



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETAVOLTİK NÜKLEER PİLLERDE
RADYOAKTİF KAYNAKLAR

Yekta AKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Temmuz-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETA VOLTİK NÜKLEER PİLLERDE
RADYOAKTİF KAYNAKLAR

Yekta AKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Sultan ŞAHİN BAL

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Salih ÖZER

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR

Temmuz-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Yekta AKAR tarafından hazırlanan “Betavoltik Nükleer Pillerde Radyoaktif Kaynaklar” adlı tez çalışması 19.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Salih ÖZER
Muş Alparslan Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR
Muş Alparslan Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü

Üye

Prof. Dr. Sultan ŞAHİN BAL
Bitlis Eren Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu/...../..... Tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Selçuk SAĞIR
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited.

İmza

Yekta AKAR

Tarih: 01/07/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETAVOLTİK NÜKLEER PİLLERDE RADYOAKTİF KAYNAKLAR

Yekta AKAR

Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR

Betavoltaik teknolojisi, uzun süreler boyunca elektrik enerjisi üretmek için beta radyasyonu ihtiva eden radyoizotopların bozunma enerjisinden yararlanan doğrudan bir enerji dönüşümü yaklaşımını temsil eder. Bu tür nükleer piller, özellikle uzak veya erişilemeyen ortamlarda, minimum bakımla uzun çalışma ömrü gerektiren uygulamalar için avantajlar sunar. Bu tez, betavoltaik pillerin en önemli kısmı olan radyoaktif kaynaklara odaklanan bilimsel araştırmaların kapsamlı bir incelemesini ve analizini sunmaktadır. Trityum (^3H), Nikel-63 (^{63}Ni), Prometyum-147 (^{147}Pm), Karbon-14 (^{14}C) ve Stronsiyum-90/İtriyum-90 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) dahil olmak üzere önemli radyoizotoplar, yarı ömür, beta emisyon enerjisi, spesifik aktivite, güç yoğunluğu, bozunum özellikleri, kullanılabilirlik, maliyet ve güvenlik hususları gibi kritik seçim kriterlerine göre incelenir. İzotop üretimi, kaynak üretimi ve kaynak karakterizasyonu için yöntemler incelenmiştir.

2025, 55 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Nükleer Piller, Betavoltaik, Beta Bozunumu, Enerji.

ABSTRACT

MS THESIS

RADIOACTIVE SOURCES IN BETAVOLTIC NUCLEAR BATTERIES

Yekta AKAR

**Muş Alparslan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Plant Nuclear Energy And Energy Systems**

Advisor: Assist. Prof. Hasan Ali AYGÖR

Betavoltaic technology represents a direct energy conversion approach that utilizes the decay energy of radioisotopes containing beta radiation to generate electrical energy over long periods of time. Such nuclear batteries offer advantages for applications requiring long operating life with minimal maintenance, particularly in remote or inaccessible environments. This thesis provides a comprehensive review and analysis of scientific research focusing on radioactive sources, which are the most important component of betavoltaic batteries. Important radioisotopes such as Strontium-90/Therium-90 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$), Promethium-147 (^{147}Pm), Carbon-14 (^{14}C), Nickel-63 (^{63}Ni), Tritium (^3H) are examined based on critical selection criteria such as half-life, beta emission energy, specific activity, power density, decay characteristics, availability, cost, and safety considerations. Methods for isotope production, source production, and source characterization are examined.

2025, 55 Pages

Keywords: Nuclear Battery, Betavoltaic, Beta Decay, Energy.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasındaki önemli katkılarından dolayı danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR hocama teşekkürlerimi sunarım. Danışman hocam tez çalışması süresince ihtiyacım olan bilimsel desteği esirgememiş; çalışmamın her aşamasında çok kıymetli yardımlarıyla öğretici ve yönlendirici olmuştur. Ayrıca, tez hazırlama sürecinde benden manevi desteklerini esirgemeyen eşime, teşekkür ederim. Bu tez çalışmasında yapay zeka uygulamalarından da destek alınmıştır.

Yekta AKAR
MUŞ-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	1
1.1 Kaynak Araştırması.....	5
1.2 Betavoltaik Kaynaklar için Radyoaktif Bozunma Prensipleri	9
1.2.1 Beta bozunma mekanizmaları ve enerji spektrumları.....	9
1.2.2 Beta bozunumuna eşlik eden gama yayınımları.....	10
1.3 Beta Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi.....	11
1.3.1 Çarpışmalı enerji kaybı (iyonizasyon ve uyarılma)	11
1.3.2 Radyasyonel enerji kaybı (Bremsstrahlung)	11
1.3.3 Yarıiletken malzemelerde enerji birikimi	12
1.4 Gama Işınlarnın Madde ile Etkileşimi	13
1.4.1 Fotoelektrik etki	13
1.4.2 Compton saçılması	14
1.4.3 Çift oluşum.....	14
1.4.4 Yarıiletken malzemelerde gama ışınlarından kaynaklanan enerji depolama	15
1.5 İkinci/Üçüncü Derece Dikkate Alınacak Hususlar	16
1.6 Betavoltaik Pil Teknolojisi Temel İlkeleri.....	17
1.7 Radyoaktif Kaynak Seçimi Temel İlkeleri.....	18
1.7.1 Yarı ömür ($T_{1/2}$)	18
1.7.2 Ortalama (E_{avg}) ve maksimum (E_{max}) beta bozunum enerjisi	19
1.7.3 Spesifik aktivite (SA)	19
1.7.4 Güç yoğunluğu	20
1.7.5 Radyoaktif bozunum türü ve saflık	20
1.7.6 Radyoaktif bozunum ürünleri (kız ürünler)	21

1.7.7	Bulunabilirlik ve maliyet.....	21
1.7.8	Güvenlik ve koruma.....	22
1.8	Radyoaktif Kaynak Üretim Metodları	23
1.8.1	Fisyon ürünü ayrıştırma	23
1.8.2	Nötron aktivasyonu	23
1.8.2.1	Nikel-63 (^{63}Ni)	24
1.8.2.2	Trityum (^3H).....	24
1.8.2.3	Prometyum-147 (^{147}Pm).....	24
1.8.2.4	Karbon-14 (^{14}C)	25
1.8.2.5	Strontium-90 (^{90}Sr).....	25
1.8.2.6	Krypton-85 (^{85}Kr).....	25
2.	MATERYAL ve YÖNTEM	26
2.1	Radyoaktif Bozunma için Temel Denklemler.....	26
2.1.1	Aktivite.....	26
2.1.2	Bozunma sabiti (λ) ve yarı ömür ($T_{1/2}$)	26
2.1.3	Atom sayısı (N) ve molar kütle (M) ilişkisi	27
2.2	Beta Emisyonlarından Güç Hesaplaması (P_β).....	27
2.3	Gama Emisyonlarından Güç Hesaplaması (P_γ).....	27
2.4	Kullanılan Güç Boyutları	28
2.4.1	Curie başına güç (W/Ci) (Beta ve Gama)	28
2.4.2	Birim kütle başına güç (Özgül güç) (W/g) (Beta ve gama)	28
2.4.3	Güç Yoğunluğu (W/cm ³) (Beta ve gama)	28
2.5	Seçilmiş Radyoizotopların Güç Analizi.....	28
2.5.1	Trityum (^3H).....	29
2.5.1	Krypton-85 (^{85}Kr)	30
3.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	32
3.1	Hesaplama Sonuçları.....	32
3.1.1	Trityum (^3H).....	34
3.1.2	Krypton-85 (^{85}Kr)	35
3.1.3	Nikel-63 (^{63}Ni)	35
3.1.4	Prometyum-147 (^{147}Pm).....	35
3.1.5	Stronsiyum-90 + Yitrium-90 ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$)	36

3.1.6 Karbon-14 (^{14}C)	36
3.1.7 Fosfor-32 (^{32}P)	37
3.1.8 Fosfor-33 (^{33}P)	37
3.1.9 Teknesyum-99 (^{99}Tc)	37
3.1.10 Evropiyum-155 (^{155}Eu).....	37
3.1.11 Sezyum-137 (^{137}Cs) ve Baryum-137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$)	38
3.1.12 İridyum-194 (^{194}Ir).....	38
3.1.13 Tellür-121 (^{121}Te)	38
3.2 Tartışma.....	38
3.2.1 Gama radyasyonunun toplam güç çıkışına etkisi.....	40
3.2.2 Uygulama alanlarına göre optimal izotop seçimi.....	42
3.2.2.1 Saf beta kullanımı	42
3.2.2.2 Beta ve gama birlikte kullanımı	42
3.2.2.3 Kriterlerin uyumunda dikkate alınması gerekenler.....	43
4. SONUÇ ve ÖNERİLER	45
4.1 Önemli sonuçların özeti	45
4.2 Betavoltaik pil tasarımı ve izotop seçimi için öneriler.....	45
4.3 Geleceğe Yönelik Beklentiler	46
4.3.1 Yeni kaynak materyaller ve formlar	46
4.3.2 Sürdürülebilir izotop tedariği	46
4.3.3 Gelişmiş imalat ve entegrasyon	47
4.3.4 Gelişmiş yarı iletkenler	47
4.3.5 Geliştirilmiş modelleme ve karakterizasyon.....	47
4.3.6 Uygulamalardaki engellerin organizasyonu.....	47
KAYNAKLAR	48
EKLER	52
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

ev	: Elektronvolt
keV	: Kilo-elektron volt
MeV	: Mega-elektron volt
μm	: Mikrometre/mikron
nm	: Nanometre
mm	: Milimetre
E_{max}	: Maksimum enerji
E_{ort}	: Ortalama enerji
E_{spek}	: Spektrum enerji
e	: Elektron
β	: Beta parçacığı
γ	: Gama ışını
α	: Alfa Parçacığı
τ	: Radyoaktif ömür
$T_{1/2}$: Radyoaktif yarı Ömür
η	: Verimlilik
μA	: Microamper
nA	: Nanoamper
ϵ_0	: Dielektric sabiti
k	: Boltzmann sabiti
ν_e	: Nötrino ve Antineutrino

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Betavoltaik Uygulamalar İçin Seçilmiş Beta Yayılımlı Radyoizotopların Hesaplanan Güç Değerleri.....	33
Çizelge 3.2 Güç Hesaplamalarında Kullanılan İzotopların Verileri.....	34
Çizelge 3.3 Beta radyasyonuna ek olarak gama radyasyonunun kullanılmasından kaynaklanan potansiyel güç kazancı.....	42



1. GİRİŞ ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Modern teknolojik gelişmeler, giderek artan uygulama yelpazesi için yoğun, güvenilir ve dayanıklı güç kaynakları gerektirmektedir. Teknolojik yeniliklerin süratle artışı, modern yaşamın neredeyse her alanına nüfuz eden cihazlarla ve uygulamalarla hızlı ve yaygın bir bağlantı ve minyatürleştirme dönemini başlatmıştır. Teknolojinin bu yaygın kullanımı, hem kompakt ve güvenilir ve aynı zamanda neredeyse sınırsız uzun ömürlü güç kaynaklarına yönelik ihtiyacı ortaya çıkardı. Bu ihtiyaç, tüketici elektroniği alanının çok ötesinde kritik altyapı, çevresel izleme ve hatta derin uzayın keşfine kadar uzanmaktadır. Geleneksel kimyasal piller son 50 seneye kadar bu ihtiyacı karşılamada kısmen yeterli olmuş olsa da, bu yeni uygulamaların artan ihtiyaçları karşısında yetersiz kaldıkları giderek daha belirgin hale gelmektedir.

Günlük hayatta neredeyse her nesnenin otomasyon uygulamaları süreci yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamalar, sayısız sensör içeren akıllı evleri, giyilebilir sağlık monitörlerini ve hassas tarım veya afet tahmini için geniş çevresel sensör ağlarını da içermektedir. Bu cihazların her birinin bir güç kaynağına ihtiyacı vardır ve pillerini sık sık değiştirmek mümkün değildir.

Endüstriler giderek Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) uygulamalarıyla daha otomatikleşiyor ve optimizasyon süreci, bakım ve güvenlik izleme için sensörlere dayanıyor. Bu sensörler genellikle geleneksel pillerin zorlandığı ve değiştirme için erişimin zor olduğu aşırı sıcaklıklar, titreşimler, aşındırıcı kimyasallar gibi zorlu ortamlarda çalışır. IIoT'nin tam potansiyeline ulaşması için uzun ömürlü, sağlam güç kaynakları çok önemlidir.

Drone'lar, otonom araçlar ve robotlar giderek yaygınlaşıyor. Bu sistemler, genellikle uzak veya zorlu ortamlarda navigasyon, algılama ve çalıştırma için uzun ömürlü ve güvenilir güce ihtiyaç duyar. Uzun ömürlü güç kaynakları, operasyonel menzillerini genişletmek ve görev başarısını sağlamak için çok önemlidir.

Kalp pilleri, nörostimülatörler ve ilaç verme sistemleri gibi implante edilebilir tıbbi cihazlar ile sağlık hizmetleri dönüşüm içindedir. Ancak, bu cihazlar belli bir süre sonunda değiştirilmesi gereken pillerden enerji alır. Uzun ömürlü güç kaynakları, sağlık hizmetlerini önemli ölçüde iyileştirebilir ve maliyetlerini azaltabilir.

Geleneksel kimyasal piller, her yerde bulunmalarına rağmen, uzun vadeli uygulamalarda çeşitli faktörler tarafından kısıtlanmaktadır. Bu sınırlamalar şunları içerir:

Kimyasal piller sınırlı sayıda şarj-deşarj döngüsüne sahiptir ve kapasiteleri zaman içinde azalır ve sonunda değiştirilmeleri gerekir. Bu durum, uzak sensörler, implante edilebilir tıbbi cihazlar veya uzay araştırmaları gibi bakım veya değiştirme için erişimin zor veya imkansız olduğu uygulamalar için önemli bir zorluk teşkil etmektedir.

Pil performansı genellikle aşırı sıcaklıklardan, nemden ve diğer çevresel faktörlerden olumsuz etkilenir. Bu durum, endüstriyel ortamlarda, derin deniz araştırmalarında veya atmosfer ve uzay çalışmaları gibi zorlu ortamlardaki etkinliklerini sınırlamaktadır.

Kimyasal piller, özellikle zorlu koşullarda veya yanlış kullanıldığında sızıntı, yangın veya patlama potansiyeli nedeniyle güvenlik tehlikeleri oluşturabilir. Bu, tıbbi implantlar veya giyilebilir cihazlar gibi insan sağlığını ilgilendiren uygulamalar için özellikle önemlidir.

Kimyasal pillerin üretimi ve imhası, tehlikeli maddelerin kullanımı ve elektronik atık oluşumu nedeniyle önemli çevresel sonuçlara yol açabilir. Bu durum, daha sürdürülebilir ve çevre dostu güç çözümlerine doğru bir geçişi zorunlu kılmaktadır.

Bu sınırlamaları azaltmak ve modern teknolojinin artan taleplerini karşılamak için çeşitli gelişmiş güç çözümleri üzerindeki çalışmaların başlıcaları şunlardır:

Güneş radyasyonu, titreşimler veya termal kaynaklardan ortam enerjisini elektrik gücüne dönüştürme yolları mevcuttur ve geliştirme ve yaygınlaştırma çalışmaları devam etmektedir.

Katı Hal Bataryaları sıvı yerine katı elektrolitler kullanır ve geleneksel bataryalara kıyasla daha iyi güvenlik, daha yüksek enerji yoğunluğu ve potansiyel olarak daha uzun kullanım ömrü sunar.

Yakıt hücreleri, hidrojen-oksijen kimyasal reaksiyonu ile elektrik üretirler. Yüksek verimlilik ve temiz enerji kaynağıdır.

Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörleri (RTG'ler) elektrik üretmek için radyoaktif izotopların bozunmasıyla ortaya çıkan enerjiyi kullanarak uzay görevleri ve diğer uzak uygulamalar için güvenli ve uzun süreli güç temini imkanı sağlar.

Betavoltaik Piller radyoaktif kaynaklardan yayılan beta parçacıklarının kinetik enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek ultra uzun ömür ve yüksek enerji yoğunluğu potansiyeli sunar.

Bu gelişmiş güç çözümleri arasında betavoltaik piller, olağanüstü uzun ömür, kararlılık ve güvenlik gerektiren uygulamalar için özellikle umut verici bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Betavoltaik piller, belirli radyoaktif izotopların uzun yarı ömürleri sayesinde on yıllarca değiştirmeye gerek kalmadan çalışabilir.

Betavoltaik pillerin yüksek enerji yoğunluğu, minyatürleştirilmiş cihazlar ve alanın sınırlı olduğu uygulamalar için uygun olan kompakt ve hafif güç kaynaklarının oluşturulmasını sağlar.

Kimyasal pillerin aksine, betavoltaik piller sıcaklık ve basınç değişikliklerinden ve diğer çevresel faktörlerden daha az etkilenir.

Betavoltaik piller, üretim süreçlerinde yoğun ve çeşitli kaynaklara dayanmadıkları ve daha az tehlikeli atık ürettikleri için geleneksel pillere göre daha çevre dostu olma potansiyeline sahiptir.

Betavoltaik pillerin önemli potansiyeline rağmen, kullanımının yaygınlaşmasına engel olan bazı zorluklar da vardır:

Uzun süreli beta maruziyeti yarı iletkenlerde kristal kusurları meydana gelmekte ve cihazın kullanım ömrü boyunca verimliliği %10-20 oranında azaltmaktadır.

Betavoltaik pillerin şu anki maliyeti, geleneksel kimyasal pillere göre daha yüksektir. Araştırma çalışmaları, yenilikçi üretim teknikleri ve daha kolay bulunabilen yeni izotopların kullanımıyla üretim maliyetlerini düşürmeye odaklanmıştır.

Betavoltaik piller tarafından yayılan radyasyon nispeten düşük ve korumalı olmasına rağmen, uzun vadede muhtemel sağlık etkileriyle ilgili endişeler devam etmektedir. Devam eden araştırmalar, radyasyon seviyelerini en aza indirmeyi ve güvenliği sağlamak için güçlü koruma mekanizmaları geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Betavoltaik pillerde radyoaktif malzemelerin kullanımı; geliştirmeyi ve dağıtımı engelleyebilen katı kurallara tabidir. Onay sürecini kolaylaştırmak ve sorumlu kullanımı sağlamak için araştırmacılar ile endüstri ve düzenleyici kurumlar arasında işbirliği çok önemlidir.

Bu zorlukların üstesinden gelinmesi, betavoltaik pillerin yaygın olarak benimsenmesinin yolunu açacak ve gelişmiş teknolojik uygulamalar için on yıllarca

hatta yüzyıllarca ömürlü, cihazların tek bir şarjla çalıştığı güç temininde yeni bir çağı başlatacaktır.

Radyoaktif izotopların enerji üretiminde kullanılması 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Betavoltaik piller ilk olarak 1950'li ve 60'lı yıllarda, özellikle askeri ve havacılık sektörleri tarafından araştırılmıştır. Bu bölümde, özellikle son yirmi yıldakiler olmak üzere son 50 yıldaki önemli çalışmalar özetlenmiştir.

Betavoltaiklerin temel ilkeleri 20. yüzyılın ortalarında, Linder ve Rappaport'un 1956'da silikon p-n bağlantıları ve Nikel-63 (^{63}Ni) kullanarak beta-parçacık enerji dönüşümünü göstermesiyle oluşturulmuştur (Linder ve ark., 1956). İlk araştırmalar Promethium-147 (^{147}Pm) ve strontium-90 (^{90}Sr) gibi yüksek enerjili izotoplara öncelik verdi, ancak güvenlik endişeleri ve düzenleyici kısıtlamalar odağı Trityum (^3H) ve ^{63}Ni gibi düşük enerjili, biyouyumlu izotoplara kaydırıldı. 1990'lara gelindiğinde Trityum, düşük toksisitesi (5,7 keV beta enerjisi) ve ticari kullanılabilirliği nedeniyle tıbbi implantlar için tercih edilen izotop olarak ortaya çıkarken ^{63}Ni , yüzyıllık yarı ömrü sayesinde havacılık ve uzay uygulamalarında ilgi görmeye başlamıştır.

21. yüzyıl, yarı iletken malzemeler ve cihaz mimarilerinde devrim niteliğinde gelişmelere sahne olmuştur. Radyasyon kaynaklı kafes hasarı ve düşük verimlilik (<%1) ile sınırlı olan geleneksel silikon bazlı sistemlerin yerini silikon karbür (SiC) ve sentetik elmas gibi geniş bant aralıklı malzemeler almıştır. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile büyütülen SiC, 3,2 eV bant aralığı ve olağanüstü radyasyon toleransı ile ^{63}Ni ile eşleştirildiğinde %6-8 verimlilik sağladı. 2015 yılından sonra elmas yarı iletkenler, aşırı radyasyon dozları (10^{16} parçacık/cm²) altında %3,5 verimlilik ve sıfıra yakın performans düşüşü elde ederek uzay görevleri için ideal hale gelmiştir. Aynı zamanda, gözenekli silikon ve grafen entegrasyonu gibi nano-yapılandırma teknikleri beta-parçacık emilimini artırarak ^{63}Ni -tabanlı sistemler için güç yoğunluklarını 10-15 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 'e çıkarmıştır.

Trityumla çalışan kalp pillerinin 2019 FDA onayı, hayati önem taşıyan uygulamalar için BNB'leri doğrulayan bir dönüm noktası oldu. Bu cihazlar 0,1-0,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ güç sağlayarak değiştirilmeden on yıl boyunca çalışmak için yeterlidir.

NASA'nın simüle edilmiş Mars koşulları altında test edilen ^{63}Ni -SiC prototipleri, 15 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ çıkış ve -180°C sıcaklıklara dayanıklılık göstererek BNB'leri Europa Clipper görevi (2025) için temel güç kaynakları olarak konumlandırdı.

Mikro ölçekli ^{63}Ni -GaN piller artık Kuzey Kutbu boru hatlarındaki ve açık deniz rüzgar çiftliklerindeki kablosuz sensörlere güç sağlayarak sık bakım ihtiyacını ortadan kaldırıyor.

Önümüzdeki yıllarda araştırmaların odaklanacağı konular başlıca şunlardır:

Verimliliği %15 üzerine çıkarması beklenen Betavoltaik nükleer piller'in fotovoltaik veya termoelektrik ile entegre edilmesiyle hibrit enerji üretim sistemleri üzerine çalışılmaktadır.

Nükleer atıkların (örneğin grafit reaktörlerden elde edilen Karbon-14) beta kaynağı olarak yeniden kullanılması çalışmaları mevcuttur.

Maliyetleri %30-40 oranında azaltacak olan 3D baskılı radyoizotop katmanları üretimi.

1.1 Kaynak Araştırması

Atom çekirdeklerinde görülen radyoaktif bozunum mekanizmaları çalışmalarının başlangıcıyla beraber (Moseley, 1913) nükleer batarya kavramı, özellikle 1950'lerden beri araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

(Ehrenberg ve ark., 1951) elektron ışınları tarafından bombardıman edilen selenyum hücrelerindeki akım değişimini araştırdıkları çalışmalarında; ilk defa "Elektron-voltaik" etki olarak adlandırdıkları olaydan bahsetmişlerdir.

(Rappaport, 1954) çalışmasıyla betavoltaik etkiyi ilk defa gözlenmiş ve ifade edilmiştir. Rappaport, 50 mCi aktiviteye sahip $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β parçacık kaynağı ile birleştirilmiş alaşımlı bir yarı iletken p-n eklemine incelemiştir. Bu hücrelerin her birinden yaklaşık %0,2 ortalama verimlilikle 0,8 μW güç elde edilmiştir. ^{90}Sr , yaklaşık 29 yıl yarı ömürlü beta emisyonu yoluyla ^{90}Y 'ye bozunur ve bu da daha sonra beta emisyonu yoluyla (maksimum enerji $E_{\text{max}} \approx 2,28$ MeV, yarı ömür ~ 64 saat) kararlı Zirkonyum-90'a (^{90}Zr) bozunur. Rappaport'un ilk cihazı doğrudan dönüşüm prensibini ortaya koymuştur fakat son derece düşük dönüşüm verimliliği ve hızlı performans düşüşü mevcuttu. Bu bozulmanın, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağından yayılan yüksek enerjili beta parçacıklarının yarı iletken kristal kafese verdiği radyasyon hasarından kaynaklandığı kısa sürede tespit edildi. $E_{\text{max}} \sim 2$ MeV'e kadar enerjili betalar, yarı iletken kristal yapı içindeki atomları yerinden koparmak için yeterli enerjiye sahipti ve taşıyıcı yüklerin hareketini bozan ve cihaz çıkışını saatler süren bir zaman ölçeğinde azaltan istenmeyen sonuçlar meydana getirdi. Bu ilk deneyim, radyasyon hasarını betavoltaik tasarımda

temel bir zorluk olarak ilk defa ortaya koymuştur. Yarı iletkenin hasar eşiğinin altında enerjilere sahip beta kaynaklarının seçilmesi gerekliliği, izotop seçimi çalışmalarını etkileyen birincil bir husus haline geldi. Beta parçacıklarının yarı iletkenlerle etkileşimine ilişkin ilk araştırmalar da bu dönemde gerçekleştirilmiştir.

Linder ve Rappaport'un 1956'da silikon p-n bağlantıları ve Nikel-63 (^{63}Ni) kullanarak ilk defa beta-parçacık enerji dönüşümünü göstermişlerdir (Linder ve ark., 1956). Deneylerinde %0,1 verim elde ederek beta parçacıklarının (elektronlar) yarı iletkenleri iyonize ederek elektrik üretebileceğini kanıtladılar. Bunun için Silikon diyotları 17 keV beta enerjili ^{63}Ni ile kapladılar ve radyasyon altında akım-voltaj özelliklerini ölçtüler. Silikonun dar bant aralığı (1,1 eV) ve rekombinasyon kayıpları nedeniyle düşük verimlilik elde edilmiştir.

1956 yılında yarıiletken kullanılarak Nükleer pil patenti alınmıştır (Rappaport, 1956). Betavoltaik pillerin teorisi bu dönemde formüle edilmiş; kaynak ve yarı iletken özelliklerinin Betavoltaik pillerin özellikleri üzerindeki etkisi not edilmiştir.

1960'lı 1970'li yıllarda, özellikle de Donald W. Douglas Laboratuvarlarında (DWDL) Dr. Larry Olsen'in önderlik ettiği çalışma sayesinde önemli ilerlemeler olmuştur (Olsen ve ark., 1969; Olsen, 1973). Bu çalışma, özellikle kalp pilleri olmak üzere tıbbi uygulamalar için pratik, biyoyumlu bir betavoltaik güç kaynağı geliştirmeye odaklandı. DWDL ekibi beta kaynağı olarak Promethium-147'yi (^{147}Pm) seçti. ^{147}Pm , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ile karşılaştırıldığında 2,62 yıl gibi daha kısa yarı ömre ve önemli ölçüde daha düşük maksimum beta enerjisine ($E_{\text{max}} \approx 225 \text{ keV}$) sahip bir beta yayıcıdır (Hinderer, 2010). Bu düşük enerji, silikon için tipik hasar eşiğinin altındaydı ve daha önce gözlemlenen hızlı bozulmayı hafifletiyordu. DWDL ekibi, ^{147}Pm kaynaklarını özel tasarlanmış silikon bağlantı hücreleriyle birleştiren "Betacel" pilini geliştirdi. Tasarım tipik olarak istenen voltajı ve güç çıkışını elde etmek için birden fazla kaynak/hücre ünitesinin seri halinde istiflenmesini içeriyordu. Bu piller, beta akısına bağlı olarak, yaklaşık %2-4'lük genel dönüşüm verimliliğine ve yüzlerce mikrowatt aralığında güç çıkışlarına (örneğin, Model 400, 400 μW üretti) ulaştı. Betacel, 1970'lerdeki klinik deneyler sırasında 100'den fazla kalp pili hastasına başarıyla implante edildi ve betavoltaik teknolojinin uygulanabilirliğini gösterdi.

Ancak Betacel, yaygın olarak benimsenmesini engelleyen kritik zorluklarla karşı karşıya kaldı. Bunlardan en önemlisi, ^{147}Pm kaynak malzemesinde kirlenici izotop Promethium-146'nın (^{146}Pm) bulunmasıydı. ^{146}Pm , ^{147}Pm 'deki düşük enerjili betalardan

çok daha nüfuz edici olan ve önemli ölçüde koruma gerektiren gama radyasyonu yayar. Bu koruma gereksinimi, Betacel'in boyutunu, ağırlığını ve karmaşıklığını önemli ölçüde artırdı. Bu kalkanlama gereksinimi Betacel bataryasının boyutunu, ağırlığını ve karmaşıklığını önemli ölçüde artırarak avantajlarını azaltmıştır. Radyoizotop kaynağının üretimi ve kullanımıyla ilgili nispeten yüksek maliyet ile beraber daha ucuz, daha basit lityum bazlı kimyasal pillerin eşzamanlı gelişimi nedeniyle, Betacel sonunda aşamalı olarak kullanımdan kaldırıldı. Betacel deneyimi, kaynak seçiminde birincil izotopun özelliklerinden başka; izotopik saflık ve herhangi bir kirleticinin doğası gibi güvenliği, koruma gereksinimlerini ve genel sistem pratikliğini etkileyen önemli kriterler içerdiğinin gösterdi.

¹⁴⁷Pm ile karşılaşılan zorlukların ardından, araştırma ve ticari çabalar, başta Trityum (³H) ve Nikel-63 (⁶³Ni) olmak üzere güvenli ve potansiyel olarak daha uzun çalışma ömrü sunan izotoplara doğru kaydırıldı. Hidrojenin radyoaktif bir izotopu olan Trityum(³H), çeşitli avantajlı özellikleri nedeniyle önem kazandı. Maksimum enerjisi ve ortalama enerjisi çok düşük ($E_{\max} \approx 18,6$ keV, $E_{\text{ort}} \approx 5,7$ keV) olan saf bir beta yayıcıdır. Bu düşük enerjiler, yaygın kullanımı olan yarı iletkenlerin kristal örgülerinin hasar eşik değerlerinin çok altındadır ve minimum seviyede koruma gerektirir; beta parçacıkları, milimetre mertebesinde hava veya çok ince katı malzemeler, hatta insan derisinin dış tabakası tarafından bile durdurulabilir. Bu nedenle günlük hayattaki tüketici ürünlerindeki yerleşik kullanımına yönelik, onu çekici bir aday haline getirdi. Trityumun yarı ömrü 12,32 yıldır ve onlarca yıllık operasyonel potansiyel sunar.

Betavoltaik pil araştırmaları 2000'li yıllarda hızla ilerlemiştir. Qynergy, City Labs ve Widetronix gibi üreticilerden betavoltaik piller üzerine geliştirilme çalışmaları olmuştur (Sun ve ark., 2005; Olsen ve ark., 2012).

City Labs, Inc., trityum üzerine odaklanarak betavoltaik teknolojinin yeniden canlandırılmasına öncülük etti ve NanoTritium™ pil serisini geliştirdi. Betacel'in öncüsü Dr. Larry Olsen daha sonra City Labs'a katıldı. City Labs, betavoltaik bir cihazın üretimi ve dağıtımını için ilk ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) genel lisansını alarak, son kullanıcının benimsemesini kolaylaştırarak önemli bir kilometre taşına ulaştı (Olsen ve ark., 2012). Tipik olarak metal hidritlere (titanyum tritid gibi) yüklenmiş trityum içeren bu piller, nanowatt ile mikrowatt aralığında güç sağlar ve 15 yılı aşan çalışma ömrüne sahiptir (Cabauy ve ark., 2010).

Tritiyum gibi Nikel-63 (^{63}Ni), yarı iletken hasar eşiklerinin çok altında, düşük enerjili ($E_{\text{max}} \approx 67$ keV, $E_{\text{ort}} \approx 17,4$ keV) saf bir beta yayıcıdır. Yaklaşık 100 yıllık uzun yarılanma ömrü ve minimum düzeyde koruma gerektirmesi yüzyıl boyunca güç gerektiren uygulamalar için son derece uygun hale getirir (Kim ve ark., 2017; Bormashov ve ark., 2018). Widetronix gibi şirketler (Firefli™ pilleriyle) ve daha yakın zamanda Betavolt Teknolojisi (BV100 pilleriyle) ^{63}Ni tabanlı betavoltaik cihazlar geliştirdiklerini açıklamışlardır. Betavolt'un 2024'te duyurulan cihazı, elmas (diamond) yarı iletkenlerle katmanlı ^{63}Ni kullanıyor ve 50 yıllık bir kullanım ömrüne sahip olduğunu ileri sürmektedirler. ^{63}Ni kullanımında karşılaşılan en önemli maliyet unsuru, yüksek oranda zenginleştirilmiş ^{62}Ni hedeflerin ışınlanması gerektirmesidir. Bu ise trityuma kıyasla kullanılabilirliğini sınırlamaktadır (Adams ve Revankar, 2015).

Çalışmalarda yoğun olarak ^3H ve ^{63}Ni 'ye odaklanmayla, stratejik bir değişim yaşanmıştır. ^{147}Pm ile yapılan ilk çalışmalar daha çok yüksek güç yoğunluklarını hedeflemiş fakat safsızlıklar ve zırlama ile ilgili maliyetli ve pratik zorluklar nedeniyle yeni kaynaklar arayışını gündeme getirmiştir. Böylece ^3H ve ^{63}Ni tarafından sunulan düşük beta enerjisi sayesinde güvenlik ve uzun ömürlülük gerektiren fakat düşük güç gerektiren; örneğin uzak, erişilemez veya bakım veya değiştirmenin pratik olmadığı veya imkansız olduğu ortamlardaki cihazlara güç sağlamak uygulamaları öncelik kazandı.

Beta kaynağı olarak araştırmalara konu olan bir diğer izotop Karbon-14 (^{14}C) olmuştur (Akimchenko ve ark., 2017; Hwang ve ark., 2020; In, 2020). ^{14}C , yaklaşık 5.730 yıllık olağanüstü bir yarı ömür sunarak yüzyıllar, hatta bin yıl boyunca çalışabilecek güç kaynaklarına olanak sağlama potansiyeline sahiptir. Genellikle yarı iletken hasar eşik değerlerinin altında olan düşük enerjili beta parçacıkları ($E_{\text{max}} \approx 156$ keV) yayar. Ayrıca ^{14}C , nükleer reaktör uygulamalarının bilinen bir yan ürünüdür ve nükleer atık olarak bollukla bulunur. Bu sayede bu atık uzun süreli güç kaynakları için değerli ve ekonomik bir kaynağa dönüştürülebilir; hem de çevre koruma uygulamalarında önemli bir kazanç olabilecektir. Su-II In'in (In, 2020) DGIST'teki grubunun son araştırmaları, beta parçacık yakalamayı geliştirmek ve verimliliği artırmak için radyokarbon kaynağını hem anoda hem de katoda yerleştiren yeni bir tasarım ile prototip ^{14}C pillerini geliştirdi. Arkenlight gibi şirketler de ^{14}C bazlı elmas piller geliştirmişlerdir. ^{14}C 'nin en önemli dezavantajı, son derece uzun yarılanma ömrü nedeniyle çok düşük aktivite ve güç yoğunluğudur.

Daha yüksek güç yoğunlukları ve verimlilik elde edilmesi amacıyla radyoizotopun doğrudan yarı iletken enerji dönüştürücü malzemesinin içerisine dahil edildiği "içsel" radyoaktif kaynaklar kullanılmıştır. Bu uygulamaların amacı, beta parçacıklarının kaynak yüzeyinden kaçmasıyla veya kaynak katmanı içinde kendi kendine soğurulmasıyla ilişkili önemli verimlilik kayıplarına engel olmaktır. Beta parçacıklarının doğrudan dönüştürücü malzeme içinde üretilmesiyle, bozunma enerjisinin neredeyse %100'ü potansiyel olarak dönüştürücü malzeme içerisinde emilebilir ve elektron-delik çifti zenginleştirilebilir; böylece teorik olarak daha yüksek güç yoğunluklarına ve verimlilikleri elde edilebilir. Bu çalışmalara örnek olarak; trityumlanmış perovskitler'den olan trityumlanmış metilamonyum kurşun triiyodür (MAPbI₃ veya CT₃NT₃PbI₃) (Maier ve ark., 2025) ve ¹⁴C katkılı elmas (Li ve ark., 2023) dir. Bu malzemeleri yeterli izotop yüklemesiyle sentezleme, ışınlama altında malzeme kararlılığını koruma ve verimli yük toplama sağlama konusunda geliştirmeler devam etmektedir.

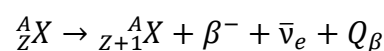
Son yıllarda, betavoltaik pillerin verimliliklerini ve çıkış güç yoğunluklarını artırmak için; kaynak malzemesi seçimi (⁶³Ni, ¹⁴⁷Pm, ³H vb.), uygun bir yarıiletkenin (C, GaN, SiC, ZnO vb.) ve dönüştürücü yapısının (p-n, p-i-n, Schottky) optimize edilmesine yönelik çalışmalara odaklanılmıştır (Revankar ve Adams, 2014; Krasnov ve Legotin, 2020).

1.2 Betavoltaik Kaynaklar için Radyoaktif Bozunma Prensipleri

Bir betavoltaik bataryadaki enerji kaynağı, nükleer bozunmaya uğrayarak enerjik parçacıklar yayan bir radyoizotoptur. Betavoltaikler için, ilgilenilen birincil bozunma türü beta bozunmasıdır.

1.2.1 Beta bozunma mekanizmaları ve enerji spektrumları

Beta-eksi (β^-) bozunumu betavoltaik uygulamalar için en uygun süreçtir. Bozunmada, kararsız bir çekirdek içindeki bir nötron bir protona, bir elektrona (beta parçacığı) ve bir elektron antinötrinosuna ($\bar{\nu}_e$) dönüşür. β^- bozunması için genel denklem şöyledir:



Burada A_ZX ana çekirdek, ${}^{A}_{Z+1}X$ kız (ürün) çekirdek, A kütle numarası ve Z atom numarasıdır. Q_β , parçalanma enerjisi olarak da bilinen bozunmada açığa çıkan toplam enerjiyi temsil eder.

Beta bozunmasının kritik bir özelliği, yayılan beta parçacıklarının sıfırdan başlayıp maksimum kinetik enerjiye, $E_{\beta,\max}$ kadar uzanan sürekli bir enerji spektrumuna sahip olmasıdır; bu da neredeyse Q_β 'ye eşittir (bu küçük fark, genellikle ihmal edilebilir olan kız çekirdeğin geri tepme enerjisidir). Algılanması ve etkileşime girmesi çok zor olan antinötrino, bozunma enerjisinin değişken bir kısmını taşır. Betavoltaik cihazlardaki güç hesaplamaları için ortalama beta enerjisi, \bar{E}_β , çok önemlidir. Bu ortalama enerji, yayılan beta parçacıklarının ortalama kinetik enerjisini temsil eder ve bozunma enerjisinin prensipte yarı iletken tarafından elektriğe dönüştürülebilen kısmıdır. Güç hesaplamalarında \bar{E}_β yerine Q_β kullanılması, pratik olarak kullanılabilir enerjinin önemli ölçüde fazla tahmin edilmesine yol açacaktır; çünkü beta parçacıklarının çoğunluğu $E_{\beta,\max}$ 'tan önemli ölçüde düşük enerjilerle yayılmaktadır.

1.2.2 Beta bozunumuna eşlik eden gama yayınımları

Beta bozunmasından sonra kız çekirdek uyarılmış bir nükleer durumda oluşursa, daha sonra bir veya daha fazla gama ışını (γ) yayarak daha düşük enerjili bir duruma veya temel durumuna geri dönecektir. Bu süreç genellikle çok hızlıdır. Beta parçacıklarının aksine, gama ışınları nükleer durumlar arasındaki enerji farklarına karşılık gelen ayrı enerjilerle yayılır.

Gama ışınlarının yayınlanmasının betavoltaik cihazlar için iki temel sonucu vardır:

Ek Enerji Kaynağı: Gama ışınları etkin bir şekilde emilebilir ve enerjileri cihaz veya yardımcı dönüştürücü içerisinde elektriğe dönüştürülebilirse, ek bir güç kaynağı teşkil ederler.

Kalkanlama Gereksinimi: Gama ışınları oldukça nüfuz edicidir. Güç için kullanılmadıklarında, varlıkları çevreyi ve hassas elektronik bileşenleri korumak için ek koruma gerektirir ve bu da betavoltaik pilin genel boyutunu, ağırlığını ve karmaşıklığını artırabilir (Schwarze ve Frasca, 1990). Tipik ince film betavoltaik tasarımlarda gama enerjisi dönüşüm etkinliği, gama ışınlarının daha düşük etkileşim kesiti nedeniyle beta enerjisi dönüşümünden genellikle çok daha düşüktür.

1.3 Beta Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi

Beta parçacıkları yarı iletken malzemeler gibi maddelerden geçerken, esas olarak iki mekanizma yoluyla enerji kaybederler: Çarpışmalı (esnek olmayan saçılma) ve radyasyonel süreçler.

1.3.1 Çarpışmalı enerji kaybı (iyonizasyon ve uyarılma)

Bu, özellikle birçok betavoltaik izotop için tipik olan enerjilerde beta parçacıkları için baskın enerji kaybı mekanizmasıdır. Yüklü olan beta parçacıkları, elektrostatik (Coulomb) kuvvetler aracılığıyla soğurucu malzemedeki atomların yörünge elektronlarıyla etkileşime girer. Bu etkileşimler şunlara yol açar:

İyonizasyon: Gelen beta parçacığı bir yörünge elektronuna yeterli enerjiyi aktararak onu atomundan fırlatır ve bir iyon çifti oluşturur. Yarı iletken malzemelerde bu süreç, betavoltaik dönüşümde kullanılan temel yük taşıyıcısı olan bir elektron-delik çiftinin (EHP) oluşmasıyla sonuçlanır. Bir EHP oluşturmak için gereken ortalama enerji, yarı iletken malzemenin bir özelliğidir ve genellikle W -değeri olarak gösterilir (örneğin, Silikon için yaklaşık 3,6 eV ve genellikle bant aralığı enerjisinin 2 ila 3 katı).

Uyarılma: Gelen beta parçacığı enerjiyi bir yörünge elektronuna aktarır ve onu atom içinde daha yüksek, boş bir enerji seviyesine yükseltir, ancak onu dışarı atmaz. Atom uyarılmış bir durumda bırakılır. Uyarılmadan sonra, bu enerji genellikle fotonlar (örneğin, lüminesans veya ısı) olarak serbest bırakılır. Uyarılma beta parçacığının enerji kaybına katkıda bulunurken, iyonlaşmanın yaptığı gibi akım üretimi için doğrudan serbest yük taşıyıcıları oluşturmaz.

Bu çarpışma süreçleri nedeniyle birim yol uzunluğu başına enerji kaybı oranı, özgül enerji kaybı ($-dE/dx$) veya durdurma gücü ile tanımlanır. Elektronlar için Bethe formülü bu niceliğin hesaplanması için teorik bir çerçeve sağlar. ρ malzeme yoğunluğu olmak üzere, kütle durdurma gücü ($-dE/(\rho dx)$), malzemenin fiziksel durumuna daha az bağımlı olduğu için sıklıkla kullanılır.

1.3.2 Radyasyonel enerji kaybı (Bremsstrahlung)

Bir beta parçacığı bir atom çekirdeğinin güçlü elektrik alanının yakınından geçtiğinde, keskin bir şekilde saptırılabilir ve yavaşlatılabilir. Bu hızlı yavaşlama, beta parçacığının X-ışınları şeklinde elektromanyetik radyasyon yaymasına neden olur, bu süreç Bremsstrahlung (frenlenme radyasyonu) olarak bilinir.

Bremsstrahlung'un temel özellikleri şunlardır:

Yayılan X-ışınları, sıfırdan gelen beta parçacığının maksimum kinetik enerjisine kadar değişen sürekli bir enerji spektrumuna sahiptir.

Bir beta parçacığı tarafından Bremsstrahlung yoluyla kaybedilen enerjinin çarpışma kayıplarına göre oranı, beta parçacığının kinetik enerjisi ve soğurucu malzemenin atom numarasının karesi (Z^2) ile artar. Radyasyonel enerji kaybının çarpışmalı enerji kaybına oranı için yaygın kullanılan bir yaklaşım $ZE_\beta/800$ dir, burada E_β MeV cinsindedir.

Betavoltaik uygulamalar için, yayılan X-ışınları yarı iletkenin aktif bölgesinden kaçarsa Bremsstrahlung bir kayıp mekanizması olabilir. Bununla birlikte, bu X-ışınları daha sonra cihaz veya çevreleyen bir dönüştürücü malzeme içinde emilirse, potansiyel olarak bir X-ışını voltaik etkisi yoluyla güç üretimine katkıda bulunabilirler. Bremsstrahlung üretimi de, özellikle yüksek enerjili beta yayıcılar ve yüksek Z malzemeleri söz konusu olduğunda, zırlama için önemli bir husustur.

1.3.3 Yarıiletken malzemelerde enerji birikimi

Bir betavoltaik cihazdaki birincil hedef, yarı iletken bir bağlantının aktif bölgesinde (örneğin, bir p-n diyotun eklem bölgesi) elektron deliği çiftlerinin (EHP'ler) üretilmesi yoluyla beta parçacık enerjisinin elektrik enerjisine verimli bir şekilde dönüştürülmesidir. Enerjik beta parçacıkları ve üretilen ikincil elektronlar, enerjilerini öncelikle iyonlaşma yoluyla kaybederek izleri boyunca bir dizi EHP oluşturur. Bu EHP'ler daha sonra eklem yerleşik elektrik alanı tarafından ayrılarak bir akım üretir.

Bu enerji birikiminin ve EHP üretiminin verimliliği çeşitli faktörlere bağlıdır:

Bir EHP oluşturmak için ortalama enerji (W-değeri): Düşük W-değerleri, biriktirilen enerji birimi başına daha fazla EHP anlamına gelir.

Beta parçacık enerji spektrumu: Beta parçacıklarının enerjisi, aralıklarını ve EHP oluşumunun mekana göre dağılımını etkiler.

Beta parçacıklarının aralığı: Yarı iletkenin aktif bölgesinin kalınlığı, beta parçacıklarının nüfuz derinliğine uyacak şekilde optimize edilmelidir. Bölge çok inceyse, birçok beta tüm enerjilerini biriktirmeden geçecektir. Çok kalınsa, bağlantı noktasından uzakta üretilen EHP'ler toplanmadan önce yeniden birleşebilir. Düşük enerjili betalar ince katmanlarda tamamen emilebilir, bu da kaynağın kendi kendine emilimini en aza indirmek ve ince, verimli yarı iletken dönüştürücüler kullanmak için

avantajlı olabilir. Yüksek enerjili betalar daha uzun aralıklara sahiptir, bu da potansiyel olarak ince dönüştürücülerde eksik enerji birikimine yol açar veya tek tip enerji birikiminin zorlaştığı daha kalın, daha karmaşık yarı iletken yapılar gerektirir.

Malzeme Özellikleri: Yarı iletkenin atom numarası (Z), beta parçacıklarının geri saçılmasını ve Bremsstrahlung üretimini etkiler ve bunların her ikisi de kayıp mekanizmaları olabilir.

Bu nedenle, beta kaynağı özelliklerinin, yarı iletken malzeme özelliklerinin (Z , W -değeri, bant aralığı) ve cihaz geometrisinin (aktif bölge kalınlığı) dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, betavoltaik dönüşüm verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir.

1.4 Gama Işınlınının Madde ile Etkileşimi

Yüksek enerjili fotonlar olan gama ışınları yüksüzdür ve betalar gibi yüklü parçacıklara kıyasla madde ile daha az etkileşime girer. Etkileşimleri, birim yol uzunluğu başına önemli ölçüde daha düşük bir olasılıkla karakterize edilir ve bu da iyi bilinen nüfuz etme güçlerine yol açar. Bir gama ışını etkileşime girdiğinde, enerjisinin tamamını veya bir kısmını malzeme içindeki elektronlara aktarır ve bunlar daha sonra iyonizasyon ve uyarma üretmeye devam eder. Nükleer bozunma ile ilgili enerji aralığındaki gama ışınları için üç temel etkileşim mekanizması, fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumdur.

1.4.1 Fotoelektrik etki

Fotoelektrik etkide, gelen bir gama ışını fotonu bir atom tarafından tamamen emilir ve enerjisi atomun bağlı elektronlarından birine (K-kabuğu veya L-kabuğu elektronu) aktarılır. Fotoelektron olarak adlandırılan bu elektron, gelen foton enerjisi (E_γ) ile elektronun kabuktaki bağlanma enerjisi (E_b) farkına eşit bir kinetik enerji ile atomdan fırlatılır: $K.E_{\text{fotoelektron}} = E_\gamma - E_b$. Fırlatılan elektronun bıraktığı boşluk daha sonra daha yüksek bir kabuktan bir elektron tarafından doldurulur ve karakteristik X-ışınlarının veya Auger elektronlarının emisyonuna yol açar (Schwarze ve Frasca, 1990).

Fotoelektrik etki en çok şu durumlarda baskındır:

Düşük gama ışını enerjilerinde: Tipik olarak birkaç yüz keV'nin altında. Silikon için, yaklaşık 50 keV'nin altında baskındır.

Yüksek atom numaralı (Z) malzemeler: Fotoelektrik emilim için tesir kesiti yaklaşık olarak Z^4 ila Z^5 arasında değişir ve artan foton enerjisi ile hızla azalır (yaklaşık $1/(E_\gamma)^3$ olarak).

Bir yarı iletken, enerjik fotoelektron enerjisini öncelikle iyonlaşma yoluyla kaybeder ve beta parçacığına benzer şekilde EHP'ler oluşturur (Schwarze ve Frasca, 1990).

1.4.2 Compton saçılması

Compton saçılması, gelen bir gama ışını fotonu ile serbest denilebilecek kadar gevşek bağlı bir atom elektronu arasındaki elastik olmayan bir saçılma etkileşmesidir. Bu süreçte foton enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır. Elektron geri tepme ve Compton elektronu olarak adlandırılır ve kendisi de düşük enerji ve yön değişikliği ile saçılır. Elektrona aktarılan enerji, saçılma açısına ve ilk foton enerjisine bağlıdır.

Compton saçılması, aşağıdakiler için baskın etkileşim mekanizmasıdır:

Orta düzey gama ışını enerjileri: Tipik olarak birkaç yüz keV'den birkaç MeV'e kadar. Silikonda, yaklaşık 50 keV ile 20 MeV arasında baskındır.

Tesir kesiti, birim hacim başına elektron sayısı (dolayısıyla yaklaşık olarak Z ile) orantılıdır ve genellikle artan foton enerjisi ile azalır.

Enerjik olan Compton geri tepme elektronu, yarı iletken EHP'ler oluşturur. Saçılan foton malzemeden kaçabilir veya daha fazla etkileşime girebilir (örneğin, başka bir Compton saçılması veya fotoelektrik soğurma).

1.4.3 Çift oluşum

Gelen bir gama ışını fotonunun enerjisi bir elektronun durgun kütle enerjisinin iki katını ($2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$) aşarsa, çift oluşumu gerçekleşebilir. Bu süreçte, bir atom çekirdeğinin (veya daha az yaygın olarak bir elektronun) yakınındaki güçlü elektromanyetik alanla etkileşime giren foton yok olur ve enerjisi bir elektron-pozitron çiftine (e^-, e^+) dönüşür. Elektron ve pozitron tarafından paylaşılan kinetik enerji değeri $(K.E.)_{e^-} + (K.E.)_{e^+} = E_\gamma - 1.022 \text{ MeV}$ 'dir.

Çift üretimi şu durumlarda önemli hale gelir:

Yüksek gama ışını enerjileri: 1.022 MeV eşiğinin üzerinde. Silikonda, 20 MeV'in üzerinde baskın olmaya başlar.

Tesir kesiti, eşiğin üzerindeki foton enerjisi ile artar ve soğurucu malzemenin Z^2 'si ile orantılıdır.

Çift üretiminde oluşan hem elektron hem de pozitron, yarı iletken EHP'ler oluşturarak enerjilerini kaybeder. Pozitron yavaşladıktan sonra malzeme içindeki bir elektronla yok olur ve tipik olarak iki adet 0,511 MeV'lik yok olma gama fotonu üretir. Bu yok olma fotonları daha sonra malzemeden kaçabilir veya daha fazla etkileşime girebilir.

1.4.4 Yarıiletken malzemelerde gama ışınlarından kaynaklanan enerji depolama

İlk etkileşim mekanizması ne olursa olsun (fotoelektrik, Compton veya çift üretimi), sonuç yarı iletken malzeme içinde enerjik elektronların (çift üretiminde ilaveten pozitronların) üretilmesidir. Bu birincil yüklü parçacıklar daha sonra kinetik enerjilerini ağırlıklı olarak iyonizasyon yoluyla kaybederek izleri boyunca bir dizi EHP oluşturur. Bu EHP'ler daha sonra bir elektrik akımı üretmek için toplanabilir.

Gama ışını enerjisini betavoltaik benzeri bir cihazda faydalı elektrik enerjisine dönüştürme verimliliği, çeşitli faktörler nedeniyle genellikle beta parçacıklarından çok daha düşüktür:

Daha düşük etkileşim olasılığı: Gama ışınları çok daha nüfuz edicidir, yani önemli bir kısmı etkileşime girmeden tipik bir ince yarı iletken aktif katmandan geçebilir.

Karmaşık enerji birikimi: Compton saçılması ve çift üretimi (ardından yok olma fotonları) dedektör hacmi içinde kısmi enerji birikimine neden olabilir ve bir miktar enerji saçılan veya yok olan fotonlar yoluyla kaçabilir.

Kompakt bir cihazda gama enerjisinden etkin bir şekilde faydalanmak, standart bir betavoltaik hücreye kıyasla önemli ölçüde farklı tasarım hususları gerektirecektir. Bu, çok daha kalın yarı iletken aktif bölgelerin kullanılmasını, etkileşim olasılığını artırmak için daha yüksek atom numaralarına sahip malzemelerin kullanılmasını veya potansiyel olarak hibrit sistemlerin geliştirilmesini içerebilir. Örneğin, gama ışınlarını ışığa dönüştürmek için bir sintilatör malzeme kullanılabilir, bu da daha sonra bir fotovoltaik hücre tarafından elektriğe dönüştürülür. Ancak, bu tür yaklaşımlar saf betavoltaiklerin doğrudan dönüşüm prensibinin ötesine geçmekte ve karmaşıklık katmaktadır. Betavoltaikler için düşünülen çoğu izotop için, ilişkili gama ışınlarının

yoğunluğu ve enerjisi genellikle yeterince düşüktür ve beta parçacık katkısına kıyasla güce katkıları ihmal edilebilir düzeydedir, bu da cihaz tasarımını öncelikle beta dönüşümüne odaklanacak şekilde basitleştirir.

1.5 İkinci/Üçüncü Derece Dikkate Alınacak Hususlar

Beta parçacıklarının enerjisi, yarı iletken malzemenin özellikleri (atom numarası Z ve bir elektron deliği çifti oluşturmak için gereken ortalama enerji W gibi) ve cihazın fiziksel kalınlığı arasındaki etkileşim, betavoltaik verimliliğin kritik bir belirleyicisidir. Düşük enerjili beta parçacıkları çok ince yarı iletken katmanlar içinde tamamen emilebilir. Bu, radyoizotop kaynak malzemesinin kendi içindeki emilim kayıplarını en aza indirdiği için avantajlı olabilir, ancak aynı zamanda bu enerjiyi etkili bir şekilde yakalamak için yüksek verimli, ultra ince yarı iletken dönüştürücüler gerektirir. Tersine, yüksek enerjili beta parçacıkları madde içinde daha uzun menzillere sahiptir. Yarı iletken dönüştürücü çok inceyse, bu parçacıklar tam enerjilerini bırakmadan geçebilir. Dönüştürücü bunları yakalamak için çok kalın yapılırsa, homojen olmayan enerji birikimi veya artan yük taşıyıcı rekombinasyonu (taşıyıcılar toplama bağlantısından çok uzakta üretilirse) gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Ayrıca W -değeri, emilen beta enerjisi birimi başına kaç yük taşıyıcısının üretilebileceğine dair temel sınırı belirler. Malzeme Z aynı zamanda Bremsstrahlung kayıplarını ve geri saçılma olaylarını da etkiler, bunların her ikisi de yarı iletkenine etkin bir şekilde bağlanan enerjiyi azaltabilir. Bu karmaşık etkileşim, herhangi bir radyoizotop-yarı iletken eşleşmesi için sistem düzeyinde bir optimizasyon gerektirir.

Hem beta parçacıkları hem de gama ışınları yayan radyoizotoplar için, beta parçacık emilimi için tasarlanmış ve optimize edilmiş (tipik olarak ince aktif katmanlara sahip) geleneksel bir betavoltaik cihaz, öncelikle beta emisyonlarından gelen enerjiyi kullanacaktır. Gama ışınlarının önemli ölçüde daha fazla nüfuz etme derinliği, çoğunun bu ince yarı iletken katmanları düşük bir etkileşim olasılığı ile geçeceği anlamına gelir. Sonuç olarak, yayılan gama enerjisinin önemli bir kısmını yakalamak için belirgin şekilde farklı bir tasarım gerekecektir. Bu, gama etkileşim çapraz kesitlerini artırmak için çok daha kalın dedektör hacimleri veya daha yüksek atom numarasına sahip malzemeler içerebilir. Bu tür gereksinimler, örneğin betavoltaik bileşenin gama dönüşümü için bir sintilatör-fotovoltaik aşama ile birleştirilmesi veya özel bir doğrudan

gama-voltaik bölüm gibi hibrit enerji dönüşüm sistemlerine yol açabilir. Ancak bu yaklaşımlar, daha basit olan saf betavoltaik hücre konseptinden sapmakta ve ara dönüşüm adımlarında ek katmanları ve potansiyel verimlilik kayıpları ortaya çıkarmaktadır.

Kaynak malzeme veya yarı iletken içindeki beta parçacıklarının yavaşlamasından kaynaklanan Bremsstrahlung radyasyonu genellikle betavoltaiklerde bir kayıp mekanizması olarak kabul edilir çünkü bu X-ışını fotonları aktif dönüşüm hacminden kaçabilir. Bununla birlikte, betavoltaik cihazın bu Bremsstrahlung X-ışınlarını elektrik yük taşıyıcılarına dönüştürmek için özel olarak tasarlanmış bir malzeme ile kapsüllenmesi veya katmanlanması durumunda bu X-ışınlarının ikincil bir enerji kaynağı haline gelebileceği düşünülebilir. Örneğin, yüksek Z'li bir malzeme Bremsstrahlung üretimini artırabilir ve bir fotodiyotla birleştirilmiş bitişik bir sintilatör veya özel bir X-ışını voltaik malzeme daha sonra bu X-ışınlarını (1-100 keV) emebilir ve ek güç üretebilir. Bu, ikincil radyatif emisyonlardan yararlanarak nominal olarak "saf" bir beta yayıcı olan bir izotoptan bile ilk bozunma enerjisinin daha fazlasını elde ederek çok aşamalı enerji dönüşümü için potansiyel bir yol olmaktadır.

1.6 Betavoltaik Pil Teknolojisi Temel İlkeleri

Betavoltaik piller, radyoaktif bozunmadan açığa çıkan enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle bir nükleer pil teknolojisi kategorisini temsil etmektedir. Özellikle, çekirdekten yüksek enerjili beta parçacıklarının (elektronlar β^- veya pozitronlar β^+) yayılmasına neden olan beta bozunmasına uğrayan radyoizotopları kullanırlar. Betavoltaik pillerde, pozitronlar tarafından üretilen istenmeyen gama ışınları ve bu fotonların neden olduğu hasar potansiyeli nedeniyle yalnızca beta-eksi (β^-) yayıcı radyoizotoplar kullanılır (Ghasemabadi ve ark., 2025).

Bir betavoltaik hücrenin çalışma prensibi, bir fotovoltaik (güneş) hücreninkine benzer, ancak fotonlar yerine, beta parçacıkları iyonizasyon enerjisinin kaynağıdır (Cabauy ve ark., 2010). Radyoaktif kaynaktan yayılan bir beta parçacığı, bir p-n bağlantısı, p-i-n bağlantısı veya Schottky diyot olarak yapılandırılmış bir yarı iletken malzemeye girdiğinde, öncelikle Coulomb saçılması ve bremsstrahlung etkileşimi yoluyla yarı iletken kristal ile etkileşime girer. Bu etkileşimler ile beta parçacığının kinetik enerjisi yarı iletkene aktararak çoklu elektron deliği çiftlerinin (EHP'ler) oluşmasına yol açar; bu süreç çarpma iyonizasyonu olarak bilinir. KeV aralığında

enerjiye sahip tek bir beta parçacığı binlerce EHP üretebilir. Yarı iletken bağlantı noktasının deplasyon bölgesindeki yerleşik elektrik alanı daha sonra üretilen bu EHP'leri ayırarak elektronları n-tipi bölgeye (veya toplayıcıya) ve delikleri p-tipi bölgeye (veya toplayıcıya) doğru yönlendirir. Bu yük ayrımı, bağlantı noktası boyunca potansiyel bir fark (voltaj) yaratır ve harici bir devre bağlanırsa, elektrik gücü sağlayan bir akım akışı olur.

Betavoltaiklerin termal olmayan, bu doğrudan dönüşüm süreci, Radyoaktif enerjinin termal enerjiye dönüşümünü kullanan diğer Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerdeki (RTG) dönüşümlerden farklıdır. RTG'ler radyoaktif bozunma (özellikle alfa bozunması) tarafından yayınlanan enerjiyi ısıya çevirerek, termoelektrik malzemeler arasında bir sıcaklık farkı oluşturmak ve Seebeck etkisi yoluyla elektrik üretirler. RTG'ler önemli ölçüde daha yüksek güç seviyeleri üretebilirken, betavoltaik piller verimlilikleri henüz düşük seviyededir; fakat daha basit katı hal yapısı, minyatürleştirme potansiyeli ve daha yüksek teorik dönüşüm verimliliği açısından gelecek vadetmektedir.

1.7 Radyoaktif Kaynak Seçimi Temel İlkeleri

Radyoaktif kaynak, betavoltaik pilin ana unsurudur ve onun özellikleri, temel olarak cihazın yeteneklerini ve sınırlamalarını tayin eder (Olsen, 1993). Uygun bir beta yayan radyoizotopun seçimi bu nedenle çok önemlidir ve birkaç temel özelliğin ve bunlar arasındaki dengelerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir.

1.7.1 Yarı ömür ($T_{1/2}$)

Bu temel özellik, betavoltaik cihazın potansiyel çalışma ömrünü belirler. Ancak yarı ömür ile spesifik aktivite (ve dolayısıyla güç yoğunluğu) ters orantılıdır; Çok uzun yarı ömre sahip izotoplar genellikle herhangi bir zamanda birim kütle başına daha az güç üretir. Uzun süreli, yıllar veya on yıllar gözlem ve çalışma gerektiren uygulamalar için buna karşılık gelen uzun yarı ömre sahip izotoplar gereklidir (Zhou ve ark., 2021). Geniş bir ömür aralığı temin eden yaygın olarak kabul edilen izotoplar: ^3H (12,3 yıl), ^{63}Ni (100,1 yıl), ^{147}Pm (2,62 yıl), ^{14}C (5730 yıl), ^{90}Sr (28,8 yıl) ve ^{85}Kr (10,8 y). Daha uzun yarı ömre sahip izotoplar genellikle daha düşük spesifik aktifliklere ve dolayısıyla daha düşük güç yoğunluklarına sahip olduğundan (Wang ve Weng, 2025), daha kısa ömürlü bir izotopla karşılaştırıldığında aynı çıkış gücü için daha fazla malzeme

gerektiği anlamına geldiğinden, çok önemli bir tercih söz konusudur. Yapılacak tercih, gerekli kullanım ömrüne uygun olmakla beraber güç yoğunluğu ve boyut kısıtlamalarına göre dengeli olmalıdır.

1.7.2 Ortalama (E_{avg}) ve maksimum (E_{max}) beta bozunum enerjisi

Yayımlanan beta parçacıklarının maksimum ve ortalama kinetik enerjisi, dönüşüm için gerekli enerjiyi, dolayısıyla pilin potansiyel çıkış gücünü ve beta parçacıklarının yarı iletken içindeki etkileşim derinliğini doğrudan etkiler (Ghasemabadi ve ark., 2025). Daha yüksek ortalama beta enerji (E_{avg}), genellikle bozunum başına daha yüksek potansiyel çıkış gücü anlamına gelir. Ancak maksimum beta enerji (E_{max}) yarı iletken dönüştürücüdeki radyasyon hasarıyla kritik bir şekilde ilgilidir (Bhattacharya, 1997; Bao ve ark., 2012; Olsen ve ark., 2012). E_{max} değeri E_{th} değerini aşarsa beta parçacıkları, atomları kristal örgü konumundan koparabilir. Örgüde oluşan boşluklar azınlık yük taşıyıcı ömrünü ve malzemenin difüzyon uzunluğunu azaltabilir, sızıntı akımlarını artırabilir ve sonuçta zaman içinde cihaz verimliliğini ve güç çıkışını düşürebilir (Wang ve Weng, 2025). Bu durum, yeterli enerji üretim seviyesi ile aşırı radyasyon hasarından kaçınma arasında bir denge kurulmasını gerektirmektedir.

Bu durum, hızlı bir şekilde bozulan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ($E_{max}\approx 2,28$ MeV) kullanan ilk çalışmalarda önemli ölçüde gözlemlendi (Rappaport, 1954; Pfann ve Van Roosbroeck, 1954; Olsen, 1973). Bu nedenle, seçilen yarı iletken için birinci seçim kriteri genellikle $E_{max}<E_{th}$ olmasıdır. Bu eşik değerleri Si ve GaAs için 200-250 keV civarındadır ve SiC (~200-440 keV) ve GaN (~400 keV) gibi geniş bant aralıklı malzemeler için biraz daha yüksektir (Flicker ve ark., 1964; Manasse ve ark., 1976). Bu kısıtlama nedeniyle ^3H ($E_{max}\approx 18.6$ keV), ^{63}Ni ($E_{max}\approx 66.9$ keV), ^{14}C ($E_{max}\approx 156.5$ keV) ve ^{147}Pm ($E_{max}\approx 224.6$ keV) gibi izotoplar tercih edilir. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ve ^{85}Kr ($E_{max}\approx 687$ keV) gibi izotoplar, yüksek radyasyon dirençli dönüştürücü malzemeleri veya ara dönüştürme katmanları kullanılmadığı sürece daha büyük radyasyon hasarı riski oluşturur (Flicker ve ark., 1964; Olsen, 1973).

1.7.3 Spesifik aktiflik (SA)

Birim kütle başına bozunma hızı (gram başına Curies, Ci/g veya gram başına Becquerel, Bq/g) olarak tanımlanan spesifik aktivite, yarı ömür ile ters orantılıdır (Kima ve ark., 2016). Daha yüksek spesifik aktivite, daha yüksek bozunum hızına izin vererek

belirli bir kaynak hacmi veya kütlesi içinde daha yüksek güç yoğunluğuna katkıda bulunur (Alam ve ark., 2018). Teorik olarak maksimum spesifik aktiviteler hesaplanabilir, ancak üretimde elde edilen pratik değerler, izotopik zenginleştirme seviyeleri ve kaynağın kimyasal formu gibi faktörler nedeniyle genellikle daha düşük değerler elde edilmektedir. Örneğin saf ^3H için teorik SA ~ 9650 Ci/g'dir, ^{63}Ni için ise ~ 57 Ci/g'dir. Ancak üretilen ^{63}Ni , zenginleştirme ve ışınlamaya bağlı olarak ~ 15 Ci/g değerine düşebilir (Walsh, 2013). Diğer örnekler arasında ^{147}Pm (~ 928 Ci/g), ^{14}C ($\sim 4,5$ Ci/g), ^{90}Sr (~ 140 Ci/g) ve ^{85}Kr (400Ci/g) yer alır. Bu değerlerin karşılaştırılması, izotoplar arasındaki aktivite konsantrasyonundaki önemli farklılıkları vurgular.

1.7.4 Güç yoğunluğu

Radyoizotop kaynağının, dönüşümden önce, birim kütle (W/g veya mW/g) veya birim hacim (W/cm^3) başına üretebileceği gücü olarak tanımlanır. Spesifik aktivite ve ortalama bozunma enerjisi (E_{avg}) ile doğrudan ilişkilidir (Ghasemabadi ve ark., 2025). Minyatürleştirilmiş cihazlar için yüksek güç yoğunluğu arzu edilir (Wang ve Weng, 2025). İzotopun radyoaktif bozunum özelliklerine dayanan bu teorik güç yoğunluğu değerleri bir üst sınır oluşturur: ^3H ($\sim 0,325$ W/g), ^{63}Ni ($\sim 0,0058$ W/g), ^{147}Pm ($\sim 0,34$ W/g), ^{14}C ($\sim 0,00019$ W/g 32), $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ($\sim 0,94$ W/g), ^{85}Kr (0,58W/g) (Dixon ve ark., 2016; Alam ve ark., 2018; Spencer ve Alam, 2019). Fabrika imalat sürecinden sonra elde edilen güç yoğunlukları, izotop zenginleştirme, kimyasal form (örneğin oksitler, izotop yoğunluğunu azaltan hidritler) ve kendi kendine soğurma etkileri gibi faktörler nedeniyle önemli ölçüde daha düşüktür (Alam ve ark., 2018).

1.7.5 Radyoaktif bozunum türü ve saflık

İdeal olarak, koruma gereksinimlerini en aza indirmek ve diğer radyasyon türlerinden kaynaklanan hasarı önlemek için kaynak saf bir beta yayıcı (yalnızca β^-) olmalıdır (Kim ve ark., 2017; Ghasemabadi ve ark., 2025).

Ağır ve oldukça iyonlaştırıcı olan Alfa ($^2\text{He}^4$) parçacıkları, yarı iletken kristallerinin örgü kafeslerinde ciddi ve hızlı hasara neden olur (Adams ve ark., 2023). Gama (γ) ışınları son derece nüfuz edicidir ve kullanıcıları ve hassas elektronikleri korumak için önemli miktarda ağır koruma (örneğin kurşun, tungsten) gerektirir ve cihaza önemli miktarda kütle ve hacim ekler (Olsen ve ark., 2012). Bu nedenle, radyoaktif bozunum şemalarında önemli alfa veya gama dalları olan (veya kız

çekirdekleri bu modlar yoluyla bozunan) izotoplardan genellikle kaçınılır veya kullanılacaksa da özel tasarım hususları gerektirir (Ghasemabadi ve ark., 2025). Bu tür izotop örnekleri arasında alfa bileşenleri olan ^{241}Pu , ^{227}Ac , ^{210}Pb ve kızdan çekirdekten gelen güçlü gamma bileşenleri olan ^{194}Os yer alır (Ghasemabadi ve ark., 2025). Ayrıca ^{85}Kr bazı uygulamalarda koruma gerektiren küçük bir gama emisyonuna (514 keV, %0,43 bolluk) sahiptir.

İzotopik saflık kritik öneme sahiptir; Üretim sürecindeki kirlenici maddeler istenmeyen radyasyon türlerini ortaya çıkarabilir. Bunun klasik örneği, ^{147}Pm kaynaklarındaki ^{146}Pm kirliliğidir; bunun gama emisyonu Betacel için büyük bir dezavantajdı (Olsen ve ark., 2012). Benzer şekilde, ^{63}Ni kaynaklarındaki istenmeyen nikel izotopları, ekstra koruma gerektiren gama radyasyon kirliliği oluşturabilir (Adams ve ark., 2023). Bu nedenle öngörülebilir kaynak davranışı elde etmek ve üretim süreçlerine veya cihaz performansına olumsuz etkisini önlemek için yüksek kimyasal saflık da gereklidir (Litz ve ark., 2020).

1.7.6 Radyoaktif bozunum ürünleri (kız ürünler)

Beta bozunmasından kaynaklanan kız çekirdeklerin kararlılığı ve özellikleri önemlidir. İdeal olarak, kız ürünün kararlı olması ve kirli olmaması gerekir (Ghasemabadi ve ark., 2025). ^3H , kararlı ^3He gazına bozunur. ^{63}Ni , kararlı ^{63}Cu 'ya bozunur. ^{14}C , kararlı ^{14}N 'ye bozunur. ^{85}Kr , kararlı ^{85}Rb 'ye bozunur (Maier ve ark., 2025). ^{147}Pm , bir alfa yayıcı olan ancak son derece uzun bir yarı ömre ($1,06 \times 10^{11}$ yıl) sahip olan ^{147}Sm 'ye bozunur; bu da onu, teknik olarak radyoaktif olsa da, pilin çalışma zamanı boyunca etkili bir şekilde kararlı hale getirir (Hinderer, 2010). ^{90}Sr , kararlı ^{90}Zr 'ye ulaşmadan önce kısa ömürlü (64 saat) yüksek enerjili bir beta yayıcı olan ^{90}Y 'ye bozunduğundan; bozunma zincirindeki her iki izotopun özellikleri dikkate alınmalıdır. Kararsız veya tehlikeli kız ürünler uzun vadeli güvenliği karmaşık hale getirebilir.

1.7.7 Bulunabilirlik ve maliyet

Bunlar uygulamada planlamayı önemli ölçüde etkileyen kısıtlamalardır. ^{90}Sr , ^{147}Pm , ^{14}C , ^{85}Kr gibi bazı izotoplar fisyon ürünleri veya reaktör yan ürünleridir ve potansiyel olarak nükleer yakıt veya atık akışlarının yeniden işlenmesinden elde edilebilir, ancak ayırma ve saflaştırma karmaşık ve maliyetli olabilir (Olsen ve ark., 2012). ^{63}Ni gibi izotoplar, ^{62}Ni gibi zenginleştirilmiş hedef malzemelerin yüksek akışlı

reaktörlerde nötronla ışınlanması yoluyla genellikle pahalı, özel üretim gerektirir (Kima ve ark., 2016). Tritiyum reaktörlerde üretilir ve ticari olarak temin edilebilir; genellikle ^{63}Ni veya saflaştırılmış ^{147}Pm gibi izotoplarla karşılaştırıldığında nispeten bol ve daha düşük maliyetlidir (Alam ve ark., 2018). Tedarik zinciri sorunları ve üretim maliyetleri ^{147}Pm için belirtildiği gibi belirli izotopların uygulanabilirliğini sınırlayabilir.

1.7.8 Güvenlik ve koruma

Radyolojik güvenlik her şeyden önemlidir, en önemli tehlike yutma, soluma veya deri emilimi yoluyla radyasyona maruziyettir (Wang ve Weng, 2025). Özellikle ^3H (Searle, 1980) olmak üzere, ^{14}C ve ^{63}Ni gibi düşük enerjili saf beta yayıcılar, betaları cihaz kılıfı, ambalaj gibi ince malzeme katmanları tarafından kolayca durdurulduğu için minimum dış radyasyon tehlikesi oluşturur.

Sızıntıyı önlemek için uygun kapsülleme ve muhafaza çok önemlidir (Suzuki ve ark., 2008).

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr gibi daha yüksek enerjili beta yayıcılar daha derin nüfuz etme ve bremsstrahlung (betalar maddede, özellikle de yüksek Z'li malzemelerde hızla yavaşladığında oluşan X-ışınları) üretimi nedeniyle daha büyük bir dış tehlike oluşturur.

Bu izotoplar, başlangıçta betaları absorbe etmek için genellikle plastik (Pleksiglas/Lucite) gibi düşük Z'li malzemeler kullanılarak, ardından gerekirse bremsstrahlung'u zayıflatmak için daha yüksek Z'li malzemeler (kurşun gibi) kullanılarak daha önemli bir kalkanlama gerektirir (Zanzonico ve Strauss, 2021). Gama bileşenli izotoplar (^{146}Pm , ^{85}K) da kurşun, tungsten gibi malzemelerle daha yoğun kalkanlama gerektirir (Olsen ve ark., 2012).

Kimyasal toksisite de bir faktördür; ancak kullanılan miktarlar açısından genellikle radyolojik tehlikelerden daha az önemlidir; ^{90}Sr , kalsiyuma kimyasal benzerliğinden dolayı dikkate değer bir endişe kaynağıdır ve kemikte birikmeye neden olur. Üretim, işleme, dağıtım ve taşıma lisansları, kapsülleme ve nihai imha için gerekli güvenlik protokolleri gibi düzenleyici hususlar da güvenlik hususlarının kapsamına girmektedir (Wang ve Weng, 2025).

Bu tezin temel amacı betavoltaik nükleer pillerde kullanılan radyoaktif kaynaklara ilişkin bilimsel araştırmaların kapsamlı bir incelemesini ve analizini sağlamaktır. Bu, ilgili beta yayan izotopların temel özelliklerinin, seçimlerini belirleyen kriterlerin, bunların üretimi için kullanılan yöntemlerin ve kullanılabilir kaynak

formlarına dönüştürülmelerinin, betavoltaik cihazlara entegrasyon tekniklerinin, karakterizasyon yöntemlerinin ve kendi kendine soğurma ve radyasyon hasarı etkileri gibi kullanımlarıyla ilgili doğal zorlukların incelenmesini içerir.

1.8 Radyoaktif Kaynak Üretim Metodları

Betavoltaiklerle ilgili radyoizotopları üretmek için iki ana metod mevcuttur:

1.8.1 Filyon ürünü ayrıştırma

Aralarında ^{147}Pm , ^{90}Sr , ^{85}Kr ve potansiyel olarak ^{14}C 'nin de bulunduğu çeşitli faydalı beta yayıcılar, nükleer reaktörlerde Uranyum-235 (^{235}U) ve Plütinyum-239 (^{239}Pu) gibi ağır elementlerin nükleer filyonu sırasında yan ürün olarak ortaya çıkar. Bu izotoplar kullanılmış nükleer yakıtta birikir. İstenen izotopu diğer yüzlerce filyon ürünü ve aktinitten izole etmek için çözündürme ve sofistike ayırma tekniklerini (örneğin, çözücü ekstraksiyonu, iyon değişim kromatografisi) içeren yüksek radyoaktif yakıtın karmaşık kimyasal metodlarla yeniden işlenmesini gerektirir (Davis, 2017). Potansiyel olarak büyük miktarlar sağlasa da, yeniden işleme altyapısı kapsamlı ve maliyetlidir ve elde edilen ürünler izotopik veya kimyasal kirleticileri elemek için önemli ölçüde saflaştırma gerektirebilir. Nükleer atık akışlarından elde edilen ^{14}C 'nin kullanılması da sürdürülebilir bir kaynak seçeneğidir.

1.8.2 Nötron aktivasyonu

Kararlı hedef malzemelerin bir nükleer reaktör içinde nötronlarla ışınlanmasını içerir (Kima ve ark., 2016). Hedef çekirdek bir nötron soğurur ve bunu genellikle istenen izotopu üretmek için radyoaktif bozunma takip eder. Bu metodla: ^{63}Ni üretmek için, $^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$; ve ^{147}Pm üretmek için $^{146}\text{Nd}(n,\gamma)^{147}\text{Nd} \rightarrow ^{147}\text{Pm}$ reaksiyonları kullanılır (Kima ve ark., 2016; Broderick ve ark., 2019). Trityum (^3H) izotopu, Lityum ($^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$) veya Bor hedeflerinin nötron aktivasyonu ile veya ağır su moderatörlü reaktörlerde bir yan ürün olarak üretilebilir (Colozza ve Cataldo, 2018). Bu yöntem, yüksek oranda zenginleştirilmiş hedef malzemeler kullanıldığında potansiyel olarak daha yüksek izotopik saflığa izin verir, ancak verim hedef zenginliğine, nötron akısına, ışınlama süresine ve hem hedef hem de ürün izotoplarının nötron yakalama tesir kesitlerine bağlıdır (Kima ve ark., 2016).

1.8.2.1 Nikel-63 (^{63}Ni)

Üretim, kararlı ^{62}Ni izotopunun nötron ışınlamasına dayanır (Kuznetsov ve ark., 2022). Doğal nikel filizleri, içerisinde yalnızca $\sim\%3,6$ oranında ^{62}Ni ihtiva ettiğinden, ^{63}Ni yüksek spesifik aktivite elde etmek için ^{62}Ni açısından $\%80-90$ gibi yüksek oranda zenginleştirilmiş hedefler gerektirir. Bu zenginleştirilmiş hedefleri elde etmek oldukça pahalıdır. Yeterli aktivite seviyelerine (örneğin ~ 15 Ci/g) ulaşmak için ABD'deki HFIR veya Polonya'daki MARIA gibi yüksek akışlı reaktörlerde, ışınlamanın aylar ile yıllar süren uzun süreler boyunca meydana gelmesi gerekir (Kima ve ark., 2016). Uzun ışınlama süreleri ve zenginleştirilmiş hedeflerin yüksek maliyeti, ^{63}Ni üretimini nispeten pahalı hale getiriyor. Rusya'da Devlet Atom Enerjisi Kuruluşu ROSATOM, ^{63}Ni üretimi için $\%80$ zenginleştirme kapasitesine ulaştığını bildirdi (Rosatom, 2016). Işınlamadan sonra, hedef malzeme (çoğunlukla topraklar halinde preslenmiş metal tozu) daha sonraki işleme veya kaynak üretimi için HCl içinde çözülür (Kima ve ark., 2016).

1.8.2.2 Trityum (^3H)

Temel olarak nötron aracılığıyla üretilir. Öncelikle reaktörlerdeki lityum hedeflerin nötron ışınlamasıyla üretilir veya belirli reaktör tiplerinde moderatör/soğutucu olarak kullanılan ağır sudan geri kazanılır (Colozza ve Cataldo, 2018). Diğer betavoltaik izotoplarla karşılaştırıldığında nispeten büyük miktarlarda ticari olarak temin edilebilir (Alam ve ark., 2018). Genellikle trityum gazı ($^3\text{H}_2$) veya trityumlu su (^3HHO veya T_2O) olarak tedarik edilir ve işlenir. Hidrojen atomları ile kolayca değiş tokuş yapabilmesi ve özellikle yüksek sıcaklıklarda malzemelere nüfuz edebilmesi nedeniyle, serbest kalarak personelin maruz kalmasını önlemek için genellikle inert atmosferli kapalı eldiven kutuları ve trityum yakalama/izleme sistemlerini içeren özel işleme tesisleri gereklidir (Maier ve ark., 2025). İşleme protokolleri işleme sıcaklıklarını sınırlar (difüzyon nedeniyle tek duvarlı paslanmaz çelik reaktörlerde $<300^\circ\text{C}$) (Cheu ve ark., 2024).

1.8.2.3 Prometyum-147 (^{147}Pm)

Tarihsel olarak Hanford gibi tesislerde nükleer yakıtın yeniden işlenmesi sırasında ortaya çıkan fisyon ürünlerinden büyük miktarlarda izole edilerek elde edilmiştir (Broderick ve ark., 2019). Şu anda, önemli üretim, HFIR gibi yüksek akışlı reaktörlerde yüksek oranda zenginleştirilmiş ^{146}Nd hedeflerinin (Nd_2O_3) nötron

aktivasyonuna dayanmaktadır. Reaksiyon mekanizması $^{146}\text{Nd}(n,\gamma)^{147}\text{Nd}$ 'dir, bunu ^{147}Nd 'nin beta bozunumu ($T_{1/2}\approx 11$ gün) ve ^{147}Pm izler (de Souza ve ark., 2021). Burada en önemli sorun, ^{147}Pm 'nin yüksek nötron yakalama tesir kesitidir, bu da uzun ışınlamalar sırasında ürünün daha ağır ^{148}Pm ve $^{148\text{m}}\text{Pm}$ izotoplarına yol açarak verimi sınırlar. Işınlamadan sonra, miligram miktarındaki ^{147}Pm 'yi Nd hedef malzemesinden ve Europium, Gadolinium, Cobalt, Iridium gibi diğer aktivasyon veya fisyon ürünü safsızlıklarından ayırmak için karmaşık kimyasal ayırma işlemleri (LN reçinesi kullanılarak ekstraksiyon kromatografisi, kation değişim kromatografisi) gereklidir (Broderick ve ark., 2019).

1.8.2.4 Karbon-14 (^{14}C)

Çeşitli nötron reaksiyonları yoluyla, özellikle de reaktör yakıtı, moderatör veya soğutucudaki nitrojen safsızlıklarıyla meydana gelen $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ veya nitrojen içeren hedeflerin ışınlanmasıyla üretilebilir. Aynı zamanda, özellikle grafit moderatörlü reaktörlerden veya yakıtın yeniden işlenmesinden kaynaklanan nükleer atıkların bir bileşenidir. Üretim/ayırma işleminden sonra kaynak üretimine uygun spesifik kimyasal formlara sentezleme gereklidir (Hwang ve ark., 2020; Li ve ark., 2023). İyon-plazma yöntemleri de ^{14}C üretimi için kullanılmıştır (Akimchenko ve ark., 2017).

1.8.2.5 Strontium-90 (^{90}Sr)

Nispeten yüksek verime sahip önemli bir fisyon ürünüdür. ^{235}U fisyon ürünleri içinde $\sim\%4,5$ oranında bulunur. Öncelikle yeniden işleme sırasında kullanılmış nükleer yakıttan ayrıştırılarak elde edilir. Fisyon ürünlerindeki bolluğu, potansiyel olarak büyük miktarlarda bulunmasını sağlar, ancak yüksek düzeyde, radyoaktif yakıtın işlenmesini ve sofistike kimyasal ayrıştırma gerektirir.

1.8.2.6 Krypton-85 (^{85}Kr)

Verimi $\sim\%0,3$ olan bir fisyon ürünüdür. Asal bir gaz olduğundan, öncelikle kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinin çözünme aşamasında açığa çıkar ve atık gaz akışlarından toplanabilir ve saflaştırılabilir. Genellikle basınçlı kaplarda depolanan bir gaz olarak işlenir ve kullanılır.

Bu tezin amacı, kullanılmakta olan veya betavoltaik uygulamalar için potansiyel olarak uygun olan bir dizi beta yayan radyoizotopun teorik güç çıkış hesaplamaları

yapılarak analizini sunmaktır. Bu hesaplamalarda ve analizde, beta bozunumu ile eşzamanlı olarak yayılan gama radyasyonunun güç katkısı da dikkate alınmıştır.

Beta parçacıkları ve gama ışınlarının madde ile etkileşim mekanizmaları incelenerek seçilen her radyoizotop için kritik güç boyutlarının sistematik hesaplanması yapılmıştır. Bu boyutlar şunları içerir:

Beta ve gama emisyonları için birim aktivite başına güç (Watt/Curie).

Beta ve gama emisyonları için birim kütle başına güç (özgül güç) (Watt/gram).

Beta ve gama emisyonları için güç yoğunluğu (Watt/cm³).

Bu hesaplanan değerler, izotoplar arasında doğrudan karşılaştırma yapılmasına olanak tanıyan kapsamlı bir tabloda sunulmuştur.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Radyoizotoplardan elde edilen teorik güç çıkışının hesaplanması, radyoaktif bozunma ve enerji dönüşümü ile ilgili birkaç temel denklem içerir.

2.1 Radyoaktif Bozunma için Temel Denklemler

2.1.1 Aktivite

Radyoaktif bir numunenin aktivitesi (A), çekirdeklerinin bozunma hızı olarak tanımlanır. Bu, mevcut radyoaktif atomların sayısı (N) ve bozunma sabiti (λ) ile doğru orantılıdır:

$$A = \lambda N \quad (2.1)$$

Standart aktivite birimi Becquerel (Bq) olup, 1 Bq saniyede 1 bozunuma eşittir. Bir başka yaygın birim ise Curie (Ci) olup, 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq olarak tanımlanır.

2.1.2 Bozunma sabiti (λ) ve yarı ömür ($T_{1/2}$)

Bozunma sabiti (λ), belirli bir çekirdeğin birim zaman başına bozunma olasılığının ölçüsüdür. Bu sabit, bir numunedeki radyoaktif atomların yarısının bozunması için gereken süre olan yarı ömür ($T_{1/2}$) ile ters orantılıdır:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (2.2)$$

2.1.3 Atom sayısı (N) ve molar kütle (M) ilişkisi

Saf bir izotopun belirli bir kütledeki (m) radyoaktif atomların sayısı (N), mol kütlesi (M) ve Avogadro sayısı (N_A) kullanılarak hesaplanabilir:

$$N = \frac{m}{M} N_A \quad (2.3)$$

Avogadro sayısı (N_A) $6,022 \times 10^{23}$ mol⁻¹'dir. Mol kütlesi (M) g/mol cinsinden, atom kütle birimi (u) cinsinden izotopik kütleyle sayısal olarak eşit kabul edilir.

2.2 Beta Emisyonlarından Güç Hesaplaması (P_β)

Radyoaktif bir kaynaktan yayımlanan beta emisyonları (P_β) tarafından üretilen toplam güç, kaynağın aktivitesi (A) ile beta parçacığı tarafından taşınan beta bozunumu başına salınan ortalama enerji (\bar{E}_β) çarpımının sonucudur:

$$P_\beta = A \cdot (\bar{E}_\beta) \quad (2.4)$$

Burada, (\bar{E}_β) joule cinsinden olmalıdır. (\bar{E}_β) MeV cinsinden verilmişse, 1 MeV = $1,60217653 \times 10^{-13}$ J dönüşüm faktörü kullanılarak joule cinsine dönüştürülür. Elde edilen güç P_β watt (J/s) cinsinden olacaktır.

Maksimum beta enerjisi (Q_β) yerine ortalama beta enerjisi (\bar{E}_β) seçimi, gerçekçi güç hesaplamaları için çok önemlidir. Beta enerji spektrumu süreklidir, yani beta parçacıkları sıfırdan Q_β 'ye kadar sürekli bir enerji aralığında yayılır. Q_β kullanılması, her beta parçacığının mümkün olan maksimum enerjisiyi taşıdığını yanlış bir şekilde varsayacaktır, bu da kullanılabilir gücü büyük ölçüde fazla hesaplanmasına sebep olacaktır. Ortalama beta enerjisi, (\bar{E}_β), bu enerji dağılımının istatistiksel ortalamasını yansıtır ve dönüşüm için kullanılabilir sürekli güç çıkışını hesaplamak için fiziksel olarak uygun parametredir.

2.3 Gama Emisyonlarından Güç Hesaplaması (P_γ)

Beta bozunumu gama emisyonları ile birlikte gerçekleşirse (kız çekirdeğin uyarılmış durumda oluşması nedeniyle), bu gama ışınlarının ürettiği güç (P_γ) her bir gama ışınının katkısının toplamı ile hesaplanabilir. Her bir gama ışını için (i), enerjisi $E_{\gamma,i}$ ve yoğunluğu $I_{\gamma,i}$ (ana çekirdeğin bozunumu başına yayınlanma olasılığı) gereklidir:

$$P_\gamma = A \sum_i (E_{\gamma,i} * I_{\gamma,i}) \quad (2.5)$$

$E_{\gamma,i}$ gücün Watt cinsinden olması için Joule cinsinden olmalıdır. $I_{\gamma,i}$ boyutsuz bir orandır.

2.4 Kullanılan Güç Boyutları

Farklı radyoizotoplar arasında karşılaştırmayı kolaylaştırmak için, güç değerleri birkaç türetilmiş boyutta hesaplanır:

2.4.1 Curie başına güç (W/Ci) (Beta ve Gama)

Bu boyut, standart bir aktivite miktarı (1 Curie) için güç çıkışını ifade eder:

$$P_{\beta}/Ci=(3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci}) \cdot \bar{E}_{\beta} \text{ (J/bozunma)} \quad (2.6)$$

$$P_{\gamma}/Ci=(3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci}) \cdot \sum_i (E_{\gamma,i} * I_{\gamma,i}) \quad (2.7)$$

2.4.2 Birim kütle başına güç (Özgül güç) (W/g) (Beta ve gama)

Özgül güç, radyoizotop yakıtın önemli bir özelliğidir. İlk olarak, saf izotop için birim kütle başına aktivite (A/m) hesaplanır:

$$(A/m)=\lambda(N_A/M) \quad (2.7)$$

$\lambda \text{ s}^{-1}$, $N_A \text{ mol}^{-1}$ ve $M \text{ g/mol}$ cinsindedir, böylece (A/m) değerini Bq/g cinsinden olur.

Böylece, gram başına güç:

$$P_{\beta}/g=(A/m) \cdot \bar{E}_{\beta} \quad (2.8)$$

$$P_{\gamma}/Ci=(A/m) \cdot \sum_i (E_{\gamma,i} * I_{\gamma,i}) \quad (2.9)$$

Bu güç boyutu, farklı izotopların birim kütle başına güç üretim kapasitesinin doğrudan karşılaştırılmasını sağlar.

2.4.3 Güç Yoğunluğu (W/cm³) (Beta ve gama)

Güç yoğunluğu, güç çıkışını radyoizotop malzemesinin hacmiyle ilişkilendirir. Radyoizotop malzemesinin birim kütle başına gücü ve yoğunluğu (ρ) kullanılarak hesaplanır:

$$P_{\beta}/\text{cm}^3=(P_{\beta}/g) \cdot \rho(\text{g}/\text{cm}^3) \quad (2.10)$$

$$P_{\gamma}/\text{cm}^3=(P_{\gamma}/g) \cdot \rho(\text{g}/\text{cm}^3) \quad (2.11)$$

2.5 Seçilmiş Radyoizotopların Güç Analizi

Bu bölümde, betavoltaik uygulamalarla ilgili seçilmiş radyoizotopların ayrıntılı bir analizi sunulmaktadır. Her izotop için temel nükleer özellikler verilmekte, ardından beta ve gama güç hesaplamaları yapılmaktadır. Bu bölümde saf beta bozunumu içeren ³H; beta+gama karışımı içeren ⁸⁵Kr radyoizotoplarının ayrıntılı hesaplaması yapılarak gösterilmiştir. Diğer izotopların aynı yöntemle yapılan hesaplamaları için bir

izogüçhesabı.f adlı Fortran77 programı hazırlanmış ve hesaplamaları yapılmıştır. Programdan elde edilen sonuçlar kapsamlı bir çizelgede birleştirilmiş ve bu değerlerin karşılaştırmalı bir analizi sunulmuş, bunların betavoltaik uygulamalar için önemi yorumlanmıştır. Çizelge 3.1, analiz edilen bütün radyoizotopların temel nükleer verilerini ve hesaplanan güç özelliklerini özetlemektedir.

Bu hesaplamalar için kullanılan veriler, esas olarak Chemlin, Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB) radyonüklid veri tabloları ve Radiacode gibi kaynaklar aracılığıyla National Nuclear Data Center (NNDC) tarafından sağlanmaktadır.

2.5.1 Tritiyum (^3H)

Tritiyum, hidrojenin hafif, saf beta yayan bir izotopudur (Bé ve ark., 2004). Nispeten uzun yarı ömrü, düşük beta enerjisi (daha kolay koruma ve potansiyel olarak daha yüksek yarı iletken dönüşüm verimliliği anlamına gelir) ve bulunabilirliği nedeniyle betavoltaik uygulamalar için yaygın olarak değerlendirilmektedir.

Yarı ömür ($T_{1/2}$): $12.32 \text{ (yıl)} * 3.15576 \times 10^7 \text{ (s/y)} = 3.887897 \times 10^8 \text{ s}$.

Bozunma modu: Saf β^- yayınımlı.

İzotopik kütle: 3.01604928132 u .

Molar kütle (M): 3.016049 g/mol .

Ortalama beta enerjisi (\bar{E}_β): $5.7 \text{ keV} = 0.0057 \text{ MeV}$.

$$\bar{E}_\beta = 0.0057 \text{ MeV} \times 1.602176634 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 9.1324068 \times 10^{-16} \text{ J}$$

Maksimum Beta Enerjisi (Q_β): $18.6 \text{ keV} = 0.0186 \text{ MeV}$

Gama yayınımlı: Yok.

Yoğunluk: Elemental trityumun yoğunluğu düşüktür. Çok düşük sıcaklıklarda katı haldeyken, yoğunluğu gaz halinden daha yüksektir. 25 K'da sıvı T_2 'nin molar yoğunluğu: $42,65 \text{ mol/L}$. T_2 'nin molar kütlesi yaklaşık $2 \times 3,016 = 6,032 \text{ g/mol}$ 'dür.

Sıvı trityumun yoğunluğu (T_2) = $42.65 \text{ mol/L} \times 6.032 \text{ g/mol} = 257.25 \text{ g/L} = 0.257 \text{ g/cm}^3$. Bu değer, elemental trityum güç yoğunluğu için kullanılacaktır. (Not: Yoğunluğu yaklaşık $3,8 \text{ g/cm}^3$ olan trityumlu titanyum, TiT_2 , uygulamada cihazlarda sıklıkla kullanılır, ancak titanyum içerir ve belirli bir T/Ti oranına sahiptir, yaklaşık <2).

$$\text{Bozunma sabiti: } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.69314718}{3.887897 \times 10^8 \text{ s}} = 1.78283 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

Curie başına güç (P_β/Ci):

$$P_{\beta}/\text{Ci}=(3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci}) \cdot (9.1324068 \times 10^{-16} \text{ J/decay}) = 3.37899 \times 10^{-5} \text{ W/Ci}$$

Gram başına aktivite (A/m):

$$(A/m) = \lambda(N_A/M) = (1.78283 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}) \frac{6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{3.016049 \text{ g/mol}} = 3.5590 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$$

Kütle başına güç (P_{β}/g):

$$P_{\beta}/\text{g} = (3.5590 \times 10^{14} \text{ Bq/g}) \cdot (9.1324068 \times 10^{-16} \text{ J/decay}) = 0.3250 \text{ W/g}$$

Güç Yoğunluğu (P_{β}/cm^3):

$$P_{\beta}/\text{cm}^3 = (0.3250 \text{ W/g}) \cdot (0.257 \text{ g/cm}^3) = 0.0835 \text{ W/cm}^3$$

Gamalar için güç hesapları:

$$P_{\gamma}/\text{Ci} = 0, \quad P_{\gamma}/\text{g} = 0, \quad P_{\gamma}/\text{cm}^3 = 0.$$

2.5.1 Kripton-85 (^{85}Kr)

Kripton-85, orta düzeyde yarı ömre sahip bir soy gaz radyoizotopudur ve hem beta hem de gama radyasyonu yayar (Bé ve ark., 2004).

Yarı ömür ($T_{1/2}$): 10.752 yıl = 10.752 y \times 3.15576 \times 10⁷ s/y = 3.3933 \times 10⁸ s.

Bozunma Modu: Önemli bir gama dalı olan β^- yayıcı.

İzotopik kütle: 84.9125273 u.

Molar kütle (M): 84.912527 g/mol.

Beta emisyonları (Bé ve ark., 2004):

Dal 1 ($\beta_{0,0}$): İhtimal $I_{\beta 1} = 0.99562$; $Q_{\beta 1} = 687.1 \text{ keV}$; $\bar{E}_{\beta 1} = 251.4 \text{ keV} = 0.2514 \text{ MeV}$.

Dal 2 ($\beta_{0,2}$): İhtimal $I_{\beta 2} = 0.00438$; $Q_{\beta 2} = 173.1 \text{ keV}$; $\bar{E}_{\beta 2} = 50.8 \text{ keV} = 0.0508 \text{ MeV}$.

Maksimum Beta Enerjisi (Q_{β}): 687,1 keV (ana dal için).

Etkin $\bar{E}_{\beta} = (0.99562 \times 0.2514 \text{ MeV}) + (0.00438 \times 0.0508 \text{ MeV})$

$$= 0.25029 + 0.0002225 = 0.25051 \text{ MeV}.$$

$$= 0.25051 \text{ MeV} \times 1.602176634 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 4.0137 \times 10^{-14} \text{ J}.$$

Gamma Yayınlanması (Bé ve ark., 2004):

$E_{\gamma 1} = 514.006 \text{ keV}$, Foton ihtimali $I_{\gamma 1, \text{ph}} = 0.00438$ (0.438% ana çekirdeğin bozunumu başına). Bu gama, $\beta_{0,2}$ dalına eşlik eder.

$$E_{\gamma 1} = 0.514006 \text{ MeV} \times 1.602176634 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 8.2355 \times 10^{-14} \text{ J}.$$

Yoğunluk (ρ): Katı kriptonun yoğunluğu 2,155 g/cm³'tür. (Standart şartlarda gaz halindedir, yoğunluğu 3,749 g/L'dir).

$$\text{Bozunma sabiti } (\lambda): \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.69314718}{3.3933 \times 10^8 \text{ s}} = 2.0426 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

Curie başına güç:

$$P_{\beta}/\text{Ci}=(3.7\times 10^{10} \text{ Bq/Ci})\cdot(4.0137\times 10^{-14} \text{ J/bozunma})=0.001485 \text{ W/Ci}$$

$$P_{\gamma}/\text{Ci}=(3.7\times 10^{10} \text{ Bq/Ci})\cdot(8.2355\times 10^{-14} \text{ J}\times 0.00438)=1.335\times 10^{-5} \text{ W/Ci}$$

Gram başına aktivite (A/m):

$$(A/m)=\lambda(N_A/M)=(2.0426\times 10^{-9} \text{ s}^{-1})\frac{6.02214076\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{84.912527 \text{ g/mol}}=1.4487\times 10^{13} \text{ Bq/g}$$

Kütle başına güç:

$$P_{\beta}/\text{g}=(1.4487\times 10^{13} \text{ Bq/g})\cdot(4.0137\times 10^{-14} \text{ J/bozunma})=0.5815 \text{ W/g}$$

$$P_{\gamma}/\text{g}=(1.4487\times 10^{13} \text{ Bq/g})\cdot(8.2355\times 10^{-14} \text{ J}\times 0.00438)=0.00522 \text{ W/g}$$

Güç yoğunluğu:

$$P_{\beta}/\text{cm}^3=(0.5815 \text{ W/g})\cdot(2.155 \text{ g/cm}^3)=1.2531 \text{ W/cm}^3$$

$$P_{\gamma}/\text{cm}^3=(0.00522 \text{ W/g})\cdot(2.155 \text{ g/cm}^3)=0.01125 \text{ W/cm}^3$$

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

3.1 Hesaplama Sonuçları

Seçilen izotopların güç üretim kapasitelerinin hesaplama sonuçları Çizelge 3.1’te verilmiştir. Beta bozunumundan elde edilebilen güç ile beraber, aynı zamanda gama emisyonlarının katkısı da hesaplanarak gösterilmiştir. Bu değerler, pil cihazında herhangi bir dönüşüm kaybı yaşanmadan önce, radyoaktif bozunma sürecinden elde edilebilen içsel gücü temsil etmektedir.

Çizelgede hesaplamaları yapılan izotoplar için güç birimleri Curie başına güç (W/Ci), kütle başına güç (W/g), beta ve gama emisyonları için güç yoğunluğu (W/Cm³) listelenmiştir. Bu, güç özelliklerine göre belirli uygulamalar için en uygun izotopları belirlemek için temel öneme sahiptir.

Beta ve gama emisyonları için güç ölçümlerini ayrı sütunlarda sunarak, çizelge her bir radyasyon türünün kaynağın toplam potansiyel güç çıkışına göre göreceli katkısını net bir şekilde değerlendirmeye olanak tanır. Bu, gama enerjisinin kullanımıyla ilgili karşılaştırmalı yorumlama için gereklidir.

Gücün birden fazla birimde (W/Ci, W/g ve W/cm³) gösterilmesi özellikle değerlidir. W/Ci, aktivite birimi başına güç birimi, yarı ömür veya izotopik kütleden bağımsız olarak her bir bozunma olayı başına salınan enerji hakkında bilgi verir. W/g veya özgül güç, yarı ömür ve molar kütleyi içerir ve kütlenin önemli kısıtlama olduğu uygulamalar için kritik öneme sahip olan gravimetrik enerji yoğunluğunun bir ölçüsünü sağlar. W/cm³ veya güç yoğunluğu, kaynak malzemenin fiziksel yoğunluğunu da dahil eder ve bu, hacimsel enerji yoğunluğu ve cihaz minyatürleştirme gerektiren uygulamalar için hayati bir parametredir. Bir izotop bu ölçütlerden birinde üstün olabilir, ancak diğerlerinde daha az elverişli olabilir; örneğin, ¹⁴C çok uzun bir yarı ömre sahiptir, bu da makul bir ortalama beta enerjisine rağmen düşük W/g ve W/cm³ değerlerine yol açar, bu da onu çok uzun süreli, çok düşük güç uygulamaları için uygun hale getirir.

Çizelge 3.1 Betavoltaik Uygulamalar İçin Seçilmiş Beta Yayımlı Radyoizotopların Hesaplanan Güç Değerleri

Izotop	Güç/Curie ($\mu\text{W/Ci}$)		Güç/Kütle (mW/g)		Güç Yoğunluğu (mW/cm^3)	
	Beta	Gama	Beta	Gama	Beta	Gama
Nikel-63 (^{63}Ni)	101.23	0	5.73	0	50.14	0
Tritiyum (^3H)	33.68	0	327	0	0.0876	0
Titanyum Tritür (TiT_2)	33.68	0	36.4	0	147	0
Prometyum-147 (^{147}Pm)	366.63	2.00	345	1.88	2490	13.57
Karbon-14 (^{14}C)	296.0	0	1.31	0	2.45	0
Stronsiyum-90 (^{90}Sr)	1160.3	0	162	0	428	0
Yitriyum-90 (^{90}Y)	5526.9	1.01	3018	0.551	13490	2.46
Kükürt-35 (^{35}S)	288.9	0	430	0	890	0
Kripton-85 (^{85}Kr)	1485.9	13.1	582	5.14	2.18	0.0193
Kalsiyum-45 (^{45}Ca)	455.8	0	8.11	0	12.57	0
Samaryum-151 (^{151}Sm)	118.4	0.051	3.11	0.00134	23.39	0.0101
Tulyum-171 (^{171}Tm)	148.0	0.437	178	0.524	1660	4.88
Evropiyum-155 (^{155}Eu)	384.8	288.5	179	134	942	705
Polonyum-210 (^{210}Po)*	31376*	0	141200*	0	1316000*	0
Fosfor-32 (^{32}P)	4114.4	0	1177	0	2142	0
Fosfor-33 (^{33}P)	452.3	0	71.5	0	130	0
İridiyum-194 (^{194}Ir)	4854.4	299.5	5874	362	132500	8170
Aynştaynyum-254 (^{254}Es)*	36217*	41.44	1394*	1.60	12320*	14.14
Tellür-121 (^{121}Te)**	177.6**	3248.9	102**	1862	636**	11620
Baryum-137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$)	-	3526.9	-	-	-	-
Sezyum-137 (^{137}Cs)	1030.1	3328.8	89.6	290	173	560
Teknesyum-99 (^{99}Tc)	503.2	0	0.00855	0	0.0983	0

*Polonyum-210 ve Aynştaynyum-254 ağırlıklı olarak alfa yayıcılarıdır, değerler alfa radyasyonu için verilmiştir.

**Tellür-121 elektron yakalama (EC) bozunumu geçirir, beta değerleri EC için verilmiştir.

Stronsiyum-90 ve Yitriyum-90 genellikle seküler dengede bulunur, ancak tabloda ayrı ayrı listelenmiştir.

Sezyum-137 ve Baryum-137m arasında da benzer bir ilişki vardır.

Polonyum-210 ve Aynştaynyum-254 ağırlıklı olarak alfa yayıcılarıdır, karşılaştırma amacıyla dahil edilmiştir.

Tellür-121 elektron yakalama bozunumu geçirir, beta sütunundaki değerler EC için verilmiştir.

Değerler, IAEA Nuclear Data Services, National Nuclear Data Center (NNDC), Table of Isotopes ve bilimsel literatürden derlenmiştir.

Çizelge 3.2 Güç Hesaplamalarında Kullanılan İzotopların Verileri (Prelas ve ark., 2016)

İzotop	Yarı Ömür	Bozunma Sabiti (s^{-1})	Yoğunluk (g/cm^3)	Molar Kütle (g/mol)	Ortalama Beta Enerji (keV)	Maksimum Beta Enerji (keV)	Gama Enerji (keV, %)
Nikel-63 (^{63}Ni)	100.1 yıl	2.19×10^{-10}	8.75	62.93	17.1	67.0	Saf beta
Tritiyum (3H)	12.32 yıl	1.78×10^{-9}	2.68×10^{-4}	3.016	5.69	18.6	Saf beta
Titanyum Tritür (Ti_2T_3)	12.32 yıl	1.78×10^{-9}	4.05	49.90	5.69	18.6	Saf beta
Prometyum-147 (^{147}Pm)	2.62 yıl	8.38×10^{-9}	7.22	147.0	61.93	224.1	Beta + 121 (%0.28)
Karbon-14 (^{14}C)	5730 yıl	3.83×10^{-12}	1.87	14.003	50.0	156.0	Saf beta
Stronsiyum-90 (^{90}Sr)	28.8 yıl	7.63×10^{-10}	2.64	89.907	196	546	Saf beta
Yttriyum-90 (^{90}Y)	64 saat	3.01×10^{-6}	4.47	89.91	933.6	2280	Beta + 1700 (%0.01)
Kükürt-35 (^{35}S)	87.3 gün	9.19×10^{-8}	2.07	34.969	48.8	167.1	Saf beta
Kripton-85 (^{85}Kr)	10.76 yıl	2.04×10^{-9}	3.75×10^{-3}	84.912	251.0	687.1	Beta + 514 (%0.43)
Kalsiyum-45 (^{45}Ca)	162.7 gün	4.93×10^{-8}	1.55	44.956	77.0	256.8	Saf beta
Samaryum-151 (^{151}Sm)	90 yıl	2.44×10^{-10}	7.52	150.92	20.0	76.7	Beta + 21.5 (%0.04)
Tulyum-171 (^{171}Tm)	1.92 yıl	1.14×10^{-8}	9.32	170.94	25.0	96.5	Beta + 67 (%0.11)
Evropiyum-155 (^{155}Eu)	4.76 yıl	4.61×10^{-9}	5.26	154.92	65.0	252	Beta + 86.5 (%30.7), 105.3 (%21.1)
Polonyum-210 (^{210}Po)	138.4 gün	5.80×10^{-8}	9.32	209.98	5300 (alfa)	5300 (alfa)	Alfa + 803 (%0.001)
Fosfor-32 (^{32}P)	14.29 gün	5.62×10^{-7}	1.82	31.97	695.0	1710.6	Saf beta
Fosfor-33 (^{33}P)	25.3 gün	3.17×10^{-7}	1.82	32.97	76.4	248.5	Saf beta
İridiyum-194 (^{194}Ir)	19.28 saat	9.99×10^{-6}	22.56	193.96	820.0	2247	Beta + 328 (%13.1), 645 (%1.2), 293 (%2.5)
Aynştaynyum-254 (^{254}Es)	275.7 gün	2.91×10^{-8}	8.84	254.09	6600 (alfa)	6600 (alfa)	Alfa (%93) + Beta (%7)
Tellür-121 (^{121}Te)	19.16 gün	4.18×10^{-7}	6.24	120.92	30 (EC)	-	EC + 573 (%80.3), 507 (%17.7), 470 (%1.4)
Baryum-137m (^{137m}Ba)	2.55 dakika	4.53×10^{-3}	3.5	136.91	-	-	İzomerik geçiş, 661.7 (%90.1)
Sezyum-137 (^{137}Cs)	30.17 yıl	7.28×10^{-10}	1.93	136.91	174.0	512/1176	Beta + 661.7 (%85, Ba-137m'den)
Teknesyum-99 (^{99}Tc)	2.11×10^5 yıl	1.04×10^{-13}	11.5	98.91	85.0	293.5	Saf beta

3.1.1 Tritiyum (3H)

Tritiyumun düşük ortalama beta enerjisi (5,69 keV), nispeten düşük Bremsstrahlung üretimi ile sonuçlanır ve minimum koruma gereksinimleri sağlar. 12,32 yıllık yarı ömrü, on yıl boyunca çalışma ömrü gerektiren uygulamalar için uygundur.

Hesaplanan özgül güç (P_{β}/g) 327 mW/g ile oldukça yüksektir. Ancak, elementel sıvı tritiyumun güç yoğunluğu (P_{β}/cm^3) ($0,0876 \text{ mW}/cm^3$), düşük fiziksel yoğunluğu

nedeniyle sınırlıdır. Pratik betavoltaik cihazlarda trityum genellikle titanyum tritid (TiT_2) gibi metal hidritlere dahil edilir. TiT_2 çok daha yüksek bir fiziksel yoğunluk (yaklaşık $3,8 \text{ g/cm}^3$) sunarken, trityumun kendisi TiT_2 bileşiğinin toplam kütesinin sadece bir kısmını oluşturur (Mesela: Ti izotopu ^{48}Ti ise $TiT_{1.8}$ içinde trityum kütlece yaklaşık %3,6'dır). Bu, kaynak malzemesi daha yüksek bir fiziksel yoğunlukta tutulabilseydi saf trityumun içsel güç yoğunluğunun daha fazla olabileceği anlamına gelir.

3.1.2 Kripton-85 (^{85}Kr)

Kripton-85, orta derecede bir yarı ömre (10,75 yıl) ve kayda değer bir özgül güce (beta için 582 mW/g) sahiptir. Soy gaz olması nedeniyle, pratik betavoltaik kaynaklar için katı veya yüksek basınçlı gaz olarak muhafaza edilmesi gerekir ve bu da etkili kaynak yoğunluğunu etkiler. 514 keV 'de ($0,438\%$ yoğunluk) gama emisyonu, toplam güce küçük ama ihmal edilemeyecek bir miktar katkıda bulunur ($P_\gamma/P_\beta \approx 0,9\%$). Bu gama radyasyonu, koruma gerektirir ve hibrit enerji dönüşümü için küçük bir potansiyel sunabilir.

3.1.3 Nikel-63 (^{63}Ni)

Nikel-63, çok uzun yarı ömrü ve düşük enerjili beta emisyonları ile bilinen, uzun ömürlü betavoltaik piller için bir başka önemli adaydır.

Nikel-63, 100 yılı aşkın olağanüstü uzun bir yarı ömre sahiptir, bu da onu onlarca yıl boyunca minimum güç kaybıyla enerji gerektiren uygulamalar için ideal hale getirir. Beta enerjisi düşüktür (ortalama $17,1 \text{ keV}$), bu da koruma önlemlerini basitleştirir ve ince yarı iletken katmanlarda verimli enerji dönüşümüne yol açabilir. Nikelin yüksek element yoğunluğu, daha kısa ömürlü izotoplara kıyasla daha düşük özgül güce sahip olmasına rağmen, kayda değer bir güç yoğunluğuna katkıda bulunur. Betavoltaik araştırma ve geliştirmede yaygın olarak dikkate alınan ve kullanılan bir izotoptur.

3.1.4 Prometyum-147 (^{147}Pm)

Prometyum-147, yaygın olarak kullanılan betavoltaik izotoplar arasında nispeten daha yüksek güç yoğunluğu ile bilinir, ancak yarı ömrü Nikel-63 ve Trityum'dan daha kısadır.

Prometiyum-147, ^3H ve ^{63}Ni 'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek özgül güç (beta için 345 mW/g) ve güç yoğunluğu (beta için 2490 mW/cm³) sağlar, bu da daha yüksek güç çıkışı gerektiğinde tercih edilen bir seçenek olmasını sağlar. 2,62 yıllık yarı ömrü daha kısadır, bu da onu daha yüksek güç değeri için elverişli yapar. Ortalama beta enerjisi orta düzeydedir. Güce gama katkısı son derece küçüktür ($P_\gamma/P_\beta \approx 5 \times 10^{-5}$), bu da enerji eldesi için önemsizdir, ancak hassas elektronik cihazların korunması için küçük bir seçenek olabilir.

3.1.5 Stronsiyum-90 + Yitriyum-90 ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$)

Stronsiyum-90, yarı ömrü çok daha kısa olan bir başka beta yayıcı olan İttriyum-90'a bozunan bir beta yayıcıdır. Kapalı bir kaynakta, ^{90}Y , ^{90}Sr ile dengede olacaktır, yani aktiviteler eşit olacaktır. Toplam güç çıkışı, her iki izotopun katkılarının toplamıdır.

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ sistemi, ^{90}Y 'den gelen yüksek enerjili beta parçacıkları nedeniyle güçlü bir güç kaynağıdır. Bileşik özgül güç (3180 mW/g ^{90}Sr) ve güç yoğunluğu (13918 mW/cm³ ^{90}Sr) oldukça yüksektir. ^{90}Sr 'nin 28,91 yıllık yarı ömrü, sistemin ömrünü belirler. ^{90}Sr 'nin kendisi saf bir beta yayıcı olsa da, ^{90}Y kızımdan gelen enerjik beta parçacıkları (Q_β 2,28 MeV'ye kadar) daha önemli bir koruma gerektirir ve daha düşük enerjili yayıcılara kıyasla Bremsstrahlung üretimi potansiyelini artırır. Radyoaktif denge, ^{90}Y 'nin yüksek güç katkısının ^{90}Sr tarafından belirlenen ömür boyunca sürdürülmesini sağlar.

3.1.6 Karbon-14 (^{14}C)

Karbon-14, son derece uzun yarı ömrü ile bilinir ve bu özelliği sayesinde, çok düşük seviyelerde de olsa, binlerce yıl boyunca güç gerektiren uygulamalar için uygun bir adaydır.

Karbon-14'ün en önemli özelliği, 5730 yıllık olağanüstü uzun yarı ömrü olup, insan ömrü boyunca benzersiz bir güç çıkışı istikrarı vaat etmektedir. Ancak bu, çok düşük özgül güç (131 mW/g) ve güç yoğunluğu (2,45 mW/cm³) ile elde edilmektedir. Beta enerjisi ise düşüktür. Potansiyel bir malzeme olarak bahsedilse de, düşük güç özellikleri onu son derece düşük, ancak inanılmaz derecede uzun ömürlü güç gerektiren uygulamalarla sınırlandırır.

3.1.7 Fosfor-32 (³²P)

Fosfor-32, nispeten kısa bir yarı ömre sahip yüksek enerjili bir beta yayıcıdır.

Fosfor-32, enerjik beta emisyonları ve 14,29 gün gibi çok kısa yarı ömrü nedeniyle son derece yüksek özgül güç (1177 mW/g) ve güç yoğunluğu (2142 mW/cm³) sergiler. Ancak bu kısa yarı ömür, uzun süreli betavoltaik piller için uygulanabilirliğini ciddi şekilde sınırlandırır ve kullanımını kısa bir süre (haftalar ila aylar) için çok yüksek güç gereken uygulamalarla sınırlar. Yüksek beta enerjisi ayrıca daha fazla koruma ihtiyacı ve Bremsstrahlung potansiyeli anlamına gelir.

3.1.8 Fosfor-33 (³³P)

Fosfor-33, ³²P'den biraz daha uzun bir yarı ömre sahiptir ve daha düşük enerjili beta parçacıkları yayar.

Fosfor-33, yüksek özgül güç (71,5 mW/g) ve güç yoğunluğu (130 mW/cm³) sunar. Bu değerler ³²P'den önemli ölçüde düşüktür, ancak uzun ömürlü izotoplara kıyasla hala çok yüksektir. 25,38 günlük yarı ömrü de kısadır, bu da kullanımını kısa süreli, yüksek güçlü uygulamalarla sınırlar. Beta enerjisi orta düzeydedir.

3.1.9 Teknesyum-99 (⁹⁹Tc)

Teknesyum-99, düşük enerjili beta emisyonlarına sahip uzun ömürlü bir fisyon ürünüdür.

Teknesyum-99, son derece uzun bir yarı ömre ($2,11 \times 10^5$ yıl) sahiptir ve bu da herhangi bir zaman diliminde neredeyse sabit bir güç çıkışı sağlar. Ancak, bu uzun yarı ömür nedeniyle özgül gücü (0,00855 mW/g) ve güç yoğunluğu (0,0983 mW/cm³) çok düşüktür. Beta enerjisi nispeten düşüktür. Gama emisyonu son derece zayıftır ve güce katkısı tamamen ihmal edilebilir düzeydedir ($P_\gamma/P_\beta \approx 5 \times 10^{-6}$). Önemli bir fisyon ürünü olarak, kullanılabilirliği ve yönetimi önemli hususlardır.

3.1.10 Evropiyum-155 (¹⁵⁵Eu)

%57.2 beta, %42.8 gama, toplam 313 mW/g güç değerine sahiptir. Gama katkısı sayesinde toplam güç önemli ölçüde artmaktadır. Orta düzeyde yarı ömre sahiptir (4.76 yıl). Gama radyasyonu için ek zırlama gereksinimi vardır. Daha karmaşık dönüşüm mekanizmaları gerektirir.

3.1.11 Sezyum-137 (^{137}Cs) ve Baryum-137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$)

Cs-137: %23.6 beta, %76.4 gama (Ba-137m'den), toplam 379.6 mW/g güç değerine sahiptir. Uzun yarı ömüre sahiptir (30.17 yıl). Yüksek gama katkısı mevcuttur. Bu nedenle önemli zırlama gereksinimleri vardır. Gama enerjisini elektriğe dönüştürme verimliliği düşüktür. Radyoizotop termoelektrik jeneratörler, özel gama dönüşüm sistemlerinde kullanımı mümkündür.

3.1.12 İridyum-194 (^{194}Ir)

%94.2 beta, %5.8 gama, toplam 6236 mW/g güç değerine sahiptir. Beta için çok yüksek güç yoğunluğu (132500 mW/cm^3) değerine sahiptir. Fakat çok kısa yarı ömüre sahiptir (19.28 saat). Pratik uygulamalar için sürekli üretim gerektirir. Bu nedenle çok kısa süreli, çok yüksek güçlü özel uygulamalarda kullanılabilir.

3.1.13 Tellür-121 (^{121}Te)

%5.2 EC, %94.8 gama, toplam 1964 mW/g güç değerine sahiptir. Yüksek gama katkısı mevcuttur. Fakat kısa yarı ömüre sahiptir (19.16 gün). Ayrıca elektron yakalama bozunumu betavoltaik dönüşüm için ideal değildir. Bu nedenle gama enerjisini kullanabilen özel tasarımı sistemlerde kullanılabilir.

3.2 Tartışma

Seçilen radyoizotoplar için hesaplanan güç parametrelerinin verildiği Çizelge 3.1'deki değerlerin karşılaştırmalı bir analizi yapılarak, bunların betavoltaik uygulamalar için önemi yorumlanmıştır.

Aşağıdaki radyoizotoplar saf beta yayıcılarıdır ve güçlerinin %100'ü beta radyasyonundan gelir:

Nikel-63 (^{63}Ni)

Tritiyum (^3H) ve Titanyum Tritür (TiT_2)

Karbon-14 (^{14}C)

Kükürt-35 (^{35}S)

Kalsiyum-45 (^{45}Ca)

Fosfor-32 (^{32}P)

Fosfor-33 (^{33}P)

Teknesyum-99 (^{99}Tc)

Bu izotoplar, betavoltaik tasarımlar için ideal adaylardır çünkü ek gama zırlaması gerektirmezler ve dönüşüm mekanizmaları daha basittir.

Aşağıdaki izotoplar, toplam güçlerinin %5'inden azı gama radyasyonundan gelen izotoplardır:

Prometyum-147 (¹⁴⁷Pm):

Beta: 345 mW/g (%99.5)

Gama: 1.88 mW/g (%0.5)

Toplam: 346.88 mW/g

Yitriyum-90 (⁹⁰Y):

Beta: 3018 mW/g (%99.98)

Gama: 0.551 mW/g (%0.02)

Toplam: 3018.55 mW/g

Kripton-85 (⁸⁵Kr):

Beta: 582 mW/g (%99.1)

Gama: 5.14 mW/g (%0.9)

Toplam: 587.14 mW/g

Samaryum-151 (¹⁵¹Sm):

Beta: 3.11 mW/g (%99.96)

Gama: 0.00134 mW/g (%0.04)

Toplam: 3.11134 mW/g

Tulyum-171 (¹⁷¹Tm):

Beta: 178 mW/g (%99.7)

Gama: 0.524 mW/g (%0.3)

Toplam: 178.52 mW/g

Bu izotoplar için, gama katkısı ihmal edilebilir düzeydedir ve pratik uygulamalarda genellikle dikkate alınmaz.

Aşağıdaki izotoplar, toplam güçlerinin önemli bir kısmı gama radyasyonundan gelen izotoplardır:

Evropiyum-155 (¹⁵⁵Eu):

Beta: 179 mW/g (%57.2)

Gama: 134 mW/g (%42.8)

Toplam: 313 mW/g

İridyum-194 (¹⁹⁴Ir):

Beta: 5874 mW/g (%94.2)

Gama: 362 mW/g (%5.8)

Toplam: 6236 mW/g

Sezyum-137 (¹³⁷Cs):

Beta: 89.6 mW/g (%23.6)

Gama: 290 mW/g (%76.4) (^{137m}Ba'dan)

Toplam: 379.6 mW/g

Tellür-121 (¹²¹Te):

EC: 102 mW/g (%5.2)

Gama: 1862 mW/g (%94.8)

Toplam: 1964 mW/g

Bu izotoplar için, gama radyasyonunun kullanılması toplam güç çıkışını önemli ölçüde artırabilir.

Özel Durumlar:

Stronsiyum-90 (⁹⁰Sr) / Yitriyum-90 (⁹⁰Y) Çifti: Sr-90 saf beta yayıcıdır, ancak kızı Y-90 ile seküler dengede bulunur. Y-90'ın yüksek enerjili beta emisyonu, toplam güç çıkışının büyük kısmını oluşturur.

Sezyum-137 (¹³⁷Cs) / Baryum-137m (^{137m}Ba) Çifti: Cs-137 beta bozunumu geçirir ve kızı Ba-137m'yi üretir. Ba-137m'nin izomerik geçişi, 661.7 keV'lik güçlü gama ışını yayar. Toplam güç çıkışının çoğu bu gama emisyonundan gelir.

Polonyum-210 (²¹⁰Po) ve Aynştaynyum-254 (²⁵⁴Es): Bunlar ağırlıklı olarak alfa yayıcılarıdır ve betavoltaik pillerden ziyade alfa-voltaik veya radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTG) için daha uygundur.

3.2.1 Gama radyasyonunun toplam güç çıkışına etkisi

Seçilen izotopların çoğu için, gama emisyonlarının güç katkısı (P_γ) beta emisyonlarının güç katkısına (P_β) kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir.

³H, ⁶³Ni, ¹⁴C, ³²P ve ³³P saf beta yayıcılarıdır, bu nedenle P_γ değerleri sıfırdır. ⁹⁰Sr'nin ⁹⁰Y'ye bozunması da saf beta bozunmasıdır ve ardından gelen ⁹⁰Y bozunması, güç açısından ihmal edilebilir derecede zayıf gama emisyonlarına sahiptir.

¹⁴⁷Pm: Gama gücü, beta gücüne ($P_{\beta}/g=345$ mW/g) kıyasla son derece düşüktür ($P_{\gamma}/g=1,88$ mW/g). P_{γ}/P_{β} oranı yaklaşık $5,4 \times 10^{-4}$ olup, bu da ¹⁴⁷Pm için gama enerjisi eldesinin pratik bir seçenek olmadığını doğrulamaktadır.

⁹⁹Tc: Benzer şekilde, gama gücü beta gücüne ($P_{\beta}/g=0,00855$ mW/g) kıyasla son derece düşüktür ($P_{\gamma}/g=5,26 \times 10^{-11}$ W/g). P_{γ}/P_{β} oranı yaklaşık $5,5 \times 10^{-6}$ olup, gama çıkışı güç açısından önemsizdir.

⁸⁵Kr: Bu, listede gama emisyonunun biraz daha belirgin, ancak yine de küçük bir katkı sağladığı tek izotoptur. Beta özgül gücü 582 mW/g, gama özgül gücü ise 5,14 mW/g'dir. P_{γ}/P_{β} oranı yaklaşık 0,00883 veya yaklaşık %0,9'dur. Küçük olmasına rağmen, bu gama bileşeni (514 keV) enerjisi, enerjisi toplanıp toplanmadığına bakılmaksızın birçok uygulamada koruma gerektirecek kadar yüksektir. Bu gama enerjisini dönüştürmeye çalışmak, marjinal bir güç kazancı için betavoltaik cihaz tasarımına karmaşıklık katacaktır.

Önemli gama katkısı olan radyoizotoplar için (özellikle Evropiyum-155, Sezyum-137 ve Tellür-121), hem beta hem de gama radyasyonunun kullanılması toplam güç çıkışını önemli ölçüde artırabilir:

Evropiyum-155 için, gama enerjisinin yakalanması toplam güç çıkışını %42.8 artırabilir.

Sezyum-137 için, gama katkısı toplam gücün %76.4'ünü oluşturur.

Bozunma enerjisinin daha eksiksiz kullanımı, pilin etkin ömrünü uzatabilir.

Radyoizotop birim hacmi başına daha fazla enerji çıkarılır.

Geleneksel betavoltaik tasarımlarda, sadece beta radyasyonu güç üretimi için kullanılır ve gama radyasyonu genellikle bir sorun olarak görülür. Beta-only kullanımının avantajları şunlardır:

Beta parçacıkları doğrudan yarıiletkenlerde elektron-boşluk çiftleri oluşturabilir.

Saf beta yayıcılar minimal zırhlama gerektirir.

Beta parçacıkları, gama ışınlarına kıyasla yarıiletken malzemelere daha az radyasyon hasarı verir.

Beta enerjisinin elektriğe doğrudan dönüşümü, genellikle gama dönüşümünden daha verimlidir.

Seçilen izotopların güç hesaplamalarından elde edilen sonuca göre betavoltaik için dikkate alınan izotopların büyük çoğunluğu için, yalnızca beta parçacık enerjisinin dönüştürüldüğü varsayımı geçerli ve uygun görülmektedir. İlgili gama ışınlarının

öncelikli önemi, sistem açısından cihazın genel özgül gücü ve güç yoğunluğunu etkileyebilecek ek koruma ihtiyacından kaynaklanmaktadır.

3.2.2 Uygulama alanlarına göre optimal izotop seçimi

3.2.2.1 Saf beta kullanımı

Geleneksel betavoltaik tasarımlar için, sadece beta radyasyonunu kullanan optimal radyoizotoplar şunlardır:

Nikel-63 (⁶³Ni): 100.1 yıllık yarı ömrü ve düşük enerjili beta emisyonu nedeniyle uzun vadeli, düşük güçlü uygulamalar için idealdir (minimal yarıiletken hasarı).

Tritiyum (³H) (titanyum tritür olarak): Orta vadeli uygulamalar için daha yüksek güç yoğunluğu gereksinimleri ile iyi bir seçenektir.

Prometyum-147 (¹⁴⁷Pm): Kısa vadeli, yüksek güçlü uygulamalar için yüksek güç yoğunluğu nedeniyle mükemmeldir.

Fosfor-32 (³²P): Çok kısa süreli, yüksek güçlü uygulamalar için uygundur.

3.2.2.2 Beta ve gama birlikte kullanımı

Çizelge 3.3 Beta radyasyonuna ek olarak gama radyasyonunun kullanılmasından kaynaklanan potansiyel güç kazancı

Radyoizotop	Beta'dan Güç (mW/g)	Gama'dan Güç (mW/g)	Toplam Güç (mW/g)	Gama'dan Yüzde Kazanç
Evropiyum-155	179	134	313	%74.9
Sezyum-137	89.6	290	379.6	%323.7
Tellür-121	102	1862	1964	%1825.5
İridyum-194	5874	362	6236	%6.2
Tulyum-171	178	0.524	178.52	%0.3
Prometyum-147	345	1.88	346.88	%0.5
Kripton-85	582	5.14	587.14	%0.9
Yitrium-90	3018	0.551	3018.55	%0.02
Samaryum-151	3.11	0.00134	3.11134	%0.04

Hem beta hem de gama radyasyonunun kullanılacağı durumlarda, en umut verici adaylar şunlardır:

Evropiyum-155 (¹⁵⁵Eu): Gücünün %42.8'i gama radyasyonundan geldiği için, gama kullanımından en önemli potansiyel kazancı sunar.

Sezyum-137 (¹³⁷Cs): Gücünün %76.4'ü gama radyasyonundan (Ba-137m üzerinden) gelir, bu da gama enerjisini kullanabilen sistemler için önemli bir avantaj sağlar.

Tellür-121 (¹²¹Te): Gücünün %94.8'i gama radyasyonundan gelir, ancak kısa yarı ömrü pratik uygulamaları sınırlar.

Beta radyasyonuna ek olarak gama radyasyonunun kullanılmasından kaynaklanan potansiyel güç kazancı, radyoizotoplar arasında önemli ölçüde değişir.

3.2.2.3 Kriterlerin uyumunda dikkate alınması gerekenler

Yarı ömür ve güç: Yarı ömür ile özgül güç/güç yoğunluğu arasında açık bir ters ilişki vardır. ³²P gibi kısa ömürlü izotoplar çok büyük güç sağlar, ancak bu güç çok sınırlı bir süre için geçerlidir. ⁶³Ni, ¹⁴C ve ⁹⁹Tc gibi uzun ömürlü izotoplar, çok daha düşük seviyelerde olmakla birlikte, son derece kararlı ve uzun vadeli güç sağlar. ⁹⁰Sr/⁹⁰Y, ³H, ¹⁴⁷Pm ve ⁸⁵Kr gibi izotoplar, orta ila uzun yarı ömürler ve orta ila yüksek güç çıkışları ile bir denge sunar.

Beta Enerjisi (\bar{E}_β): Daha yüksek ortalama beta enerjisi genellikle bozunma başına daha yüksek güç çıkışı (ve dolayısıyla daha yüksek W/Ci) sağlar. Ancak, çok yüksek enerjili betalar (örneğin, ⁹⁰Y, ³²P'den) daha delici olduğundan, tam enerji birikimi için daha kalın yarıiletken aktif bölgeler ve daha sağlam koruma gerektirir. Ayrıca, Bremsstrahlung üretimi için daha yüksek eğilime sahiptirler. Daha düşük enerjili betalar (örneğin, ³H, ⁶³Ni, ¹⁴C) ince film yarı iletken cihazlarda daha verimli bir şekilde dönüştürülebilir ve minimum Bremsstrahlung'a sahiptir, ancak bozunma başına daha az güç üretir.

Malzeme Formu ve Yoğunluğu: Gaz halindeki izotoplar (³H, ⁸⁵Kr) için, yoğunlaştırılmış element formu kullanılarak hesaplanan içsel güç yoğunluğu teorik bir üst sınırdır. Pratik kaynaklar genellikle katı matrislere dahil edilmeyi içerir (örneğin, trityum için TiT₂, kripton için klatratlar veya adsorbe formlar). Bu, tipik olarak kaynak malzemenin birim hacmi başına radyoizotopun etkili konsantrasyonunu azaltır ve burada hesaplanan elementel güç yoğunluğundan daha düşük bir cihaz güç yoğunluğuna yol açar. Tablo 1'de ³H ve ⁸⁵Kr için verilen değerler yoğunlaştırılmış faz yoğunluklarını

kullanılmaktadır; pratik cihaz güç yoğunlukları taşıyıcı malzemelerdeki seyrelme veya ideal olmayan paketleme nedeniyle daha düşük olacaktır.

Betavoltaik uygulama için en uygun radyoizotopun seçimi, tek bir parametreye değil, çok değişkenli bir optimizasyona dayanmaktadır. Tablo 3.1'deki hesaplama verileri temel güç özelliklerini ifade eder. Ancak, betavoltaik izotoplar için belirlenecek bir performans faktörü'ünde ideal olarak güç yoğunluğu (W/cm^3), yarı ömür (ömür) ve beta enerjisiyle ilgili bir faktörü olan kendi kendine emilimi faktörü de dikkate alınmalıdır. Örneğin, W/cm^3 değeri son derece yüksek ancak yarı ömrü sadece birkaç gün olan bir izotop (^{32}P gibi), çoğu uzun ömürlü pil uygulaması için uygun olmayacaktır. Tersine, yarı ömrü çok uzun ancak W/cm^3 değeri son derece düşük olan bir izotop (^{14}C gibi), yalnızca çok özel, ultra düşük güç, binlerce yıllık uygulamalar için uygun olabilir.

Hesaplanan güç yoğunluklarının (W/cm^3), yayılan beta/gama enerjisinin %100'ünün katkıda bulunduğu varsayımıyla, saf radyoizotop yakıtın hacmi içinde üretilen gücü temsil etmektedir. Gerçek betavoltaik cihaz güç yoğunluğu her zaman daha düşük olacaktır. Bu azalma, bu içsel hesaplamalarda dikkate alınmayan birkaç faktöre bağlıdır:

Yarı İletken Dönüşüm Verimliliği: Yarı iletkenin biriken beta (veya gama) enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimliliği tipik olarak %100'ün çok altındadır. Mevcut cihazlar genellikle yüzde birkaç ile potansiyel olarak %10'un üzerinde verimlilik aralığına sahiptir.

Doldurma Faktörü: Radyoaktif malzeme nadiren cihazın tüm hacmini kaplar. Yarı iletken, kontaklar, kapsülleme ve gerekli kalkanlar da yer kaplar.

Kendi Kendine Emilim: Daha kalın bir radyoaktif kaynağın derinliklerinden yayılan beta parçacıkları, yarı iletken bağlantı noktasına ulaşmadan önce enerjilerinin önemli bir kısmını kaynak malzemenin içinde kaybedebilir (veya tamamen durdurulabilir). Bu durum özellikle düşük enerjili beta yayıcılar veya çok yoğun kaynak malzemeler için sorun teşkil eder.

Diğer Kayıplar: Beta parçacıklarının yarı iletken veya alt tabakadan geri saçılması ve üretilen elektron deliği çiftlerinin ideal olmayan şekilde toplanması yoluyla enerji kayıpları da nihai çıkış gücünün azaltılmasına katkıda bulunur.

Bu nedenle, bu tezde hesaplanan güç değerleri, betavoltaik cihazların tasarımında ve cihaza özgü verimlilik hesaplarında temel bir başlangıç noktasıdır.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Önemli sonuçların özeti

Bu tez, betavoltaik teknolojiyle ilgili çeşitli beta yayan radyoizotopların enerji üretim potansiyelinin analizini yapmıştır. Yerleşik nükleer verilere ve fiziksel ilkelere dayanan hesaplamalar, geniş bir güç özellikleri yelpazesini ortaya koymaktadır.

Betavoltaik nükleer pillerde radyoizotopların beta ve gama radyasyonu katkılarının karşılaştırmalı analizi şu sonuçları ortaya koymaktadır:

Çoğu radyoizotop için, gama radyasyonu toplam güç çıkışına %1'den az katkıda bulunur, bu da sadece beta kullanımını en pratik yaklaşım haline getirir.

Evropiyum-155, Sezyum-137 ve Tellür-121, gama kullanımının güç çıkışını önemli ölçüde artırabileceği tek radyoizotoplardır, potansiyel olarak çift dönüşüm sisteminin ek karmaşıklığını haklı çıkarabilir.

Optimal radyoizotop ve dönüşüm mekanizması seçimi, güç yoğunluğu, uzun ömürlülük, karmaşıklık ve radyasyon güvenliği gibi faktörleri dengeleyen spesifik uygulama gereksinimlerine dayanmalıdır.

Çoğu pratik uygulama için, saf beta yayıcılar (Nikel-63, Tritiyum, Karbon-14) veya minimal gama katkısı olan ağırlıklı beta yayıcılar (Prometyum-147) betavoltaik nükleer piller için en uygun seçimler olmaya devam etmektedir.

Gelecekteki araştırmalar, daha geniş bir radyoizotop yelpazesi için kombine beta-gama kullanımını daha pratik hale getirmek için daha verimli gama dönüşüm mekanizmaları geliştirmeye odaklanabilir.

4.2 Betavoltaik pil tasarımı ve izotop seçimi için öneriler

Bulgular, bir betavoltaik pil için radyoizotop seçiminin, büyük ölçüde özel uygulama gereksinimlerine bağlı olan karmaşık bir optimizasyon sorunu olduğunu altını çizmektedir. Tek bir en uygun izotop yoktur; bunun yerine, seçimlerde aşağıdaki faktörlerin dengelenmesini gerektirir:

Güç ve Ömür: Yüksek güçlü izotoplar (örneğin, ^{32}P , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{147}Pm) genellikle daha kısa yarı ömre sahipken, uzun ömürlü izotoplar (örneğin, ^{63}Ni , ^{14}C , ^{99}Tc) daha düşük güç seviyeleri sağlar.

Radyasyon Türü ve Enerji: Beta parçacıklarının enerjisi, penetrasyon derinliğini, yarı iletken dönüşüm verimliliğini ve koruma gereksinimlerini etkiler. Saf

beta yayıcılar, önemli gama bileşenlerine sahip olanlara kıyasla cihaz tasarımını basitleştirir.

Malzeme Özellikleri: Radyoizotopun yoğunluğu (ve pratik kaynak formu) hacimsel güç yoğunluğunu doğrudan etkiler. Kullanılabilirlik, maliyet, kimyasal kararlılık ve kullanım kolaylığı da bu teorik güç analizinde ele alınmayan önemli pratik hususlardır.

Bu tezde hesaplanan güç değerleri, betavoltaik kaynak geliştirme ve cihaz mühendisliğinin ilk aşamaları için temel verilerdir. Tasarım aşamasında, yakıttan elde edilebilecek maksimum teorik gücü tahmin edilebilir. Bu değer, yarı iletken dönüşüm verimlilikleri ve diğer cihaza özgü kayıp faktörleri ile indirgenerek gerçek pil performansını tahmin etmek için kullanılabilir.

Gelecekteki araştırmalar, nükleer verilerin daha ayrıntılı bir şekilde tanımlandıkça edildikçe, potansiyel olarak diğer beta yayıcıları da içerecek şekilde genişletebilir. Ayrıca, belki de çok aşamalı dönüşüm veya yeni malzeme entegrasyonu yoluyla, ilişkili Bremsstrahlung veya düşük yoğunluklu gama radyasyonunu daha etkili bir şekilde kullanabilecek yenilikçi cihaz mimarileri, radyoizotop kaynaklarından elde edilen toplam enerjiyi iyileştirmek için yeni yöntemler bulunabilir, ancak bu tür yaklaşımlar betavoltaiklerin nispeten basit doğrudan dönüşüm ilkesine önemli ölçüde karmaşıklık katacaktır.

4.3 Geleceğe Yönelik Beklentiler

4.3.1 Yeni kaynak materyaller ve formlar

Kendi kendine emilimi azaltmak için daha düşük yoğunluklu trityum depolama ortamlarının (örneğin LiT, gelişmiş hidritler) araştırılmasına devam edilmektedir (Cheu ve ark., 2024). İçsel kaynakların (trityumlanmış perovskitler, ^{14}C elmas) daha da geliştirilmesi, malzeme stabilitesi ve izotop yükleme zorluklarının üstesinden gelenebilirse önemli verimlilik artışları için potansiyel taşımaktadır (Maier ve ark., 2025). Sıvı radyoizotop kaynaklarının araştırılması radyasyon hasarına karşı yeni çözümler sağlayabilir, ancak muhafaza zorlukları aşılamamıştır.

4.3.2 Sürdürülebilir izotop tedarigi

Nükleer atık akışlarından ^{14}C gibi izotopları ayırmak ve kullanmak için verimli ve uygun maliyetli yöntemler geliştirmek, ultra uzun ömürlü piller için sürdürülebilir bir

kaynak sağlayabilir ve aynı zamanda atık yönetimi endişelerini giderebilir (Rosatom, 2016).

4.3.3 Gelişmiş imalat ve entegrasyon

Beta yakalama verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için 3D mimarileri (nanoteller, gözenekli malzemeler) optimize etmek (Alam ve ark., 2018). Daha iyi homojenlik, yapışma ve optimum kalınlık üzerinde kontrol için ince film biriktirme tekniklerinin geliştirilmesi (Uhm ve ark., 2016). Sağlam, hafif ve etkili kapsülleme malzemeleri ve tekniklerinin geliştirilmesi.

4.3.4 Gelişmiş yarı iletkenler

Optimize edilmiş kaynakları yüksek verimli, radyasyona dayanıklı geniş bant aralıklı yarı iletkenlerle (Elmas, SiC, GaN, potansiyel olarak Ga₂O₃, AlN, BN) eşleştirmek, genel cihaz performansını en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir (Alam ve ark., 2018).

4.3.5 Geliştirilmiş modelleme ve karakterizasyon

Kaynak davranışını, bozunma mekanizmalarını ve kaynak-yarı iletken etkileşimlerini daha iyi anlamak için gelişmiş simülasyon ve daha hassas karakterizasyon teknikleri geliştirmek (Alam ve ark., 2018).

4.3.6 Uygulamalardaki engellerin organizasyonu

Üretim maliyetlerini azaltmaya, düzenleyici yolları kolaylaştırmaya ve güvenli kullanım, taşıma ve kullanım ömrü sonu yönetimi için net protokoller oluşturmaya odaklanmaya devam etmek, daha geniş kabul ve dağıtım için gerekli olacaktır.

Sonuç olarak, radyoaktif kaynaklar betavoltaik pillerin belirleyici bileşeni olmaya devam etmektedir. Mevcut kaynaklar benzersiz uzun ömürlü, düşük güçlü uygulamalar sağlarken, verimlilik ve güç yoğunluğundaki kalıcı sınırlamaların üstesinden gelmek için önemli atılımlara ihtiyaç vardır.

Gelecekteki ilerleme, yeni kaynak malzemeler geliştirmeyi, üretim ve entegrasyon tekniklerini optimize etmeyi ve betavoltaik enerji dönüşümünün tam potansiyelini ortaya çıkarmak için nükleer bilim, malzeme mühendisliği, yarı iletken fiziği ve ileri imalat tekniklerini kapsayan çok disiplinli araştırmaların devam etmesine bağlıdır.

KAYNAKLAR

- Adams, T., Revankar, S. 2015. Research, development and evaluation capabilities for betavoltaic power sources, *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 122.
- Adams, T.E., Cheu, D.S., Cabauy, P., Revankar, S.T., Pol, V.G., 2023, High-Energy Dense Power Sources for Low-Power Operation in Extreme Temperature Environments, *49th Power Sources Conference*.
- Akimchenko, A., Chepurnov, V., Dolgopopov, M., Gurskaya, A., Kuznetsov, O., Mashnin, A., Radenko, V., Radenko, A., Surnin, O., Zanin, G. 2017. Betavoltaic device in por-SiC/Si C-Nuclear Energy Converter, *EPJ Web Conf.*, 158, 06004.
- Alam, T., Spencer, M., Prelas, M., Pierson, M. 2018. Design and optimization of radioisotope sources for betavoltaic batteries, *International Journal of Energy Research*, 42.
- Bao, R., Brand, P., Chrisey, D. 2012. Betavoltaic Performance of Radiation-Hardened High-Efficiency Si Space Solar Cells, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59, 1286-1294.
- Bé, M.-M., Chisté, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V., Kuzmenko, N., Helmer, R., Nichols, A., Schönfeld, E., Dersch, R., 2004, *Table of radionuclides* (Vol. 1 - A = 1 to 150),
- Bhattacharya, P., 1997, *Semiconductor optoelectronic devices*, *Prentice-Hall, Inc.*,
- Bormashov, V.S., Troschiev, S.Y., Tarelkin, S.A., Volkov, A.P., Teteruk, D.V., Golovanov, A.V., Kuznetsov, M.S., Kornilov, N.V., Terentiev, S.A., Blank, V.D. 2018. High power density nuclear battery prototype based on diamond Schottky diodes, *Diamond and Related Materials*, 84, 41-47.
- Broderick, K., Lusk, R., Hinderer, J., Griswold, J., Boll, R., Garland, M., Heilbronn, L., Mirzadeh, S. 2019. Reactor production of promethium-147, *Applied Radiation and Isotopes*, 144, 54-63.
- Cabauy, P., Olsen, L., Adams, T., 2010, *Micropower Betavoltaic Hybrid Sources*,
- Cheu, D., Adams, T., Revankar, S., Pol, V. 2024. Evaluation of lithium as a tritium storage medium for betavoltaics, *Journal of Applied Physics*, 135 (2).
- Colozza, A.J., Cataldo, R.L., 2018, *Low Power Radioisotope Conversion Technology and Performance Summary*.
- Davis, C. 2017. A theoretical model of a Sr-90 nuclear battery, *McMaster Journal of Engineering Physics*, 1 (1).
- De Souza, C.D., Kim, J.B., Kim, J.J., Ji, W., Son, K.J., Hong, J.T., 2021, Promethium-147 betavoltaic battery model to power micro sensors, *Korean Nuclear Society Autumn Meeting*.

- Dixon, J., Rajan, A., Bohlemann, S., Coso, D., Upadhyaya, A.D., Rohatgi, A., Chu, S., Majumdar, A., Yee, S. 2016. Evaluation of a Silicon (90)Sr Betavoltaic Power Source, *Sci Rep*, 6, 38182.
- Ehrenberg, W., Chi-Shi, L., West, R. 1951. The Electron Voltaic Effect, *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 64 (4), 424.
- Flicker, H., Loferski, J., Elleman, T. 1964. Construction of a promethium-147 atomic battery, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 11 (1), 2-8.
- Ghasemabadi, D., H., Z.D., and Abdollahzadeh, M. 2025. Investigation and Analysis of Beta Radioisotopes for Optimal Use in Betavoltaic Batteries, *Nuclear Science and Engineering*, 199 (3), 476-489.
- Hinderer, J.H. 2010. Radioisotopic impurities in promethium-147 produced at the ORNL high flux isotope reactor.
- Hwang, Y., Park, Y., Kim, H., Kim, D., Ali, S., Sorcar, S., Flores, M., Hoffmann, M., In, S.-i. 2020. C-14 Powered Dye-Sensitized Betavoltaic Cells, *Chemical Communications*, 56.
- In, S. 2020. (Invited) C-14 Powered Dye-Sensitized Betavoltaic Cells: Next Generation Battery, *ECS Meeting Abstracts*, MA2020-02, 226-226.
- Kim, J.J., Choi, S.M., Son, K.J., Hong, J., Choi, B.G., 2017, Performance evaluation of Ni-63 betavoltaic battery, *2017 Spring Meeting of the KNS*, Korea, Republic of, KNS, [2 p.].
- Kima, J.J., Uhma, Y.R., Kima, J.B., Choi, S.M., Son, K.J., Hong, J., Park, J.H. 2016. The process of Ni-63 production and measurement of beta radiation of irradiated Ni-63, *Environments*, 1 (2), 3.
- Krasnov, A.A., Legotin, S.A. 2020. Advances in the Development of Betavoltaic Power Sources (A Review), *Instruments and Experimental Techniques*, 63 (4), 437-452.
- Kuznetsov, R., Bobrovskaya, K., Belobrov, I., Tikhonchev, M., Novikov, S., Zhukov, A. 2022. Nickel-63 Beta Radiation Sources for Betavoltaic Application: Methodological Aspects of Fabrication Technology, *Radiochemistry*, 64, 367-374.
- Li, X., Lu, J., Chen, Z., Liu, X., Liu, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Tian, F. 2023. 14C diamond as energy converting material in betavoltaic battery: A first principles study, *AIP Advances*, 13.
- Linder, E.G., Rappaport, P., Loferski, J.J., 1956, The Direct Conversion of Radiation into Electrical Energy, *International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 283-289.
- Litz, M., Tompkins, R., Russo, J., Pullen, C. Isotope Energy Release and Deposition Characteristics in Betavoltaic Materials.

- Maier, A., Lopez, J., Giglio, D., Pan, L., Hlinka, V., Co, A., Cao, L. 2025. Tritiated Perovskites: Experimental Insights for Tritium Betavoltaic Batteries, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, PP, 1-1.
- Manasse, F., Pinajian, J., Tse, A. 1976. Schottky barrier betavoltaic battery, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 23 (1), 860-870.
- Moseley, H.G. 1913. The attainment of high potentials by the use of radium, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88 (605), 471-476.
- Olsen, L., Seeman, S., Griffin, B., 1969, Betavoltaic Nuclear Electric Power Sources. *McDonnell Douglas Corp., Richland, Wash.*
- Olsen, L.C., 1993, Review of betavoltaic energy conversion, *12th Space Photovoltaic Research and Technology Conference (SPRAT 12)*, May 01, 1993, Lewis Research Center, 256-267.
- Olsen, L.C. 1973. Betavoltaic energy conversion, *Energy Conversion*, 13 (4), 117-127.
- Olsen, L.C., Cabauy, P., Elkind, B.J. 2012. Betavoltaic power sources, *Physics Today*, 65 (12), 35-38.
- Pfann, W., Van Roosbroeck, W. 1954. Radioactive and photoelectric p-n junction power sources, *Journal of Applied Physics*, 25 (11), 1422-1434.
- Prelas, M., Boraas, M., De La Torre Aguilar, F., Seelig, J.-D., Tchakoua Tchouaso, M., Wisniewski, D., Prelas, M., Boraas, M., De La Torre Aguilar, F., Seelig, J.-D., 2016, Introduction to nuclear batteries and radioisotopes, *Springer*,
- Rappaport, P. 1956. Radioactive battery employing intrinsic semiconductor. *in: United States Patent Office*, Vol. US2745973A. United States.
- Rappaport, P. 1954. The Electron-Voltaic Effect in p-n Junctions Induced by Beta-Particle Bombardment, *Physical Review*, 93 (1), 246-247.
- Revankar, S.T., Adams, T.E. 2014. Advances in betavoltaic power sources, *J. Energy Power Sources*, 1 (6), 321-329.
- Review—Betavoltaic Cell: The Past, Present, and Future, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10 (2), 027005.
- Rosatom, 2016, Nuclear energy encapsulated, <https://rosatomnewsletter.com/2016/04/08/nuclear-energy-encapsulated> (Erişim Tarihi: 10.04.2025).
- Schwarze, G.E., Frasca, A.J., 1990, Neutron And Gamma Irradiation Effects On Power Semiconductor Switches, *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 12-17 Aug. 1990, 30-35.
- Searle, A. 1980. Tritium and Other Radionuclide Labeled Organic Compounds Incorporated in Genetic Material, *Taylor & Francis*.

- Spencer, M.G., Alam, T. 2019. High power direct energy conversion by nuclear batteries, *Applied Physics Reviews*, 6 (3).
- Sun, W., Kherani, N.P., Hirschman, K.D., Gadeken, L.L., Fauchet, P.M. 2005. A Three-Dimensional Porous Silicon p-n Diode for Betavoltaics and Photovoltaics, *Advanced Materials*, 17 (10), 1230-1233.
- Suzuki, F.F., Mitake, M.B., Santos Lima, R.d., Kodama, Y., Sociedad Argentina de Radioproteccion, S., Association, I.R.P., Organization, W.H., 2008, Considerations in the leakage test on sealed radioactive sources. *International Radiation Protection Association (IRPA), Fontenay-aux-Roses ...*
- Uhm, Y., Choi, B., Kim, J., Jeong, D.-H., Son, K. 2016. Study of a Betavoltaic Battery Using Electroplated Nickel-63 on Nickel Foil as a Power Source, *Nuclear Engineering and Technology*, 48.
- Walsh, S.R. 2013. The Effect of Pellet Geometry on The Specific Activity of Ni-63.
- Wang, Y., Weng, G.-M. 2025. Nuclear batteries: Potential, challenges and the future, *The Innovation Energy*, 2 (2), 100079.
- Zanzonico, P., Strauss, H.W. 2021. Handling Radionuclides and Radiation Safety, *Atlas of Nuclear Cardiology*, 67-78.
- Zhou, C., Zhang, J., Wang, X., Yang, Y., Xu, P., Li, P., Zhang, L., Chen, Z., Feng, H., Wu, W. 2021.

EKLER

C BETAVOLTAİK NÜKLEER PİLLER İÇİN GÜÇ HESAPLAMA PROGRAMI

C Bu program, çeşitli radyoizotoplar için beta ve gama radyasyonundan

C kaynaklanan güç değerlerini hesaplar.

C Giriş dosyası: "Nükleer veriler.dat"

C Çıkış dosyası: "Sonuçlar.dat"

C

PROGRAM GUCHESAPLAMA

IMPLICIT NONE

C Değişken tanımlamaları

INTEGER MAXIZOTOP, I, ATOMNO, KUTLENO

PARAMETER (MAXIZOTOP = 50)

REAL*8 YARIOMUR, BOZUNMASABITI, YOGUNLUK, MOLARKUTLE

REAL*8 ORTBETAENERJI, MAKSIBETAENERJI, GAMAENERJI,

GAMAOLASILIK

REAL*8 SPESIFIK_AKTIVITE, GUCWATTCURIE, GUCWATTGRAM

REAL*8 GUCWATTCM3, GAMAGUCWATTCURIE,

GAMAGUCWATTGRAM

REAL*8 GAMAGUCWATTCM3

CHARACTER*30 IZOTOPAD

C Dosya tanımlamaları

INTEGER INUNIT, OUTUNIT

PARAMETER (INUNIT = 10, OUTUNIT = 20)

CHARACTER*30 INFILE, OUTFILE

PARAMETER (INFILE = 'Nükleer veriler.dat')

PARAMETER (OUTFILE = 'Sonuçlar.dat')

C Sabitler

REAL*8 GUCFAKTOR

PARAMETER (GUCFAKTOR = 5.92D-6) ! 5.92 μ W/Ci/keV -> W/Ci/keV

dönüşümü

C Dosyaları aç

```
OPEN(UNIT=INUNIT, FILE=INFILE, STATUS='OLD', ERR=900)
```

```
OPEN(UNIT=OUTUNIT, FILE=OUTFILE, STATUS='UNKNOWN', ERR=910)
```

C Çıktı dosyasına başlık yaz

```
WRITE(OUTUNIT, 100)
```

```
100 FORMAT('BETAVOLTAİK NÜKLEER PİLLER İÇİN GÜÇ HESAPLAMA  
SONUÇLARI',
```

```
& /,/,
```

```
& 'İzotop Adı', T25, 'Güç/Curie (W/Ci)', T50,
```

```
& 'Güç/Kütle (W/g)', T75, 'Güç Yoğunluğu (W/cm³)',/,
```

```
& T25, 'Beta', T35, 'Gama', T50, 'Beta', T60, 'Gama',
```

```
& T75, 'Beta', T85, 'Gama',/,
```

```
& '-----',
```

```
& '-----')
```

C Giriş dosyasından verileri oku ve hesapla

```
DO I = 1, MAXIZOTOP
```

C Dosya sonunu kontrol et

```
READ(INUNIT, *, END=800, ERR=920) IZOTOPAD, ATOMNO, KUTLENO,
```

```
& YARIOMUR, BOZUNMASABITI, YOGUNLUK, MOLARKUTLE,
```

```
& ORTBETAENERJI, MAKSIBETAENERJI, GAMAENERJI,
```

GAMAOLASILIK,

```
& SPESIFIK_AKTIVITE
```

C Beta radyasyonu için güç hesaplamaları

```
GUCWATTCURIE = GUCFAKTOR * ORTBETAENERJI
```

```
GUCWATTGRAM = GUCWATTCURIE * SPESIFIK_AKTIVITE
```

```
GUCWATTCM3 = GUCWATTGRAM * YOGUNLUK
```

C Gama radyasyonu için güç hesaplamaları

```
GAMAGUCWATTCURIE=GUCFAKTOR*GAMAENERJI * GAMAOLASILIK
```

GAMAGUCWATTGRAM= GAMAGUCWATTCURIE * SPESIFIK_AKTIVITE
 GAMAGUCWATTCM3 = GAMAGUCWATTGRAM * YOGUNLUK

C Sonuçları çıktı dosyasına yaz

```
WRITE(OUTUNIT, 200) IZOTOPAD, GUCWATTCURIE,
GAMAGUCWATTCURIE,
& GUCWATTGRAM, GAMAGUCWATTGRAM, GUCWATTCM3,
GAMAGUCWATTCM3
```

```
200 FORMAT(A24, 2(1PE10.3), 2X, 2(1PE10.3), 2X, 2(1PE10.3))
```

```
END DO
```

C Normal program sonu

```
800 CONTINUE
```

```
WRITE(OUTUNIT, 300)
```

```
300 FORMAT(/, 'Hesaplamalar başarıyla tamamlandı.', /,
```

```
& 'Not: Güç değerleri Watt birimindedir.')
```

```
CLOSE(INUNIT)
```

```
CLOSE(OUTUNIT)
```

```
WRITE(*, *) 'Hesaplamalar başarıyla tamamlandı.'
```

```
WRITE(*, *) 'Sonuçlar "', OUTFILE, '" dosyasına kaydedildi.'
```

```
STOP
```

C Hata işleme

```
900 WRITE(*, *) 'HATA: Giriş dosyası açılmadı: ', INFILE
```

```
STOP
```

```
910 WRITE(*, *) 'HATA: Çıkış dosyası açılmadı: ', OUTFILE
```

```
STOP
```

```
920 WRITE(*, *) 'HATA: Giriş dosyasından veri okuma hatası.'
```

```
STOP
```

```
END
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yekta AKAR

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise :	Muş Endüstri Meslek Lisesi, Merkez, Muş	1998
Üniversite :	Fırat Üniversitesi, Elazığ	2004
Yüksek Lisans	Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, : Fizik , Muş.	
Doktora :		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2006-2016	Akbank T.A.Ş.	Bankacı
2020	Milli Eğitim Bakanlığı	Elektrik Öğrt.

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR