoaktif yayılım riski:** Olasılık (2), Etki (5). Bu risk, özellikle atmosferik giriş sırasında meydana gelebilecek kazalarda radyoaktif maddelerin çevreye yayılmasından kaynaklanır. RTG'lerin geçmiş uzay görevlerindeki güvenlik performansları göz önüne alınarak bu riskin olasılığı düşük olarak değerlendirilmiştir. Ancak etkisi, insan sağlığı ve çevresel faktörler açısından çok ciddi sonuçlara yol açabileceğinden yüksek olarak belirlenmiştir [10,11].

- **Radyoaktif atık yönetimi:** Olasılık (3), Etki (4). RTG'lerden kaynaklanan radyoaktif atıkların uzun vadeli yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir konudur. Plütonyum-238'in üretim ve bertaraf süreçleri, atık yönetimiyle ilgili zorlukları artırmaktadır. Bu nedenle, olasılık orta, etkisi ise ciddi olarak değerlendirilmiştir [1,9]. Plütonyum-238 Atıklarının Yönetimi kısmı iki alt başlığa ayrılmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir;

Kaplama Malzemeleri:

- a. Iridyum Alaşımları: Plütonyum-238 kapsüllerinde radyasyonun dışarı sızmasını önlemek için kullanılan iridyum, yüksek sıcaklık dayanımı ve uzun ömürlü yapısıyla tercih edilmektedir [9,10].
- b. Karbon Karbon Kompozitler: Yüksek termal dayanım ve mekanik mukavemet sağlayan bu malzemeler, özellikle atmosferik giriş sırasında oluşan yüksek sıcaklıklara karşı koruma sağlar [11].
- c. POCO Grafit: Yüksek yoğunluklu ve düşük geçirgenlikli bu malzeme, radyoaktif materyallerin güvenli bir şekilde muhafaza edilmesine yardımcı olur [10].

Güvenli Saklama Teknikleri:

- a. Çok Katmanlı Koruma: Iridyum ve karbon-karbon katmanlarından oluşan kapsüller hem radyasyonu engeller hem de darbelere karşı koruma sağlar [9,11].

- b. Yeraltı Depolama: Uzun vadeli saklama için özel yeraltı depoları, sızıntıyı engellemek amacıyla çok katmanlı bariyerlerle inşa edilmiştir [1].
- c. Yüksek Basınçlı Kapsülleme: Kapsüller, radyoaktif sızıntıları önlemek için yüksek basınç dayanımına sahiptir ve kazalarda koruma sağlar [9].
- **Isı transfer problemleri:** Olasılık (3), Etki (3). Termal stres ve malzeme yorgunluğu nedeniyle oluşabilecek ısı transfer problemleri, özellikle RTG'nin uzun süreli çalışması durumunda ortaya çıkabilir. Bu nedenle bu risk, orta düzeyde olasılık ve etkiye sahiptir. Malzeme bozulması, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) uzun vadeli performansını etkileyen kritik bir faktördür. Aşağıda malzemelerin performansı ve ısı transferi sorunlarına ilişkin şu önemli noktalar vurgulanmıştır:
 1. **Termal Malzemelerin Performansı:**
 - Termal yorgunluk, malzemelerde mikro çatlaklara neden olarak ısı transferini düşürür.
 - Malzeme genleşme uyumsuzluğu, bağlantı noktalarında stres birikimine yol açabilir.
 - Korozyon ve oksidasyon, malzeme dayanımını zayıflatarak verimliliği azaltır.
 2. **Isı Dağılımı:**
 - Isı kaynaklarının eşit dağılmaması, termoelektrik dönüştürücülerde verim kaybına yol açar.
 - Sıcaklık farklarındaki azalma, elektrik üretimini olumsuz etkiler.
 - Farklı malzemelerin ısı iletkenlikleri, performansı doğrudan etkiler.
 3. **Çözüm Önerileri:**
 - Yüksek sıcaklık dayanımlı malzemeler (karbon kompozitler, iridyum alaşımları) önerilmektedir.
 - Termal tasarım optimizasyonu ile termal stres ve sıcaklık dengesizlikleri azaltılabilir.
 - Oksidasyon ve radyasyona karşı koruyucu kaplamalar kullanılmalıdır.

Malzeme bozulmasını önlemek için gelişmiş malzeme seçimi ve termal tasarım optimizasyonu kritik öneme sahiptir. Bu önlemler, RTG'lerin uzun vadeli enerji üretim performansını artırabilir [30]. En sık karşılaşılan Isı Transferi Arızaları Alt Türleri ve Risk Analizi aşağıda verilmiştir.

Tablo 3. Isı Transferi Arızaları Alt Türleri ve Risk Analizi

Arıza Türü	Olasılık (1-5)	Etki (1-5)	Risk Skoru	Referanslar
Malzeme yorgunluğu	3	3	9	[31]
Termal stres	3	3	9	[25]
Aşırı sıcaklık farkları	3	3	9	[9]

- **Elektriksel arızalar:** Olasılık (2), Etki (4). Elektrik bileşenlerinde meydana gelebilecek kısa devreler ve diğer elektriksel sorunlar, RTG'nin işlevselliğini bozabilir. Bu risk, yüksek kaliteli yedekleme sistemleri ile sınırlı tutulsa da etkisi kritik görevlerde belirgin hale gelir [25].

Nükleer enerji santralleri büyük ölçekli elektrik üretirken, radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTG) radyoaktif bozunmadan elde edilen ısıyı elektriğe çevirerek küçük ölçekli, uzun ömürlü enerji sağlar. RTG'ler, uzay görevleri gibi erişilmesi zor yerlerde kullanılırken, nükleer santraller şehirlerin enerji ihtiyacını karşılayacak kapasitededir. RTG'ler hareketli parça içermediği için dayanıklıdır ancak enerji üretimi sınırlıdır [32-34].

Elektrik bileşenlerinde kısa devre ve aşırı yüklenme sorunları, RTG sistemlerinde görev sürekliliğini tehdit eden önemli risklerdir. Bu sorunlar genellikle aşırı yüklenme, kısa devre, radyasyon etkileri ve termal stres nedeniyle ortaya çıkar. Yedekleme sistemleri bu tür riskleri önlemek ve görev sürekliliğini sağlamak için kritik bir rol oynar.

1. Yedekleme Sistemlerinin Faydaları:
 - Görev Sürekliliği: Arıza durumunda devreye girerek sistemin çalışmasını kesintisiz sürdürür.
 - Aşırı Yük ve Termal Koruma: Yük ve sıcaklık limitlerini izleyerek sistem bileşenlerini korur.
 - Çoklu Güç Kaynağı: Birincil enerji kaynağında arıza meydana geldiğinde yedek güç kaynağı devreye girer.
2. Koruma ve Önleyici Bakım:
 - Düzenli testler ve simülasyonlarla arıza olasılıkları azaltılır.
 - Yüksek kaliteli yalıtım malzemeleri ve modüler tasarım, arıza etkilerini sınırlamak için kullanılır.

Sonuç olarak, yedekleme sistemleri, elektriksel arızaları önlemede ve RTG sistemlerinin uzun vadeli güvenilirliğini artırmada kritik bir çözüm sunar [25,9]

- **Uzay görevlerinde malzeme bozulması:** Olasılık (3), Etki (5). Uzay koşullarındaki sıcaklık dalgalanmaları ve radyasyonun malzemelere zarar verme potansiyeli nedeniyle bu risk yüksek bir etkiye sahiptir. Malzeme seçimindeki iyileştirmeler bu riskin olasılığını azaltmıştır [1].
- **İnsan hataları:** Olasılık (4), Etki (4). Eğitim eksikliği veya prosedür hataları, özellikle kritik görevlerde kazalara ve güvenlik ihlallerine neden olabilir. Bu durum, insan faktörlerinin düzenli eğitimlerle kontrol altına alınmasının önemini göstermektedir [25]. En sık karşılaşılan İnsan Hatalarının Alt Türleri ve Risk Analizi aşağıda verilmiştir.

Tablo 4. İnsan Hatalarının Alt Türleri ve Risk Analizi

Alt Tür	Olasılık (1-5)	Etki (1-5)	Risk Skoru	Referanslar
Eğitim eksikliği	4	4	16	[9]
Prosedür hataları	3	5	15	[1]
Yetersiz denetim	4	4	16	[11]

Bu puanlar hem gerçekleşme olasılığını hem de oluşabilecek sonuçların ciddiyetini göz önüne alarak riskleri daha kesin bir şekilde sınıflandırmamıza olanak tanımaktadır. Her risk için bir risk skoru, olasılık ve etkinin çarpımıyla hesaplanmıştır. Bu çarpım yöntemi, risklerin öncelikle hale gelmesi ve yönetim stratejilerinin oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır.

Tablo 5. Risk Matrisi

Riskler	Olasılık (1-5)	Etki (1-5)	Risk Skoru (Olasılık x Etki)	Referanslar
Radyoaktif yayılım riski	2	5	10	[10,11]
Radyoaktif atık yönetimi	3	4	12	[1,9]
Isı transfer problemleri	3	3	9	[30]
Elektriksel arızalar	2	4	8	[25]
Uzay görevlerinde malzeme bozulması	3	5	15	[1]
İnsan hataları	4	4	16	[9]

Bu risk puanları hem gerçekleşme olasılığını hem de oluşabilecek sonuçların ciddiyetini göz önünde bulundurarak riskleri daha kesin bir şekilde sınıflandırmamıza olanak tanımaktadır. Her risk için bir risk skoru, olasılık ve etkinin çarpımıyla hesaplanmıştır. Bu yöntem, risklerin öncelikli hale gelmesi ve yönetim stratejilerinin oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır. Örneğin, insan hatası riski (16) ve malzeme bozulması riski (15) öncelikli olarak ele alınması gereken riskler olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, elektriksel arızalar gibi nispeten düşük riskli olaylar daha az öncelik taşır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) uzay görevlerindeki kullanımını kapsamlı bir şekilde ele alarak bu teknolojinin avantajlarını, karşılaşılan riskleri ve bu risklerin yönetimi için gerekli stratejileri incelemiştir. RTG'ler, uzun süreli enerji gereksinimlerini karşılamak için sunduğu benzersiz avantajlarla uzay görevlerinin başarısında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle derin uzay görevlerinde, güneş enerjisine bağımlı olmaksızın kesintisiz enerji sağlama kapasitesi, RTG'leri vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmiştir.

Araştırmanın bulguları, RTG'lerin etkin kullanımı için üç temel gerekliliği öne çıkarmaktadır:

- **Güvenlik ve Dayanıklılık:** RTG'lerin güvenilirliği, radyoaktif maddelerin yayılma riskinin minimize edilmesiyle artırılabilir. Çok katmanlı kompozit malzemelerin kullanımı, radyasyonun etkilerini azaltırken sistem dayanıklılığını artırabilir. Güçlendirilmiş kaplamalar ve sıkı güvenlik protokolleri ile bu risklerin önlenmesi sağlanabilir.
- **Termal ve Elektriksel Verimlilik:** Termoelektrik sistemlerin ısı transfer verimliliği ve elektriksel performansı, yeni nesil malzemeler ve gelişmiş modelleme teknikleriyle optimize edilebilir. Nano kaplamalar ve yüksek performanslı termal yağların kullanımı, enerji üretimini artırarak uzun vadeli görevlerde sistemin güvenilirliğini sağlar.

- Risk Yönetimi ve Eğitim: İnsan hatalarının etkisini azaltmak için, artırılmış gerçeklik (AR) ve simülasyon tabanlı eğitim programları önerilmektedir. Eğitim ve prosedürlerin güncellenmesi, olası hata oranlarını minimize ederek güvenlik standartlarını yükseltebilir.

Çalışmanın sonuçları, RTG teknolojisinin uzay araştırmalarında daha geniş bir uygulama alanına sahip olabileceğini ve bu teknolojinin doğru yönetim stratejileri ile insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel risklerin azaltılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, uluslararası standartlara uygun güvenlik protokolleri ve sürekli geliştirilen malzeme teknolojileri, RTG'lerin etkinliğini ve güvenilirliğini artırmada kritik rol oynayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, RTG teknolojisinin uzay görevlerindeki stratejik önemini vurgulamış ve gelecekteki çalışmalar için bir çerçeve sunmuştur. Gelişmiş malzemeler, simülasyon teknikleri ve güvenlik önlemleri ile desteklenen bu teknoloji, uzay keşiflerinin sınırlarını genişletmek için büyük bir potansiyele sahiptir.

YAZAR KATKILARI

Çalışma tek yazar tarafından yazılmıştır. Tüm çalışma yazar tarafından yapılmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Çalışmada çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR

- [1] A. C. Taner, "Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (Radioisotope Thermoelectric Generator – RTG) inovasyon teknolojili Plutonyum-238 atom yakıtlı robot uzay araçları", Fizik Mühendisleri Odası Yayınları, 2011.
- [2] W. Wu, C. Wang, Y. Liu, L. Qin, W. Lin, S. Ye, H. Li, F. Shen, and Z. Zhang, "Frontier scientific questions in deep space exploration", Chinese Science Bulletin, vol. 68, no. 6, pp. 606–627, 2023, doi: 10.1360/TB-2022-0667.
- [3] N. Cox et al., "EXPLORE- Innovative scientific data exploration and exploitation applications for (planetary) space sciences", presented at the Europlanet Science Congress 2022, Granada, Spain, Sep. 2022, doi: 10.5194/epsc2022-507.
- [4] B. Shen, "Exploration methods in reinforcement learning", in 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2022, pp. 709–713, doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9918998.
- [5] K. Kha, S. Whitley, and K. Fretz, "Cost and considerations for successful implementation of long duration space missions", presented at the 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023, doi: 10.1109/AERO55745.2023.10115892.
- [6] O. L. Ayodele, D. N. Luta, and M. T. Kahn, "A micro-nuclear power generator for space missions", Energies, vol. 16, no. 4422, 2023, doi: 10.20944/preprints202304.1058.v1.
- [7] M. A. Hayder, H. B. Estrada, N. J. Lindsey, and M. Pecht, "Assessment of the calendar aging of lithium-ion batteries for long-term space missions", Frontiers in Energy Research, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1108269.
- [8] L. Tailin, L. Youhong, Z.g Yingzeng, C. Haodong, X. Qingpei, Z. Jun, Z. Rende, L. Yi, and X. Yongchun., "Comprehensive modeling and characterization of Chang'E-4 radioisotope thermoelectric generator for lunar mission", Applied Energy, vol. 336, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120865.
- [9] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) Fact Sheet", 2013. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/pdf/719139main_MMRTG_Factsheet.pdf.
- [10] R. C. O'Brien, R. M. Ambrosi, N. P. Bannister, S. D. Howe, and H. V. Atkinson, "Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications", Journal of Nuclear Materials, vol. 377, no. 3, pp. 506–521, 2008, doi: 10.1016/j.jnucmat.2008.04.009.
- [11] F. Ritz, "Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) Program Overview", presented at the IEEE Aerospace Conference, 2004, doi: 10.1109/AERO.2004.1367632.
- [12] S. Sethumadhavan and D. Burger, "Powering a cat warmer using Bi₂Te₃ thin-film thermoelectric conversion of microprocessor waste heat", presented at the ASPLOS, 2006.
- [13] D. M. Rowe, "Thermoelectrics, an environmentally friendly source of electrical power", Renewable Energy, vol. 16, pp. 1251–1256, 1999, doi: 10.1016/S0960-1481(98)00512-6.
- [14] A. Misra, "Overview of NASA Program on Development of Radioisotope Power Systems with High Specific Power", presented at the 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 2006, doi: 10.2514/6.2006-4187.
- [15] O. Ersoz, "Radioisotope thermoelectric generator (RTG)", Applied Physics Press, 2008.
- [16] B. Elahi, "Risk analysis techniques", in Safety risk management for medical devices, 2nd ed., Elsevier, 2022, pp. 89–153, doi: 10.1016/b978-0-323-85755-0.00014-x.
- [17] S. Chelak, "Risk analysis and assessment", Ekonomika i upravljenie: problemy, rešenîa, 2024, doi: 10.36871/ek.up.p.r.2024.03.07.029.
- [18] C. Heggum, "Risk analysis and quantitative risk management", in Encyclopedia of meat sciences, 3rd ed., Elsevier, 2024, pp. 540–550, doi: 10.1016/b978-0-323-85125-1.00067-3.

- [19] M. Shahrokhi, M. V. Sarashk, and A. Bernard, "Risk Analysis, a Fuzzy Analytic Approach", in Risk Management, Sustainability and Leadership, IntechOpen, 2023, doi: 10.5772/intechopen.108535.
- [20] R. M. Ambrosi, H. Williams, E. J. Watkinson, A. Barco, R. Mesalam, T. Crawford, C. Bicknell, P. Samara-Ratna, D. Vernon, N. Bannister, D. Ross, J. Sykes, M. C. Perkinson, C. Burgess, C. Stroud, S. Gibson, A. Godfrey, R. G. Slater, M. J. Reece, K. Çen, K. Simpson, R. Tuley, M. Sarsfield, T. P. Tinsley, K. Stephenson, D. Freis, J. F. Vigier, R. JM Konings, C. Fongarland, M. Libessart, J. Merrifield, D. P. Kramer, J. Byrne and B. Foxcroft, "European Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) and Radioisotope Heater Units (RHUs) for Space Science and Exploration," Space Science Reviews, vol. 215, no. 55, 2019, doi: 10.1007/s11214-019-0623-9.
- [21] R. D. Lorenz and E. S. Clarke, "Influence of the Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) on the local atmospheric environment", Planetary and Space Science, vol. 193, p. 105075, 2020.
- [22] J. S. Dustin and R. A. Borrelli, "Assessment of alternative radionuclides for use in a radioisotope thermoelectric generator", Nuclear Engineering and Design, vol. 385, p. 111475, 2021, doi: 10.1016/j.nucengdes.2021.111475.
- [23] O. Ersoz, "Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)", MMRTG Fact Sheet Update, 2013.
- [24] T. C. Holgate, R. Bennett, T. Hammel, T. Caillat, S. Keyser and B. Sievers, "Increasing the efficiency of the multi-mission radioisotope thermoelectric generator", Journal of Electronic Materials, vol. 44, no. 6, pp. 1814–1823, 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3564-9.
- [25] R. Bechtel, "MMRTG Thermoelectric Couple", Department of Energy, 2013.
- [26] H. Jing, Q. Xiang, R. Ze, X. Chen, J. Li, J. Liao and S. Bai, "A skutterudite thermoelectric module with high aspect ratio applied to milliwatt radioisotope thermoelectric generator", Applied Energy, vol. 350, p. 121776, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121776.
- [27] Z. Yuan, X. Tang, Z. Xu, J. Li, W. Chen, K. Liu, Y. Liu and Z. Zhang., "Screen-printed radial structure micro radioisotope thermoelectric generator", Applied Energy, vol. 225, pp. 746–754, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.073.
- [28] C. S. R. Matthes, D. F. Woerner, T.J. Hendricks, J.-P. Fleurial, K. I. Oxnevad and C. D. Barklay, "Next-generation radioisotope thermoelectric generator study", U.S. Government Work, 2024, doi: 10.1109/10.1000.
- [29] D. Palaporn, S. Tanusilp, Y. Sun, S. Pinitsoontorn, and K. Kurosaki, "Thermoelectric materials for space explorations", Materials Advances, vol. 5, pp. 5351–5364, 2024.
- [30] Y. Liu, Y. Zhang, Q. Xiang, F. Hao, Q. An and H. Chen, "Comprehensive modeling and parametric analysis of Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator", Applied Thermal Engineering, vol. 219, p. 119447, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119447.
- [31] Y. Liu, Y. Zhang, and X. Pei, "Performance analysis and optimization of the Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG)", Applied Thermal Engineering, vol. 219, p. 119447, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119447.
- [32] B. Johnson, "Power sources for space exploration", Stanford University, 2024. [Online]. Available: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/johnson1/>.
- [33] S. Keranda, M. del M. P. G. Selakau, and N. P. Lindahitch, "A micro-nuclear power generator for space missions", Energies, vol. 16, 2023, doi: 10.3390/en16114422.
- [34] S. Kesharwani, C. Kinney, and S. Vasu, "Numerical modelling of solid state combustion in novel pyrolants used as heat and energy sources for space missions", presented at the AIAA SciTech Forum, 2023, doi: 10.2514/6.2023-3917.