



T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ

PROJE BAŞLIĞI

**NİKEL-63 VE PROMETYUM-147 RADYOİZOTOPLARI İLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ BETAVOLTAİK VE DOĞRUDAN ŞARJLI NÜKLEER
PİLLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Proje No: FDK-2019-3591

Proje Türü: Tez Projesi, Doktora

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Erol KAM
Fen Ed Fak Fizik Bölümü

“Araştırmacının Adı Soyadı: Selim AYDIN
Fen Ed. Fak Fizik Bölümü

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün FDK-2019-3591 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	1
ABSTRACT	2
1. GİRİŞ	3
2.Bulgular	8
3. Materyal ve Metot	9
4. Sonuç ve Tartışma	24
5. Referanslar	26

Özet

Bu çalışmada, Pm-147 kaynağı ile güçlendirilmiş doğrudan şarjlı nükleer prototipleri ve Ni-63 radyoizotopu ile güçlendirilmiş doğrudan dönüşümlü (betavoltaik) geliştirilmiştir. Geliştirilen betavoltaik nükleer pilin açık devre voltajı ve kısa devre akımı ölçülmüş, akım-voltaj eğrileri çizilmiş, dolum faktörü ve verim değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen doğrudan şarjlı nükleer pil prototipi üzerinde biriken toplam yük, doyum voltajı, şarj akımı ve kapasitans ölçümleri yapılmıştır. Elde edil4en ölçüm sonuçlarından pilde depolanan enerji, maksimum güç ve verim değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca nükleer pil protiplerinin akım-voltaj-güç ölçümlerinin bilgisayar kontrollü olarak yapılması için Labview tabanlı nükleer pil karakterizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kullanılan radyoaktif kaynağın türüne ve aktivitesine bağlı olarak verileri analiz etmekte ve pilin maksimum akım-voltaj, dolum faktörü, kısa devre akımı, açık devre voltajı ve verim değerlerini otomatik olarak hesaplamaktadır. Pm-147 tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pil düzeneği hazırlanmış ve kurulan düzenek yüksek vakum hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Ölçümlerin yapılabilmesi için, nükleer pilin kontakları, vakum bağlantı ekipmanları ile hücre dışına taşınmıştır. Deney kurulumu tamamlandıktan sonra, ölçüm cihazları sırayla bağlanarak, pilin akım, voltaj ve kapasitans değerleri ölçülmüştür. Ayrıca vakum hücresinin üzerine yerleştirilen elektrostatik alan/voltaj ölçer ile, nükleer pilin plakalarında biriken toplam yük ve voltaj değerleri temassız olarak ölçülmüştür. Toplam 100 mCi aktiviteli Pm-147 radyoizotopla güçlendirilmiş nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde, pilin doyum voltajı 421 V, şarj akımı 54 pA ve üretilen maksimum güç 22.7 nW olarak bulunmuştur. Pilin kapasitans değeri 66.8 pF, verim değeri %0.07 civarındadır. Pilde depolanan güç değeri 6 µJ civarındadır. Bu aktivitede teorik verim değeri % 0.21 bulunmasına rağmen deneysel verim değerinin üç kat daha düşük bulunmuştur. Bunun nedeni, ortalama 62 keV enerjili Pm-147 beta parçacıklarının geri saçılma etkisini azaltmak için, metal kolektörler üzerine 25 µm polimid film kaplanmasıdır. Bu kalınlıkta, Katz-Penfold yarı deneysel formül'e göre 49 keV ve altındaki beta spektrumu kaybolmaktadır ve kaplanması gereken polimid film kalınlığı 0.3-0.4 µm'yi geçmemelidir.

Anahtar Kelimeler: Nükleer pil, betavoltaik, kısa devre akımı, açık devre voltajı, verim, radyoizotop, galyum nitrit, yarıiletken.

Abstract

In this study, Pm-147 direct charged and Nickel-63 direct conversion (betavoltaic) nuclear battery prototypes were developed. The open-circuit voltage and short circuit current were measured, current-voltage curves were drawn, filling factor and yield values were calculated. Total charge, saturation voltage, charge current and capacitance measurements were taken on the direct-charged nuclear battery prototype. Maximum power, efficiency and deposited energy values of the battery were calculated from the measurement results. In addition, a LabVIEW-based nuclear battery characterization software has been developed to take computer-controlled current-voltage-power measurements on nuclear battery prototypes. This software analyzes data based on type and activity of the radioactive source and automatically calculates the maximum current-voltage, filling factor, short-circuit current, open-circuit voltage and efficiency values of the battery.

In the second phase of research, Pm-147 based direct charged nuclear battery setup was prepared and placed in a high vacuum system. To take electrical measurements, connections of the battery have been moved out from the vacuum chamber using electrical feed-throughs. After the battery setup was completed, the measurement devices were connected to the system and the current, voltage and capacitance values of the battery were measured. In addition, the total charge and accumulated voltage on the battery plates were measured with non-contact electrostatic field/voltage meter placed on the vacuum chamber. In measurements of the nuclear battery prototype powered by Pm-147 radioisotope with a total activity of 100 mCi, the saturation voltage and charge current was 54 pA and 421 V, respectively. The battery has a maximum power of 22.7 nW and capacitance of 66.8 pF. Total conversion efficiency of the battery was 0.07%. The deposited energy in the battery was calculated around 6 μ J. Although the theoretical battery efficiency was calculated as 0.21%, experimental efficiency was found three times lower than that of this value. This is because a 25 μ m polyimide film is coated on metal collectors to reduce the backscattering effect of Pm-147 beta particles with an average energy of 62 keV. In this thickness, the beta energy spectrum of 49 keV and below is lost according to the Katz-Penfold semi-experimental formula and the polyimide film thickness should not exceed 0.3 - 0.4 μ m.

Keywords: Nuclear battery, betavoltaic, short circuit current, open circuit voltage, efficiency, radioisotope, gallium nitride, semiconductor.

Giriş

Bilindiği gibi teknolojik gelişmelerin önündeki en büyük engel enerjinin depolanması problemidir. Nükleer piller göreceli olarak düşük güç üretmesine rağmen, nükleer pil ile kilogram başına binlerce watt-saat'lik enerji yoğunluğu elde edilebilir ki bu da en iyi kimyasal pilden çok daha fazladır. Nükleer piller, aynı boyutlardaki hidrojen yakıtlı pillerden yaklaşık 10 kat, kimyasal pillerden ise 1000 kat yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir [1]. Kimyasal pillerin boyutları küçüldükçe, depoladığı enerji miktarı üstel olarak azalmakta ve elektronik cihazlar için uzun süre gerekli gücü sağlayamamaktadır. Radyoizotop kaynaklı nükleer piller ise, ultra ince film şeklinde kaplandıktan sonra mikro elektromekanik sistemler için (MEMS) gerekli uzun dönemli gücü sağlayabilirler [2]. Yıllarca süren araştırmalarda kullanılan uzay istasyonlarında, denizaltı araştırmalarında, periyodik olarak ulaşılması zor olan uzak mesafelerde ve zorlu ortam koşullarında uzun ömürlü güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilecek tek çözüm nükleer pillerdir çünkü farklı tipteki nükleer piller, kimyasal pillerle karşılaştırıldığında, yüksek basınç, toz, nem, radyasyon alanları gibi uygun olmayan çevre koşullarında da çalışabilmektedirler.

Günümüzde düşük güç gerektiren nano-teknolojik cihazlar yaygın hale geldiğinden dolayı, nükleer pil teknolojisi çok daha önem kazanmıştır [3]. Artık nükleer pillerde yakıt olarak kullanılacak beta-radyoaktif izotoplar makul fiyatlar ile piyasadan temin edilebilmektedir. Diğer yandan kimyasal pillere göre oldukça uzun bir ömre sahip olduklarından dolayı, ticari olarak kullanılmaları da avantajlı hale gelmektedir.

Alfa, beta veya gama radyoaktif kaynakları kullanılarak geliştirilen farklı tip nükleer pil teknolojileri günümüzde, uzay araçları ve denizaltı çalışmalarında, termoelektrik üreticilerde, kalp pilleri ve biyomedikal protez cihazları gibi sağlık uygulamalarında, düşük akım gerektiren mikro-elektromekanik sistemlerde (MEMS), askeri amaçlı olarak üretilen cihazlardaki ultra-düşük güç sensörlerinin çalışmasında, elektronik cihazlarda depolanan hassas verilerin korunmasında ve tüm bu cihazların 25 yıl süre ile zorlu ortam koşullarından etkilenmeyecek şekilde çalışmasında AR-GE'si yapılan oldukça stratejik bir çalışma alanıdır [4], [5]. NASA göndermiş olduğu uzun süreli uzay araçlarında ^{238}Pu tabanlı nükleer pil teknolojisi kullanılmaktadır. Benzer şekilde tıp alanında fizyolojik izleme ve tedavi amaçlı uygulamalarda veya petrol arama ve kimyasal üretim gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu alanda Trace Photonics Inc. (ABD), MIT (Massachusetts Institute of

Technology), Widetronics (ABD), City Labs (ABD), QEnergy (Avustralya), Bellona (Rusya) gibi daha birçok özel ve devlete ait ulusal laboratuvar çalışmaktadır. Bazı ileri nükleer teknoloji firmaları, alfa veya beta kaynaklı olarak çalışabilen prototip akıllı telefonlar geliştirmişlerdir. Ancak ticari firmaların ve halkın radyoizotop kaynaklı bir teknolojiye hazır olmaması ve betavoltaik pilin fiziksel olarak zarar görmesi durumunda kaynağın açığa çıkması gibi risklerden dolayı, bu tip amaçlı üretimler şimdilik durdurulmuştur. Bu sebeple teknoloji, uzay ve denizaltı araştırmalarında ve çeşitli askeri uzaktan kontrollü algılama sistemlerinde kullanılır hale gelmiştir. Özellikle son 10 yıldır Çin ve ABD başta olmak üzere birçok ülkedeki nükleer araştırma enstitüsü tarafından, beta kaynakları ve bu kaynaklara uygun olarak kullanılabilecek yarı iletken ve dielektrik malzemeler kullanılarak yüksek verimli betavoltaik pillerin geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır.

Ülkemizde, yukarıda bahsedilen ileri teknolojik alanlarda AR-GE çalışması yapılan nükleer pillerin geliştirilmesi ve teknolojiye uygulanması ile ilgili teorik ve deneysel çalışma henüz bulunmamaktadır. Mikro ve nano teknolojilerdeki kullanım potansiyeli göz önüne alındığında, ülkemizdeki üniversitelerin malzeme araştırma laboratuvarları ve AR-GE merkezleri tarafından bu teknolojinin geliştirilip, ülke teknolojisine kazandırılması oldukça faydalı olacaktır. Yapılan proje çalışmasının amacı, yukarıda bahsedilen birçok alanda AR-GE çalışması yapılan nükleer pillerin, teorik ve deneysel olarak incelenmesi ve örnek nükleer pil prototipleri geliştirilmesidir. Bu amaçla Türkiye Atom Enerjisi Kurumu bünyesinde Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı kurulmuş ve nükleer pil karakterizasyon ölçümleri için gerekli cihaz, ekipman ve vakum sistemi temin edilmiştir. Ayrıca gerekli ölçüm otomasyon yazılımı geliştirilmiş ve bilgisayar simülasyonları yapılmıştır. Yapılan birçok deneme ve ölçümlerin sonucunda, Ni-63 radyoaktif kaynak ve GaN yarıiletken tabanlı betavoltaik nükleer pil prototipi geliştirilmiştir. Ayrıca, Sr-90, H-3, Pm-147 ve Ni-63 gibi farklı β enerjisine sahip radyasyon kaynaklarının SiC, GaN, Al_{0.7}Ga_{0.3}N gibi farklı bant genişliğine sahip yarı iletken filmler ile kaplanarak çıkış enerji ve güç yoğunluğunun ölçülmesi ve iyileştirilmesi konusunda oldukça ayrıntılı literatür incelemesi yapılmıştır. Literatür araştırması doğrultusunda, farklı kalınlık ve aktivitelerde radyoaktif kaynaklar kullanılarak ve yarı iletken malzemelerin kalınlıkları optimize edilerek, prototip nükleer pilden maksimum çıkış gücü elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan araştırmanın diğer bir amacı, kullanılan radyoaktif kaynaktan dolayı betavoltaik nükleer pilin ana yapısını oluşturan yarı iletken malzemedeki meydana gelen radyasyon hasarının incelenmesidir. Çünkü nükleer pil teknolojisinin geliştirilmesi konusunda aşılması

gereken engellerden biri, radyasyonun, pilin verimi ve ömrü üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin azaltılmasıdır. Bu amaçla uygun enerji bant aralığına sahip yarı iletken malzeme seçilmesi ve bu malzemelerin karakteristik özelliklerinin çıkartılması gibi aşamalar için literatür araştırması yapılmıştır.

Bir nükleer pil türü olan “Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil” sisteminin teorik ve deneysel olarak çalışılması hedeflenmiştir. Bu amaçla yarı iletken malzeme kullanılmadan, vakum hücresinin içerisine yerleştirilen metal kollektörlerin karşısına beta radyoaktif kaynaklar konularak prototip-primitif bir doğrudan şarjlı nükleer pil devresi geliştirilmiş ve verim hesaplamaları yapılmıştır.

BULGULAR

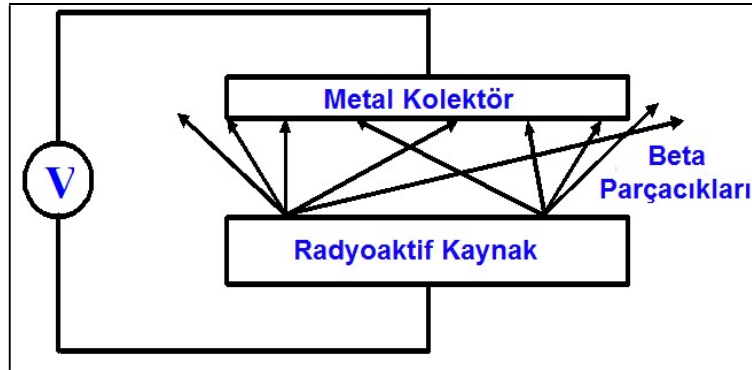
Günümüzde askeri teknolojiler, biyoteknoloji, bilişim teknolojileri, sağlık uygulamaları gibi birçok teknolojik alanda kullanılır hale gelen mikro ve nano elektromekanik sistemler (MEMS-NEMS) için, küçük boyutlu ve uzun yıllar boyunca bitmeyecek güç kaynaklarına gereksinim artmıştır. Kimyasal pillerin boyutları küçüldükçe ürettiği güç ve verim üstel olarak düşmektedir [6]. Alternatif bir enerji kaynağı olarak, ince film şeklinde veya nano boyutlarda tasarımlanabilen nükleer pillerin, dünyadaki ileri araştırma merkezleri ve enstitülerinde daha da verimli hale getirilmesi amacıyla yapılan araştırmalar son 15 yılda oldukça yoğunlaşmıştır. Bu çalışma, ülkemizde betavoltaik ve doğrudan şarjlı nükleer pil tasarımlarının özgün ve çalışan bir prototipinin geliştirilmesi konusunda ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca çalışmanın neticesinde elde edilen teorik bilgiler ve deneysel veriler, gelecekte bu alanda yapılacak araştırmalara iyi bir referans olacaktır. Nükleer pilin verimi, tasarımlanan geometriye, kullanılan yarı iletken/dielektrik malzemelerin özelliklerine, katkılama yoğunluğuna ve radyoaktif kaynağın spesifik beta enerjisine göre oldukça farklılık gösterdiğinden dolayı bu alanda yapılan her deneysel araştırma özgün değere sahiptir. Diğer yandan yapılan deneysel araştırmanın çıktıları, ülkemizin bu ileri teknolojik alana girmesine ciddi bir başlangıç ve referans olacaktır.

MATERYAL VE METOT

Prometyum Tabanlı Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Tasarımı ve geliştirilmesi

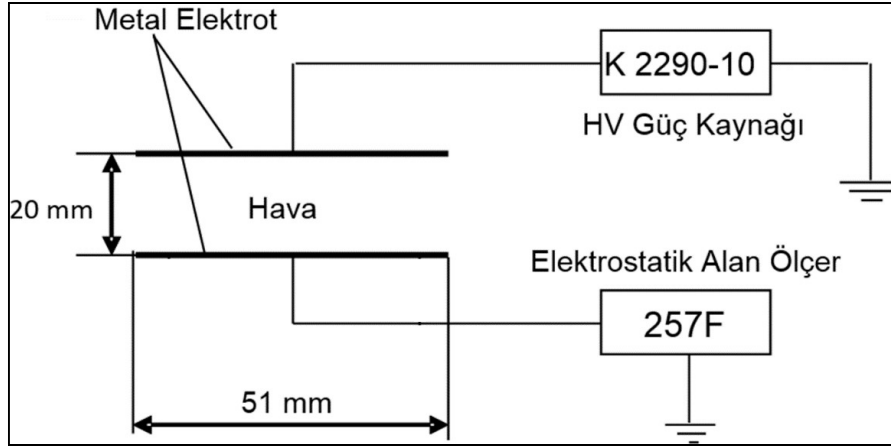
Doğrudan şarjlı nükleer pillerin çalışma prensibi, verimlilik denklemi ve verimi etkileyen faktörler Bölüm 6.2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştı. Mevcut araştırma da döneminde temin edilebilen Pm-147 radyoizotop ile doğrudan şarjlı nükleer pil deney sistemi hazırlanmış, devrede oluşan düşük akım ve kapasitans değerleri ölçülmüştür.

Bu araştırmada geliştirilen doğrudan şarjlı nükleer pil deney sistemi, Şekil 1’de görüldüğü gibi, radyoaktif ince bir filmden yayınlanan yüksek enerjili beta parçacıklarının metal kolektöre çarpması ve burada oluşan ikincil elektronların harici bir devrede toplanması prensibine göre kurulmuştur

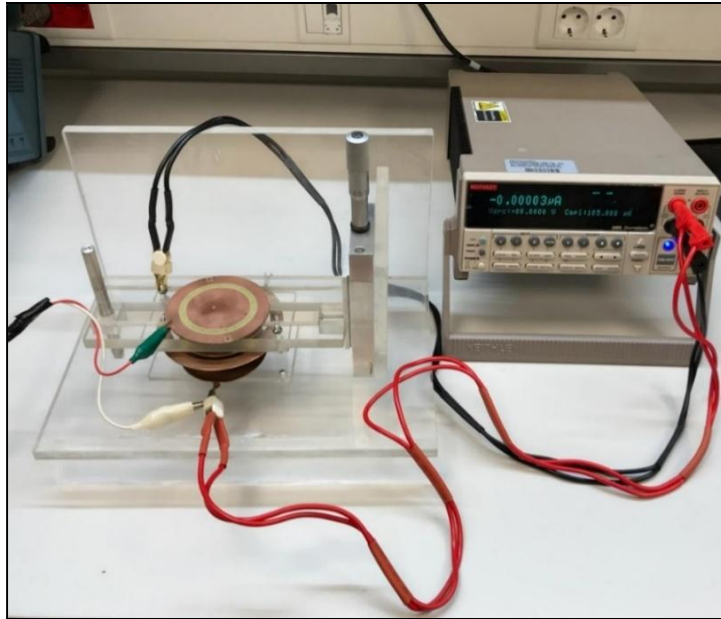


Şekil 1 Betavoltaik nükleer pil ölçümleri için geliştirilen yazılım arayüzü

Nükleer pil sistemi hazırlanmadan önce, Şekil 2’de verilen iki plakalı bir ölçüm düzeneği kurulmuştur. Yapılan ön çalışmanın amacı, alttaki metal plaka üzerine radyoaktif kaynak konulmadan önce, temassız yüksek gerilim ölçüm sisteminin kalibrasyonunun yapılmasıdır. Bu amaçla Keithley 2290-10 yüksek voltaj kaynağı ile iki plaka arasında kademeli olarak voltaj uygulanmıştır. Kolektörde biriken voltaj ölçümü, 1036 F problu 257 F elektrostatik alan/voltaj ölçer ile alınmıştır. Hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 3’te gösterilmiştir.



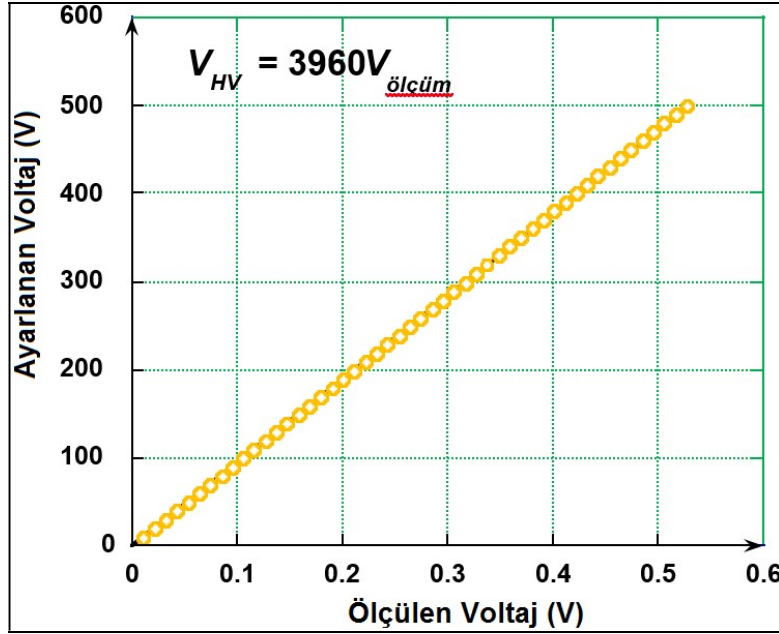
Şekil 2. Uygulanan plaka voltajına göre kolektördeki voltajlarının ölçülmesi



Şekil 1 Ayarlanan ve akümüle edilen voltajın ölçüldüğü deney sistemi

Şekilde görüldüğü gibi, üst ve alttaki elektrotlar için, 2" çaplı dairesel bakır plaka kullanılan bir sistem tasarlanmıştır. Radyoaktif kaynağın konulacağı alttaki plaka sabit, üstteki metal plaka ise sabitlendiği hareketli düzencek yardımıyla yukarı-aşağı yönde hareket edebilmektedir. Ölçümlerde ayarlanan her bir voltaj değerine göre (V_{HV}) elektrostatik alan ölçer'in okumaları

(Völçüm) kalibre edilmiştir. Farklı kolektör aralıklarında, uygulanan ve ölçülen voltaj değerlerine göre elde edilen eğri Şekil 4’de verilmiştir.

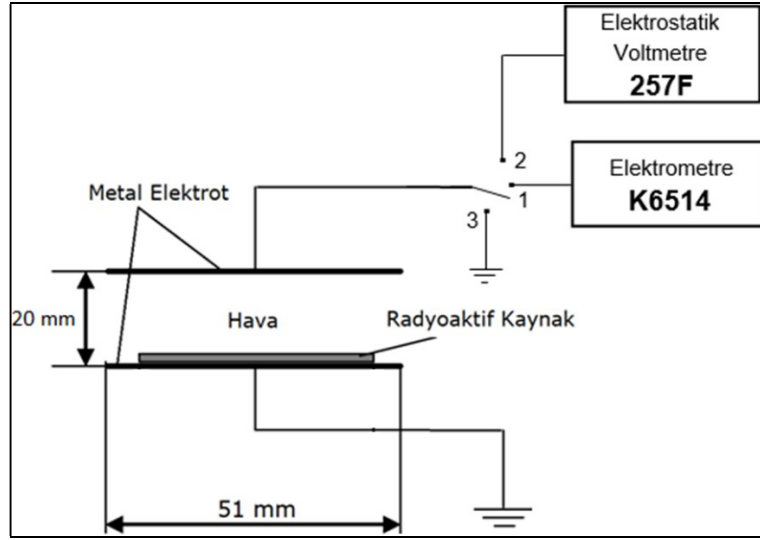


Şekil 2 Elektrostatik alan ölçer kalibrasyon eğrisi

Grafikte görüldüğü gibi ayarlanan ve elektrostatik alan ölçer ile okunan voltaj değerleri orijinden geçmektedir ve birbirine lineer olarak bağlıdır. Bu bağımlılık $V_{HV} = 3960.V_{ölçüm}$ olarak bulunmuştur.

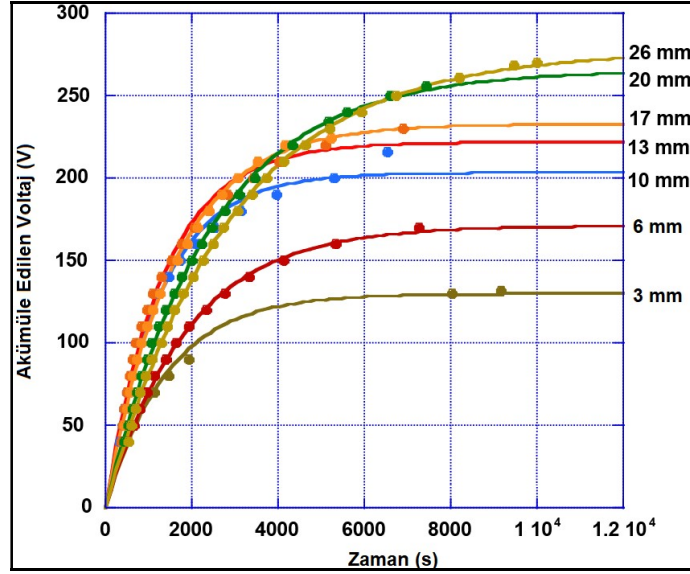
Doğrudan şarjlı nükleer pil sistemini hazırlamadan önce alınan ikinci bir ölçüm, metal elektrotlar arasındaki optimum mesafenin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Ölçümler Şekil 3'de verilen sistem ile alınmıştır. Ancak bu defa, alttaki metal plaka üzerine 10 mCi Pm-147 beta kaynağı yerleştirilmiş ve plaka topraklanmıştır. Kaynakla yapılan ölçüm düzeneği şeması Şekil 5’de gösterilmiştir. Plakanın topraklanmasının nedeni, yüksek enerjili beta yayınından dolayı kaynağın olduğu plakada meydana gelen yükün sıfırlanmasıdır. Şekildeki sistemde anahtar 2 konumunda iken, Pm-147 radyoaktif kaynağından yayınlanan beta parçacıkları üstteki kolektör plakaya çarptıkça burada zamana göre artan bir yük ve voltaj akümüasyonu meydana gelecektir. Şekildeki sistemde yaklaşık 3 saat gibi uzun bir süre beklendikten sonra metal kolektörde biriken voltaj elektrostatik voltmetre ile ölçülmüştür. Anahtar 1 konumuna

alındığında sistem elektrometre üzerinden topraklanır. Kolektörle arasındaki potansiyel farktan dolayı sistemde indüklenen yük toprağa doğru hareket eder ve elektrometre üzerinden ölçülür.



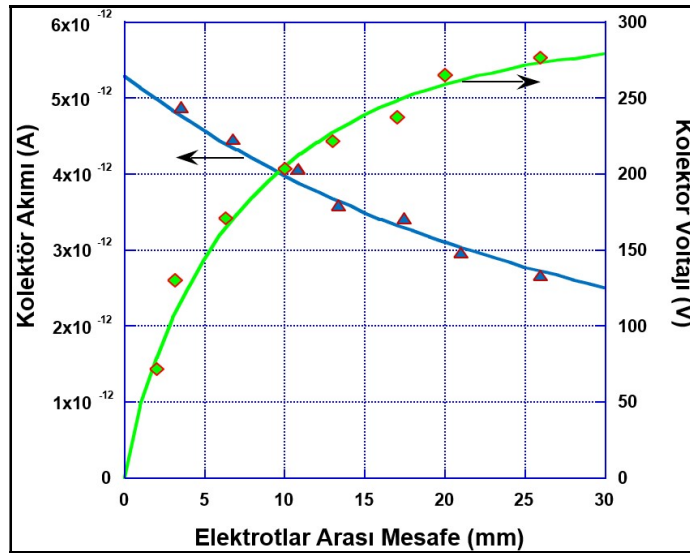
Şekil 3 Elektrotlar arası optimum mesafenin belirlenmesi

Ayarlanan farklı elektrot mesafelerine bağlı elektrostatik voltmetre ile alınan ölçümler Şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4 Farklı elektrot aralığında zamana göre kolektörde biriken voltajlar

İkinci olarak, Şekil 5 sisteminde, ayarlanan her bir kolektör mesafesi için, anahtar 1 ve 2 konumuna alınarak kısa devre akımı ve kolektör voltajı ölçülmüştür. Alınan ölçümlerden, Şekil 7’de noktalı olarak verilen grafik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5 Farklı elektrot mesafelerinde oluşan kolektör akım-voltaj grafiği

Şekil 7’den görüldüğü gibi elektrotlar arası mesafe arttıkça kolektör voltajı artarken, kısa devre akımı azalmaktadır. Bunun nedeni, elektrotlar arası mesafe arttıkça kaynaktan çıkan beta parçacıklarının yayılma açısı (katı açısı) artacağından, bir kısım parçacıkların, üstteki toplayıcı plakanın kenarlarından dışarı doğru gitmesi ve yük kaybına sebep olmasıdır.

Sistemin şarj akımı, Şekil 7’de ölçülen kolektör akımları teorik olarak doğrulanmıştır. Grafikte ölçülen kısa devre akımı bu denklemde yerine yazılırsa kolektör akımı,

$$I_{şarj} = 5 \cdot 10^{-12} \cdot k_g(0.02, d/1000) \quad (1)$$

bulunur. Burada, $k_g(0.02, d/1000)$, aşağıdaki denklemde

$$k_g = \frac{1}{2\pi \cdot \pi R^2} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot x \cdot d\beta d\phi dx = \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot x \cdot d\beta dx$$

verildiği gibi, geometrik faktör olarak adlandırılır ve beta parçacık akısının kolektöre ulaşan kesrini ifade eder. Benzer şekilde grafikte yeşil noktalarla verilen voltaj değerleri,

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R_{kaçak} \cdot C} = \frac{I_{ss} \cdot \eta_R(V)}{C}$$

Denkleminde kullanılarak teorik olarak da elde edilmiş ve grafikteki sürekli eğri çizilerek deneysel sonuçlar doğrulanmıştır. Her bir elektrot mesafesi için denklem 1 ile hesaplanan kolektör akımı, sistemin doyum voltajı bulunabilir.

$$V_{Doyum} = I_{şarj} R_{kaçak} \eta_R \quad (2)$$

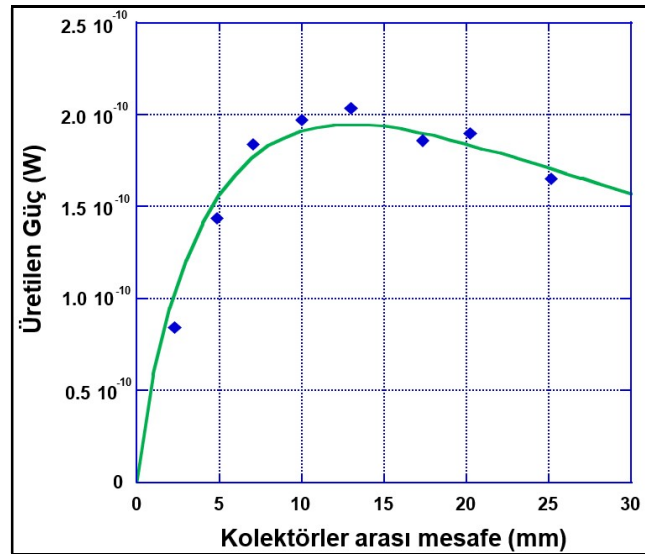
Burada η_R kolektöre ulaşan beta parçacık akısını ifade eder. Doyum voltajının bulunması için, sistemin kaçak direnci ($R_{kaçak}$), hesaplanmıştır. $R_{yük}$, harici direnci ifade eder ve yüksek voltaj ölçümleri için voltaj bölücü olarak kullanılır. Kurulan sistemde, doyum voltajı ölçümü için 10 T Ohm’luk harici direnç seçilmiştir. Pilin ürettiği güç aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$P_{pil} = V_{Doyum} \cdot I_{yük} = I_{şarj} \frac{R_{pil} \cdot R_{yük}}{R_{pil} + R_{yük}} \quad (3)$$

Denklem (2) ve (3)'te $R_{pil} \gg R_{yük}$ olduğu kabul edilerek üretilen güç ve doyum voltajı hesaplanmıştır. Benzer şekilde Şekil 7'deki akım değerleri ölçülürken, denklem ifadesinde $R_{yük} = 0$ alınmıştır ($I_{sc} = I_{şarj}$, kısa devre durumu).

Pilin ürettiği gücün deneysel olarak bulunması için, Şekil 7' deki akım-voltaj değerleri birbiri ile çarpılarak kolektörler arası mesafeye bağlı güç grafiği çizilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 8'de gösterilmiştir. Denklem $R_{yük} = R_{pil}$ durumunda pilin ürettiği güç maksimum değerine ulaşmaktadır.

$$P_{pil,max} = 0,25 \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (4)$$

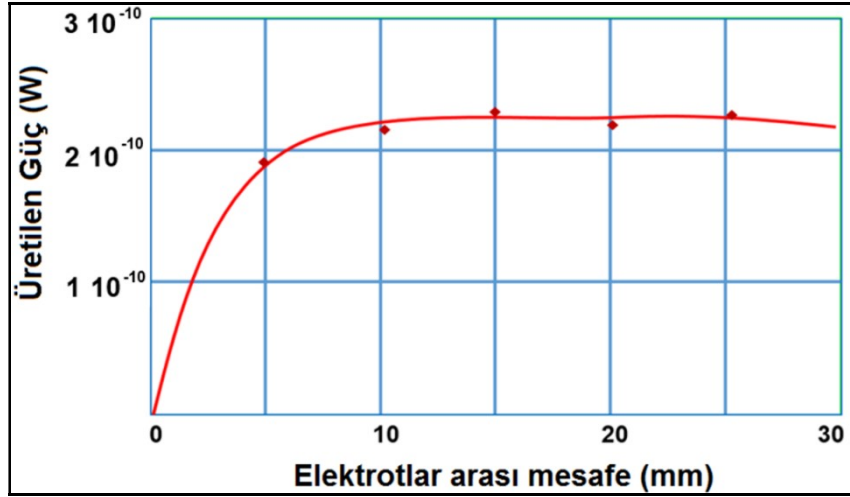


Şekil 6 2'' çaplı elektrotlar arasında üretilen gücün mesafeye bağlılığı

Şekil 8'den görüldüğü gibi 2'' (inç) çaplı dairesel elektrot için, yaklaşık 15 mm kolektör mesafesi civarında üretilen güç maksimum değerine ulaşmaktadır.

Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Çoklu Plaka Sistemi

Farklı elektrot mesafelerinde aynı ölçümler, nükleer pilde kullanılacak olan 3” çaplı, yüzeyi nikel ile kaplanmış paslanmaz çelik plaka sistemi ile yapılmış ve Şekil 9’ da verilen güç eğrisi elde edilmiştir.



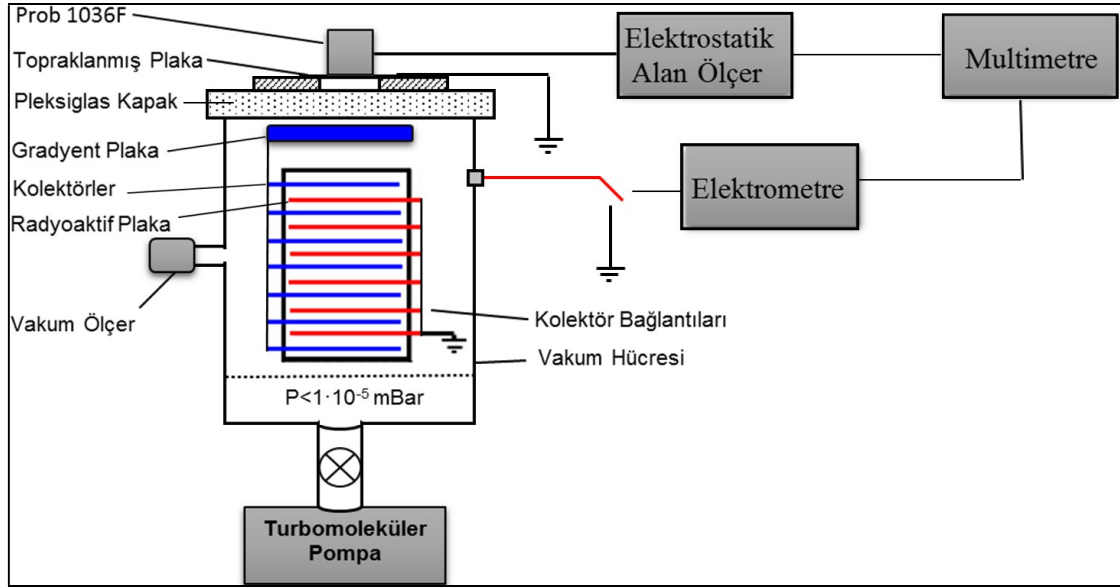
Şekil 7 3” çaplı elektrotlar arasında üretilen gücün mesafeye bağılılığı

Şekilden görüldüğü gibi maksimum güç 20 mm plaka aralığında oluşur. Grafik incelendiğinde 5 mm ve 20 mm kolektör mesafesi arasında ancak % 14 gibi düşük bir güç farkı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, doğrudan şarjlı nükleer pil sisteminin hacmini küçültebilmek için çoklu plaka sisteminin plaka aralığı 5 mm olarak belirlenmiştir. Kurulum için Şekil 10’da verilen sabit 5 mm aralıklı wafer kutusu seçilmiş ve 3” çaplı, yüzeyi nikel kaplanmış olan çelik plakalar kutuya yerleştirilmiştir. Şekil 10’da verilen doğrudan şarjlı pil sisteminde, toplamda 25 adet plaka kullanılmıştır. En alttaki plaka, kolektörden başlamak üzere, sırasıyla kolektör-kaynak şeklinde dizilmiş ve herbir kolektörün arasına Pm-147 radyoizotopunun olduğu kaynak plakalar yerleştirilmiştir.



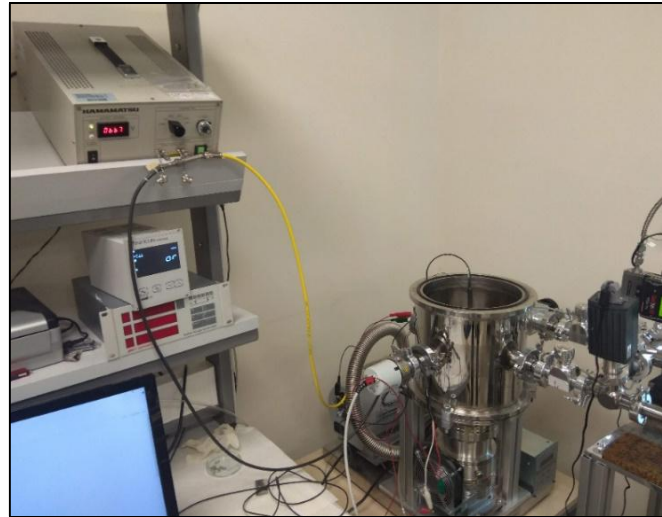
Şekil 8 DŞNP çok katmanlı metal plaka sistemi

Çoklu plaka sisteminin yerleştirileceği deney düzeneğinin tasarımı Şekil 8.11'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney, bir vakum hücresi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Vakum ölçer bağlantısının yapılabilmesi için, hücrenin duvarına KF-40 çıkışları yaptırılmıştır. Benzer şekilde alınacak ölçümler için hücre duvarına konektörlü elektriksel bağlantılar da eklenmiştir. Hücrenin üst tarafına pleksiglas kapak yaptırılarak sistem vakuma alınabilir hale getirilmiştir. Vakum hücresinin alt kısmına CF girişine sahip turbomoleküler vakum pompa istasyonu yerleştirilmiş ve yapılan vakum sızdırmazlık testlerinde sistem, 1×10^{-5} mbar'dan daha iyi bir vakum seviyesine kadar getirilmiştir.



Şekil 9 DŞNP deney ve ölçüm sistemi

Vakum hücresi ve elektriksel bağlantıları içeren deneysel ölçüm sistemi Şekil 12’de gösterilmiştir. Şekildeki turbomoleküler vakum pompa istasyonu mekanik pompa ve turbomoleküler vakum pompasından oluşmaktadır. Yapılan testlerde, sistemin vakum düzeyi mekanik pompa ile 10^{-2} mbar seviyeye kadar düşürülmüş, daha sonra turbomoleküler vakum pompası açılarak, 10^{-6} mbar vakum seviyelerine kadar inilmiştir.

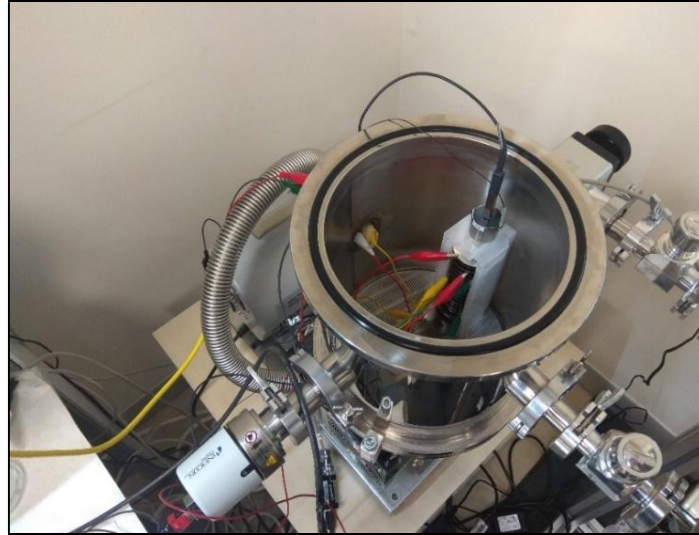


Şekil 10 Turbomoleküler pompa, vakum hücresi ve elektriksel bağlantıları

Deney düzeneğinin kurulumu tamamlandıktan sonra, doğrudan şarjlı nükleer pil plaka düzeneği vakum hücresi içerisine yerleştirilmiş ve kolektör plakalar arasına seri bağlantı yapılmıştır. Alınacak elektriksel ölçümlerin için hücre içerisinde metal plakalara bağlı olan

ölçüm kabloları, vakum hücresinin duvarına monte edilen konektörler yardımıyla hücre dışına taşınmıştır. Vakum hücresinin içi, doğrudan şarjlı nükleer pil plaka düzeneği ve bağlantıları Şekil 13'te verilmiştir.

Deney sistemde kaynak kaplı plakaların tümü birbirine seri bağlanarak topraklanmıştır. Benzer şekilde kolektörler de Şekil 11'de görüldüğü gibi seri olarak birbirine bağlanmıştır. Kaynak plakalardan yukarı ve aşağı yönde yayınlanan beta parçacıkları kolektörlere çarpar. Bu durumda kolektörlerde zamanla artan bir eksi voltaj akümüasyonu gerçekleşir. Plakada indüklenen toplam voltaj, şekilde verilen 1036F ve 257F probuna sahip elektrostatik alan/volt ölçer ile ölçülmüştür. Daha sonra Şekil 11'deki anahtar konumu cihazların ölçüm noktasına getirilerek pilin şarj akımı ve plakada indüklenen toplam yük, elektrometre üzerinden okunmuştur.

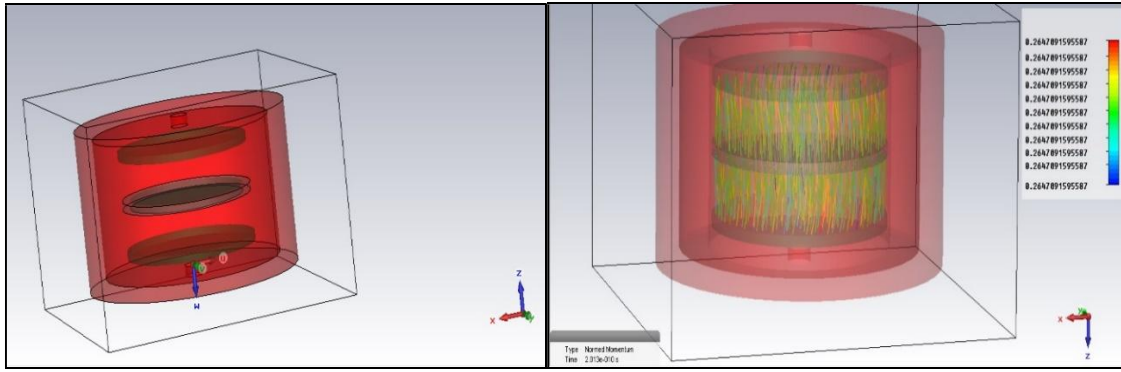


Şekil 11 Doğrudan şarjlı nükleer düzeneği ve elektriksel bağlantılar

- **Manyetik Alan Etkisi Simülasyonu**

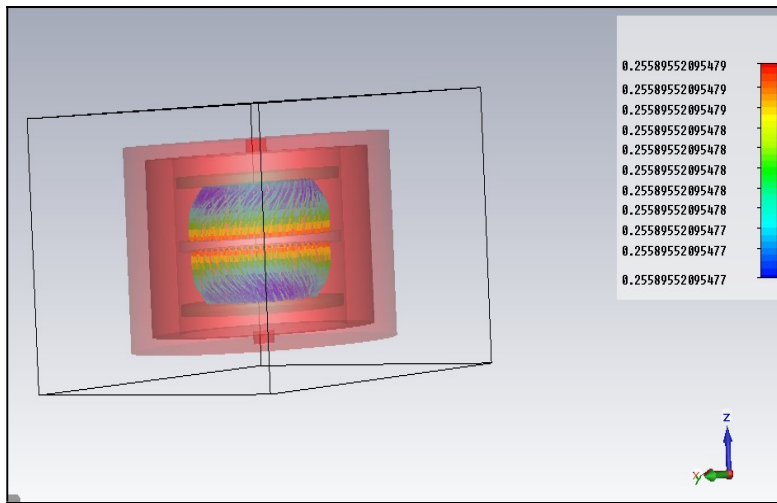
Şekil 10'da verilen çoklu plaka sisteminde, Şekil 7'de açıklandığı gibi, kaynakla toplayıcı plaka arasındaki mesafe arttıkça kaynaktan yayınlanan beta parçacıklarının gördüğü katı açısı artmakta ve bir kısmı karşı kolektöre çarpmadan, kolektörün kenarlardan dışarı doğru gitmektedir. Bu durum, sistemin yük kaybına neden olur. Bu etkiyi görebilmek için CST simülasyon yazılımında, Şekil 14'de verilen manyetik alan modellemesi yapılmıştır. Yapılan modellemede ortadaki kaynağın olduğu plaka, yüzey elektron kaynağı olarak tanımlanmış ve elektron enerjisi olarak, Pm-147 kaynağının ortalama beta enerjisi olan 62 keV değeri

girilmiştir. Şekilde sağdaki resimde görüldüğü gibi kaynak plaka, yukarı ve aşağı yöndeki her açıda elektron salınımı yapmaktadır. Yapılan modelleme sonucunda aradaki mesafe arttıkça, kaynaktan yayınlanan elektronların bir kısmının sistemden dışarı çıktığı görülmüştür. Bu kaybı önlemek için, plakaların etrafına sarılmış ve kaynaktan yayınlanan elektronları plakalar arasında kalmaya zorlayan bir solenoid modellenerek, oluşan manyetik alanın etkisi incelenmiştir. Bilindiği gibi solenoidin oluşturduğu manyetik alan, plakalar arasında ve z-ekseni boyuncadır. Oluşturduğu manyetik kuvvet ise plakanın merkezine doğrudur. Bu nedenle solenoidten yeterli miktarda akım geçirildiğinde oluşan manyetik kuvvet, elektronların sistemin dışına çıkmasına izin vermeyecektir.



Şekil 12 Üst ve altta toplayıcı plaka, ortada elektron kaynağının olduğu doğrudan şarjlı nükleer pil sistemi modeli

Yapılan modelleme Şekil 15'te gösterilmiştir. Modelleme sonucuna göre 33 mT gibi düşük bir manyetik alan, yüksek enerjili elektronları plakalar arasında tutmak için yeterlidir.



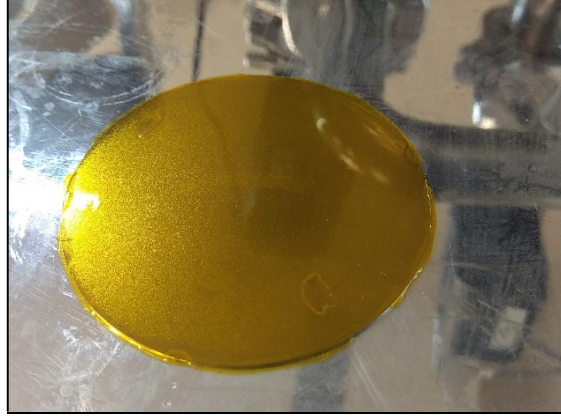
Şekil 13 Plakaya sarılmış solenoidin oluşturduğu manyetik alanın plakalar arasındaki elektron yörüngesi üzerindeki etkisi

- **Dielektrik Film Kaplanması**

Kaynaktan çıkan yüksek enerjili beta parçacıklarının kolektöre çarpması sonucunda meydana gelen geri saçılma etkisi ve metalde oluşan düşük enerjili ikincil elektronlar, doğrudan şarjlı nükleer pilin kendi akımını zıt yönde bastırarak toplam şarj akımını azaltmaktadır. Zira kaynaktan kolektöre çarpan beta parçacıkları burada oldukça fazla sayıda ikincil elektron oluşumuna sebep olmakta ve üstteki kolektör zaman geçtikçe daha fazla negatif olarak yüklenmektedir. Bu durum kaynağın olduğu plaka ve metal kolektör arasında kendiliğinden oluşan ve gittikçe artan, beta akımına zıt bir elektrik alan meydana getirir. Bunun sonucu olarak kaynaktan gelen beta parçacıklarının kolektördeki yük akümüülasyonu belirli bir süre sonra imkânsız hale gelir. Bu etki, trityum gibi düşük enerjili beta kaynaklarında fazla iken, Pm-147 gibi yüksek beta enerjisine sahip kaynaklarda düşüktür. Literatürde yapılan çalışmalarda bu etkiyi azaltabilmek için Şekil 28 ve aşağıdaki Tablo 1’ de verilen çeşitli polimer malzemeler denenmiştir. Söz konusu araştırmada araştırmasında gerek kolay temin edilebilirliği, gerekse verim açısından dielektrik malzeme olarak polimid film temin edilmiş ve Şekil 16’da gösterildiği gibi metal kolektör üzerine ince film şeklinde yapıştırılmıştır.

Tablo 1 5 keV’lik birincil elektron enerjisi için, ikincil elektron oluşumunu azaltan en uygun polimer malzemeler

PET	Polistren	Naylon	PMMA	Polimid
0.3	0.3	0.6	0.7	0.15



Şekil 14 Metal kolektör üzerine kaplanmış polimid film

6. bölümde bahsedildiği gibi, alüminyumdan yapılan kollektör üzerindeki polimid film, 5.7 keV'lik H-3 beta parçacık enerjisi için ikincil elektron verimini 0,5'ten 0,17'ye düşürürken, 62 keV'lik Pm-147 beta parçacık enerjisi için bu değeri, 0.06'dan 0.03'e kadar düşürür. Görüldüğü gibi Pm-147'nin beta enerjisi yüksek olduğundan dolayı, ikincil elektronların verim üzerindeki negatif etkisi çok daha düşüktür. Ancak atom numarası yüksek olan metallerde ikincil elektron verimi ve geri saçılma, alüminyum ile karşılaştırıldığında daha büyüktür. Nikel kaplanmış paslanmaz çelik plaka sistemi kullanıldığından dolayı polimid kaplama büyük bir avantaj sağlamaktadır.

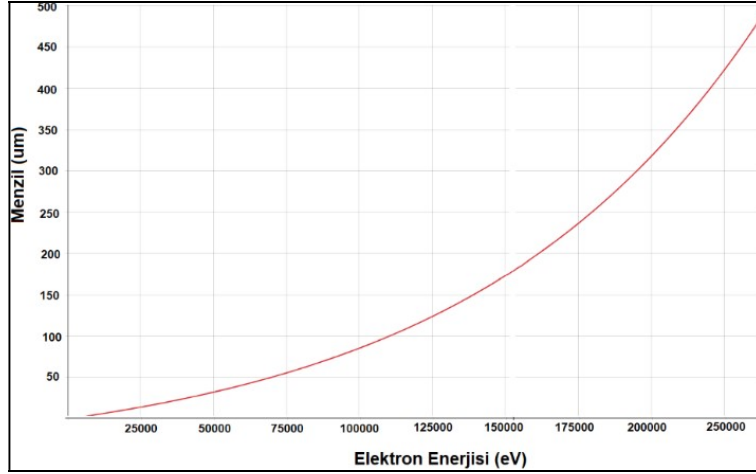
Ortalama 62 keV enerjiye sahip Pm-147 beta parçacıklarının polimid film içinde ne kadar ilerlediği, denklem (2.14) ile verilen Katz-Penfold yarı deneysel formül kullanılarak hesaplanmıştır. $0.01 \leq E \leq 2.5$ MeV enerji aralığı için bu denklem,

$$R = \frac{0.412}{\rho} E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})} \quad (5)$$

şeklinde yazılmıştır. Polimid malzemenin yoğunluğu 1.54 g/cm^3 olarak alındığında,

$$R = \frac{0.412}{1.54} E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})} = 0.267 E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})} \quad (6)$$

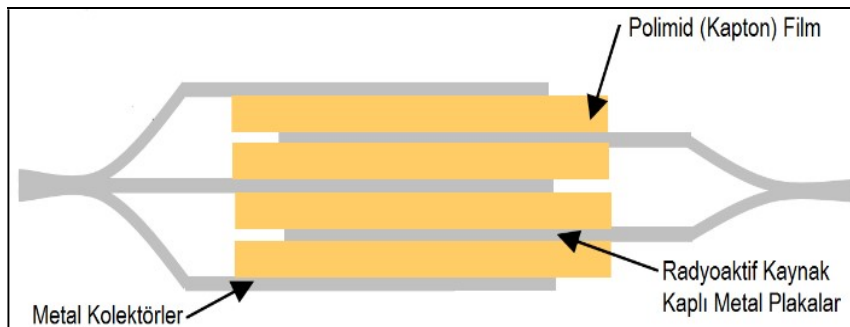
denklemini elde edilmiştir. Denklemin grafiği Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 15 Beta parçacıklarının polimid film içindeki

Denklemden Pm-147'nin 62 keV ortalama beta enerjisi kullanıldığında, polimid içindeki menzili yaklaşık 38 μm olarak elde edilir. Diğer bir ifadeyle 38 μm polimid film, elektron spektrumunu 62 keV oranında soğurmaktadır. Böylece 62 keV ve altındaki tüm elektron enerji spektrumu kaybolmaktadır. Bu da toplam beta spektrumunu %70 oranında azaltır. Bu kayıp gözönüne alınarak ikincil elektron ve geri saçılma etkisini azaltmak için optimum polimid film kalınlığının 0.3-0.4 μm olması gerektiği belirlenmiştir. Ancak piyasadan en ince 25 μm kalınlığında polimid film temin edilebilmiştir. Denklem (6)'ya göre bu kalınlıkta 49 keV ve altındaki beta spektrumu kaybolur.

Yapılan çalışmada son olarak, Şekil 10'da verilen plaka düzeneğindeki tüm metal kolektörler, Şekil 16'da gösterilen şekilde polimid film ile kaplanmıştır. Polimid kaplamalı kolektörden oluşan promethium-147 doğrudan şarjlı nükleer pil modeli Şekil 18'deki gibi üretilip elektriksel ölçümler alınmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları sonuç ve tartışma kısmında verilmiştir.



Şekil 16 Polimid filmlerin metal kolektörler ile birleştirilmesi

• TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan çalışmada Ni-63 ve Pm-147 beta kaynakları kullanılarak doğrudan dönüşümlü (betavoltaik) ve doğrudan şarjlı olmak üzere iki farklı nükleer pil prototipi geliştirilmiştir.

Radyasyon enerjisinin farklı yöntemlerle elektrik enerjisine dönüşüm mekanizmasının anlaşılması amacıyla, farklı radyasyon türlerinin maddeyle etkileşim mekanizmaları anlatılmıştır. Çalışma prensibine göre farklı nükleer pil modelleri ve çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca nükleer pillerde kullanılan beta radyoizotopların özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca nükleer pillerin 1950'li yıllardan günümüze mevcut teknolojik uygulamaları ile gelecek yıllarda hedeflenen potansiyel uygulamalarından bahsedilmiştir. Betavoltaik pillerin çalışma prensibi anlatılmış, pil performansını etkileyen faktörler ve çalışmada kullanılacak olan GaN yarı iletken malzemenin fiziksel parametreleri hakkında bilgi verilmiştir. Öte yandan teorik verim hesaplamaları yapılarak, akım-voltaj karakteristiği, geniş bant aralıklı yarı iletkenler ve radyasyon dayanıklılığı kavramlarından bahsedilmiştir. Altıncı bölümün ikinci kesiminde, doğrudan şarjlı nükleer pillerin çalışma prensibi ve verimi etkileyen faktörlerden bahsedilmiştir. Ni-63 radyoizotopla güçlendirilmiş GaN yarı iletken tabanlı nükleer pil prototipleri geliştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak, GaN yarı iletken malzemesinin karakteristik özellikleri ve parametreleri ile aktif bölge kalınlığı simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon ve teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre, Bilkent Nanotam'da, aygıt tasarımı çalışmaları, epitaksi büyütme çalışmaları ve aygıtların performansını etkileyecek en önemli faktörlerden kontak direncinin düşürülmesi üzerine çalışmalar yapılmış ve herbiri farklı özellikte yarı iletken aygıtlar geliştirilmiştir. Aygıt tasarımı için, Silvaco yarı iletken aygıt simülasyon programı ve Tracer Monte Carlo simülatörü kullanılmıştır. Epitaksi büyütme NANOTAM temiz odasında bulunan metal-organik kimyasal buhar yoğunlaştırma (MOCVD) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve metal kontaktları yapılarak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Üretilen aygıtların karanlık akımları ölçülmüş, morötesi dalga boylarında fotonlara tepkiselliği gözlenmiştir. Yedinci bölümün ikinci kısmında Ni-63 ve Pm-147 radyoaktif ince film üretim çalışmaları yapılmıştır. Bunun

için MCNP kodu kullanılarak, optimum radyoaktif ince film kalınlıklarının ne olması gerektiği belirlenmiş ve elde edilen bu kalınlık değerlerinde, kaynağın kendini zırhlama etkisinden dolayı, beta enerji spektrumunun hangi oranda yüksek enerjiye doğru kaydığı belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında Ni-63 kaynağı elektroliz ile, Pm-147 kaynağı ise damlatma yöntemi ile ince film şeklinde kaplanmış ve GaN yarı iletken aygıtlar ile birebir örtüştürülerek betavoltaik nükleer pil prototipinin üretimi tamamlanmıştır. Yedinci bölümün son kesiminde, nükleer pilin akım-voltaj-güç karakterizasyonları için gerekli olan vakum sistemi, kaynak ölçer, elektrometre ve triax bağlantılı faraday ölçüm kafesi temin edilmiştir. Ayrıca alınacak ölçümler için labview tabanlı otomasyon yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, kullanılan radyoaktif kaynağın türüne ve aktivitesine bağlı olarak alınan verileri analiz etmekte ve pilin maksimum akım-voltaj, dolum faktörü, kısa devre akımı, açık devre voltajı ve verim değerlerini otomatik olarak hesaplamaktadır. Ni-63 radyoizotop tabanlı, F4-R kodlu betavoltaik nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde, açık devre voltajı 0.65 V, kısa devre akımı 0.1 nA ve maksimum güç 0.016 nW olarak elde edilmiştir. Pilin verimi % 0.05 ve dolum faktörü (FF) 0.25 civarında hesaplanmıştır. Ölçülen değerler, 1 mm²' lik yarı iletken üzerine düşen 0.75 mCi aktivite ile elde edilmiştir. Bu durumda 75 mCi aktivite ile, 1 cm² lik pcb üzerinde seri bir şekilde birbirine bağlanacak toplam 16 adet aygıttan elde edilecek maksimum güç değeri yaklaşık 0.256 nW civarında olacaktır. Geliştirilen F1-F kodlu betavoltaik nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde açık devre voltajı 0.98 V, kısa devre akımı 0.4 nA ve maksimum güç 0.11 nW olarak elde edilmiştir. Pilin verimi %0.35 ve dolum faktörü (FF) 0.28 olarak bulunmuştur. Bu durumda 16 adet seri bağlı aygıttan maksimum elde edilecek güç 1.76 nW civarında olacaktır. Pm-147 tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pil düzeneği hazırlandıktan sonra yüksek vakum hücresi içerisine yerleştirilmiş ve elektriksel bağlantılar, yapılacak ölçümler için hücre dışına taşınmıştır. Akım voltaj ölçümleri için elektrometre ve dijital multimetre kullanılmıştır. Ayrıca pil sisteminde en üstteki metal plakada biriken toplam yük ve voltaj değerleri, elektrostatik alan/voltaj ölçer ile temassız olarak ölçülmüş ve pilin kapasitans değeri belirlenmiştir. 100 mCi aktiviteli Pm-147 radyoizotop tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde pilin doyum voltajı yaklaşık olarak 421 V, şarj akımı 54 pA ve üretilen maksimum güç 22.7 nW civarındadır. Kapasitans değeri 66.8 pF, verim değeri ise % 0.07 olarak elde edilmiştir. Pilde depolanan güç değeri 6 µJ civarındadır. Teorik olarak elde edilen verim değeri % 0.21 bulunmasına rağmen deneysel verim değerinin 3 kat düşük olmasının nedeni, pilde geri saçılma etkisini azaltmak için metal kolektörler üzerine kaplanması gereken optimum polimid

film kalınlığı 0.3-0.4 μm olduğu halde piyasadan en ince 25 μm polimid film temin edilebilmesidir. Denklem (6)' ya göre bu kalınlıkta 49 keV ve altındaki beta spektrumu kaybolmaktadır. Bu da pilin verimini oldukça d    rmektedir.

Yapılan  alı ma tamamlandıktan sonra planlanan bir diğer araştırma, üretilen betavoltaik nükleer pilin içerisine radyoaktif madde konulmadan, elektron hızlandırıcısı ile farklı enerji ve demet akımlarında verim-g   testlerini yapmaktır. Bu şekilde üretilen yarı iletkenin hangi elektron enerjisinde en yüksek verime sahip olacağı deneysel olarak tespit edilmiş olacaktır. Ayrıca, mevcut yarı iletken tasarımı, katkılama yoğunluğu, kristal kusur optimizasyonu ve yüksek p-kontak dirençlerinin d    r lmesi gibi aşamalar üzerinde çalışılması planlanmakta ve daha geniş alanlı olacak şekilde seri ya da paralel bağlanacak aygıtların üretilmesi hedeflenmektedir. Mevcut aygıtlarda 100 mm²'lik alanın 16 mm²'lik alanı efektif olarak akım ölçülecek şekilde bağlanmıştır. Üretilen yarı iletken eklemlerde karanlık akım dağılımı oldukça geniş gözlemlendiği için, bu akım seviyelerinin benzer seviyelere çekilmesi de hedeflenmektedir.

Çalışma da geliştirilen doğrudan dönüşümlü (betavoltaik) ve doğrudan  arđlı prototip nükleer pillerin verimi, fotovoltaik güneş pillerine göre düşük olmasına rağmen, mevcut çalışma, bu teknolojinin gelecekteki uygulamaları ve Türkiye'de yapılan ilk kapsamlı deneysel araştırma olması açısından önem arz etmektedir.

Referanslar

- [1] K. Wu, C. Dai, H. Guo, (2011). "A theoretical study on silicon betavoltaics using Ni-63", 2011 IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), S. 724-727.
- [2] K. Fu, A. Knobloch, F. Martinez, D. Walther, C. Fernandez-Pello, A. Pisano, D. Liepmann, K. Miyaska, and K. Maruta, "Design and Experimental Results of Small-Scale Rotary Engines", Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, s. 867-873.
- [3] D.Y. Qiao, Y.W. Zheng, G. Peng, Y.X. Wang, Z. Bo, Z. Lin, (2008). "Demonstration of a 4H SiC betavoltaic nuclear battery based on Schottky barrier diode", Chinese Physics Letters 25, 3798.

- [4] A. Sciuto, G. D'Arrigo, F. Roccaforte, M. Mazzillo, R. Spinella, V. Raineri, (2001). "Interdigit 4H-SiC vertical Schottky diode for betavoltaic applications", IEEE Transactions on Electron Devices 58, 593-599.
- [5] D.Y. Qiao, X.J. Chen, Y. Ren, W.Z. Yuan, (2011). "A micro nuclear battery based on SiC Schottky barrier diode", Journal of Microelectromechanical Systems 20 685-690.
- [6] A. Lal, J. Blanchard, (2004). "Daintiest dynamos [nuclear microbatteries]", IEEE Spectrum 41, 36-41.