

Zırhlı ölçüm odasına sahip radyasyon dedektörleri için uzaktan kontrollü numune değiştiricisinin tasarlanması ve geliştirilmesi

Yasin KARAN^{1*}, Emre YILDIZ², Serdar DİZMAN³, Soner TOKÇALAR⁴

Öz

Günümüzde, birçok değerli makine sürekli olarak 24 saat boyunca aktif olarak çalışırken genellikle yanında bir görevli gerektirmektedir. Ancak, gelişen endüstri devrimleri sayesinde, bilişim teknolojileri ve robot kolları gibi temel teknolojilerle makineler uzaktan kontrol edilebilir hale gelmiştir. Bu durum, enerji ve kaynak tasarrufu sağlama potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada, zırhlı ölçüm odasına sahip bir manuel numune değiştiricili cihaz olan Yüksek Saflıkta Germanium Dedektörü'nün uzaktan erişimle kontrol edilebilmesi sağlanmıştır. Bu dedektör, çeşitli çevresel örneklerde (gıda, su, toprak, granit, seramik vb.) gama radyasyon miktarını belirleme kapasitesine sahiptir. Ancak, bu dedektör sıvı azot ile soğutularak çalıştığından, ölçümlerin tamamlanmasının ardından numunelerin manuel olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Numune değişim süreleri, ölçülen malzemenin türüne bağlı olarak değişiklik gösterir (25000-80000 s). Ancak, numune değişimleri bazen gece geç saatlere veya hafta sonlarına denk gelebilir. Bu bağlamda, manuel olarak zamanında numune değişimi yapılmadığında dedektör hem elektrik sarfiyatı yapmakta hem de sıvı azot tüketmektedir. Bu durum, boş yere hem elektrik enerjisi hem de sıvı azot israfına yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında, zırhlı ölçüm odalı radyasyon dedektörleri için uzaktan kontrollü bir numune değiştirme sistemi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu sayede, araştırmacılara büyük kolaylık sağlanacak ve aynı zamanda enerji ve sıvı azot israfının önüne geçilecektir.

Anahtar Kelimeler: Dedektör, Numune değiştirme, Tutucu, Makine Üretimi.

Design and development of a remote-controlled sample changer for radiation detectors with an armored measuring chamber

Abstract

In today's industrial landscape, many valuable machines operate continuously for 24 hours a day, often requiring the presence of an attendant. However, with the advancements in industrial revolutions, machines have been adapted to be remotely controlled through fundamental technologies such as information technology and robotic arms. This capability presents a potential for energy and resource conservation. In this study, remote control access has been implemented for a device with an armored measurement chamber, specifically a High Purity Germanium Detector. This detector has the capacity to determine the gamma radiation levels in various environmental samples (food, water, soil, granite, ceramics, etc.). However, as the detector operates cooled with liquid nitrogen, manual replacement of samples is required after completing measurements. The duration of sample replacement varies depending on the type of material measured (25000-80000 s), and sometimes replacements may occur late at night or over weekends. In this context, when manual sample replacement is not done on time, the detector consumes both electricity and liquid nitrogen unnecessarily. This leads to wasteful consumption of both electrical energy and liquid nitrogen. In this study, a remotely controlled sample replacement system has been designed and developed for radiation detectors with armored measurement chambers. This not only provides significant convenience to researchers but also prevents the waste of energy and liquid nitrogen.

Keywords: Detector, sample changer, Holder, Machine manufacturing.

^{1,2}Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Rize, Türkiye, yasin.karan@erdogan.edu.tr emre_yildiz20@erdogan.edu.tr

³Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Rize, Türkiye, serdar.dizman@erdogan.edu.tr

⁴Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, Rize, Türkiye, soner.tokcalar@erdogan.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-9148-1000>

²<https://orcid.org/0000-0002-5488-4396>

³<https://orcid.org/0000-0002-6511-9526>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-5159-6826>

1. Giriş

Dördüncü sanayi devriminin (Endüstri 4.0) yarattığı en köklü değişiklik “akıllı makine” kavramıdır (Cañas ve ark., 2021; Lasi ve ark., 2014). Bu devrim ile birlikte tüm fiziksel sistemlerin otomatik hale getirilmesi ve uzaktan kontrol edilmesi öngörülmektedir (Dalenogare ve ark., 2018). Ayrıca imalat sistemi ve fabrikalarda daha aktif rol alacak yeni nesil robotların sorunsuz çalışmanın yanında insanlar ile iletişiminin de olması beklenmektedir (Dalenogare ve ark., 2018). Bunlara ilaveten, bahse konu robotların yapay zekâ sayesinde öğrenmeyi temel amaç edinen algoritmalara sahip olması bu devrim süreci ile birlikte gelişim gösterecektir (Ghobakhloo ve ark., 2020).

Sanayi devrimleri ile beraber tüm makineler otomatik ve uzaktan kontrol edilebilir hale gelmektedir. Ancak, günümüzde kullanılan birçok cihaz eski tasarıma sahip olup halen manuel (elle) olarak çalışmaktadır. Mekanik cihazlar, uygun yazılım ve ek tasarımlarla otomatik ve uzaktan kontrol edilebilir hale getirilebilmektedir. Literatürde bu tür tasarımların yapıldığını gösteren çalışmalara rastlamak mümkündür (Hoshikawa ve ark., 2008; Neto ve ark., 2018; Gago ve ark., 2018; Martiel ve ark., 2020). Bu çalışma ile zırhlı ölçüm odalı manuel numune değiştiriciye sahip bir radyasyon dedektörünün (yüksek saflıkta germanyum dedektörü) uzaktan erişimle kontrol edilmesi ve kullanılması hedeflenmektedir. Bunun için uzaktan kontrollü numune değiştirme sistemi tasarlanacak ve geliştirilecektir. Bu sayede, hem araştırmacılara büyük kolaylık sağlanacak hem de elektrik ve sıvı azot israfının önüne geçilecektir. Ayrıca, zırhlı ölçüm odalı radyasyon dedektörleri birçok farklı üniversite veya kurumda kullanılmakta olduğundan bu çalışma sayesinde hem farkındalığın artması hem de bu tür sistemlerin yaygınlaşması ile enerji ve zaman tasarrufu sağlanmış olunacaktır. Bu çalışmanın temel amacı kısaca mekanik olarak inşa edilmiş ve günümüzde hala kullanılmaya devam edilen bir cihazı elektronik ve haberleşme teknolojilerini bir arada kullanarak daha kullanışlı ve verimli elektromekanik bir sistem haline getirmektir. Bu sistem geliştirilirken radyasyon ölçümünde kullanılan dedektörün mevcut yapısı değiştirilmeden ve farklı boyutlardaki numune kaplarını da ölçebilen bir tasarım olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Bu çalışma, esasen uzaktan kontrollü numune değiştirme sisteminin tasarımına ilişkin temel bilgileri içermenin yanında bazı ölçüm verilerini de sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma ile tasarlanan ve geliştirilen uzaktan kontrollü numune değiştiricisi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) üzerine monte edilerek denenmiştir. Yüksek saflıkta germanyum dedektörü yüksek voltajla (yaklaşık 5000 Volt) çalışan bir ölçüm spektrometresidir. Aynı zamanda, yüksek saflıkta germanyum dedektörünün çalışması için soğutulması gerekmekte ve bunun

içinde sıvı azot kullanılmaktadır. Sıvı azot -196 0C sıcaklığa sahip olup oda sıcaklığında çok çabuk buharlaşmaktadır. Ayrıca sıvı azot il dışından temin edilebildiği için hem ulaşılması zor hem de ekonomik olarak yüksek maliyet yaratmaktadır. Bu nedenlerle sıvı azot devar denilen saklama kaplarında tutulmaktadır ancak bu kaplarda da buharlaşma olmakta ve sıvı azot miktarı azalmaktadır. Bunlardan ötürü, hem sıvı azotun hem de kullanılan elektriğin israf edilmemesi adına yüksek saflıkta germanyum dedektöründe numune ölçümlerinin duraksamadan ve zaman kaybı olmadan devam etmesi çok önemlidir.

Yüksek saflıkta germanyum dedektörü ile çeşitli çevresel örneklerde (gıda, su, toprak, granit, seramik, vb.) gama radyasyon miktarı belirlenmektedir. Belirtilen numunelerin dedektördeki ölçümlerinde farklı ölçüm süreleri uygulanmaktadır (25000-80000 s). Dedektörde ölçüm yapılırken numune değişimleri bazen gece geç saatlere (22.00-07.00) denk gelmektedir. Yine, aynı şekilde hafta sonu numune değişimleri de insan kaynaklı ve manuel yapılmaktadır. Bu bağlamda, manuel olarak zamanında numune değişimi yapılmadığında dedektör hem elektrik sarfiyatı yapmakta hem de sıvı azot tüketmektedir. Bu da, boş yere hem elektrik enerjisi hem de sıvı azot israfına yol açmaktadır. Bu çalışma ile dedektördeki numune değişimlerinin uzaktan erişimle yapılması sağlanacak ve bu sayede hem elektrik enerjisi hem de sıvı azot israfının önüne geçilmiş olunacaktır. Ayrıca, araştırmacılara da zaman kazandıracaktır.

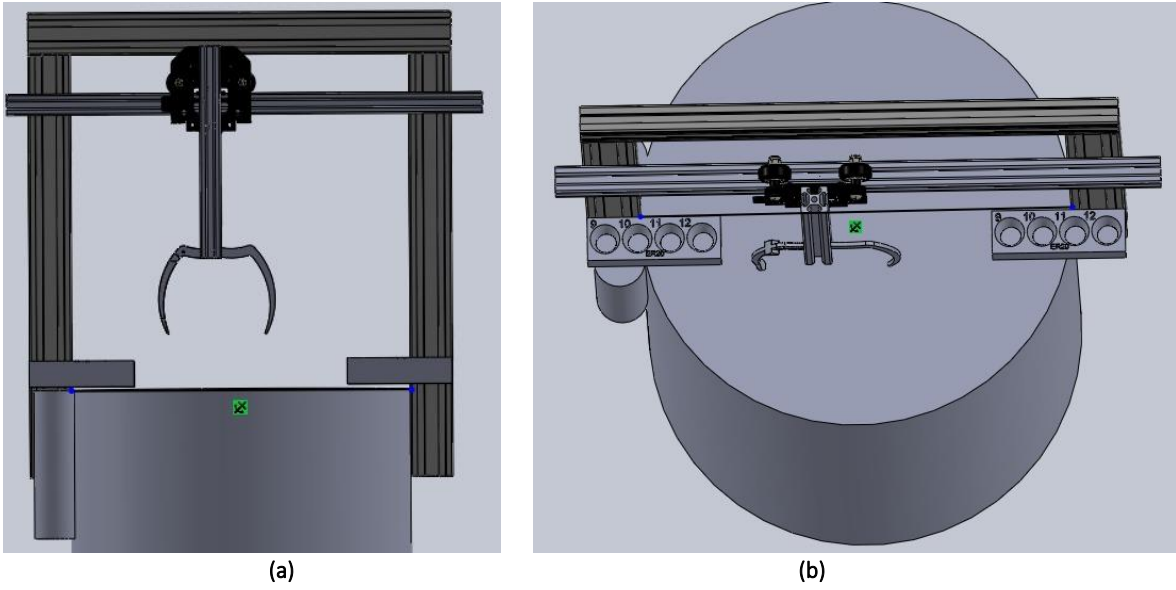
HPGe dedektörüne ait zırhlı numune odasının yandan ve üstten görünümü Şekil 1'de verilmektedir. Geliştirilecek olan uzaktan kontrollü numune değiştirici sistemi bu dedektörün fiziksel yapısına yönelik olarak tasarlanmıştır. Farklı tasarıma sahip bazı dedektörlerde numune değiştirme özelliği olsa dahi, zırhlı numune odasına sahip dedektör modellerinde numune değiştirme özelliği bulunmamaktadır. Literatürde uzaktan erişimli veya erişimsiz, otomatik veya manuel kontrollü birçok robot kolu sistemleri bulunmaktadır (Hoshikawa ve ark., 2008; Martiel ve ark., 2020; Ünlü ve ark., 2009). Ancak, bu sistemler genellikle özel bir amaca hizmet etmesi için tasarlanmaktadır.



Şekil 1. HPGe dedektörüne ait zırhlı numune odasının yandan (sol panel) ve üstten (sağ panel) görünümü.

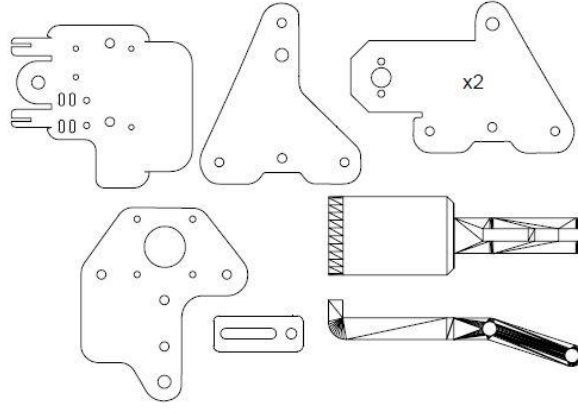
Bu çalışma iki adımda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle step motorlar ve servo motor kullanarak tutuculu hareket sistemi tasarlanıp hazırlanmış, daha sonra ise kapağın açılması için mekanik bir sistem kurulmuştur. Cihazın kapağının açıp kapanması step motoru ile kontrol edilmiştir. Numune değişim işlemi ise iki eksenli hareket sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Hareket sistemindeki tutucu vasıtasıyla numune değişimi yapılabilecektir.

Yüksek saflıkta germanyum dedektörüne ait zırlı numune odasının şekli, kapağının açılıp kapanması vb. özelliklerinden dolayı daha pratik olacağı için sayısal kontrolcü (Computer numerical control; CNC), üç boyutlu (3B) yazıcılardaki gibi bir hareket sisteminin tasarımı planlanmıştır (Çelebi ve ark., 2019; Gümüş, 2017). Bu tasarıma yönelik yapılan çizimlerin yandan ve üstten görünümü sırasıyla Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2’de görüldüğü üzere numune değiştirme sistemi direk cihazın üzerine monte edilecektir. Numune saklama yerleri kenar sigma profillerin yanında yer alacaktır. Buradan tutucu vasıtasıyla alınacak numuneler kapağın açılması ile cihazın ölçüm yerine yerleştirilecektir. Daha sonra kapak kapatılarak ölçüm için hazır hale getirilecektir.

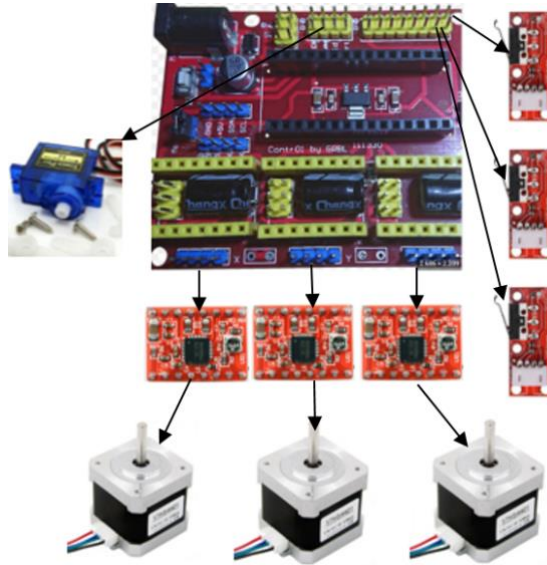


Şekil 2. Uzaktan kontrollü numune değiştiricisi tasarımının (a) yandan ve (b) üstten görünümü.

Sistemin kurulmasında A4988 Step Motor Sürücü Devresi, Arduino Nano CNC Shield, Paralel Motor Kartı (Dual Z Axis), Nema 17 HS4401 Step Motor, SG90 9G Servo Motor Mini, 3B Printer Limit Switch Mekanik Modul Endstop Switch 3 Pinli, T8 8 Hatve Trapez Mil + Somun, Kaplin 5mmx8mm, 3mm Gt2 20 Diş 6mm Kayış Avare Kasnak (Dişli), 6mm Gt2 Kasnak (20 Diş), Gt2 Kayış 6mm, V slot tekerlek, Tekerlek burçları, Tırtıklı somun, Metal Parçalar ve V Sigma Profiller kullanılmıştır. Mekanik parçaları birleştirmede kullanılacak bazı malzemeler ise sacdan kestirilmiştir. Bu malzemelerin çizimleri Şekil 3’te gösterilmektedir. Motor, motor sürücüleri, limit anahtarlar, servo motor gibi sistemin elektronik parçaları Şekil 4’te gösterilmektedir.

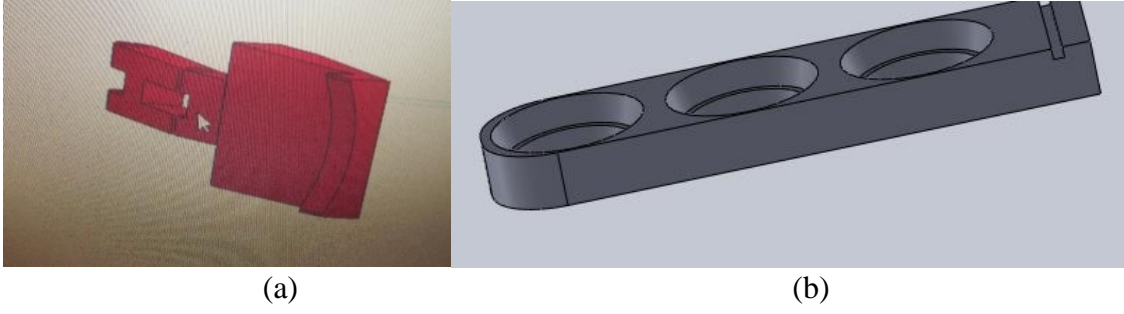


Şekil 3. Sac kesimleri yapılacak parçaların çizimi.



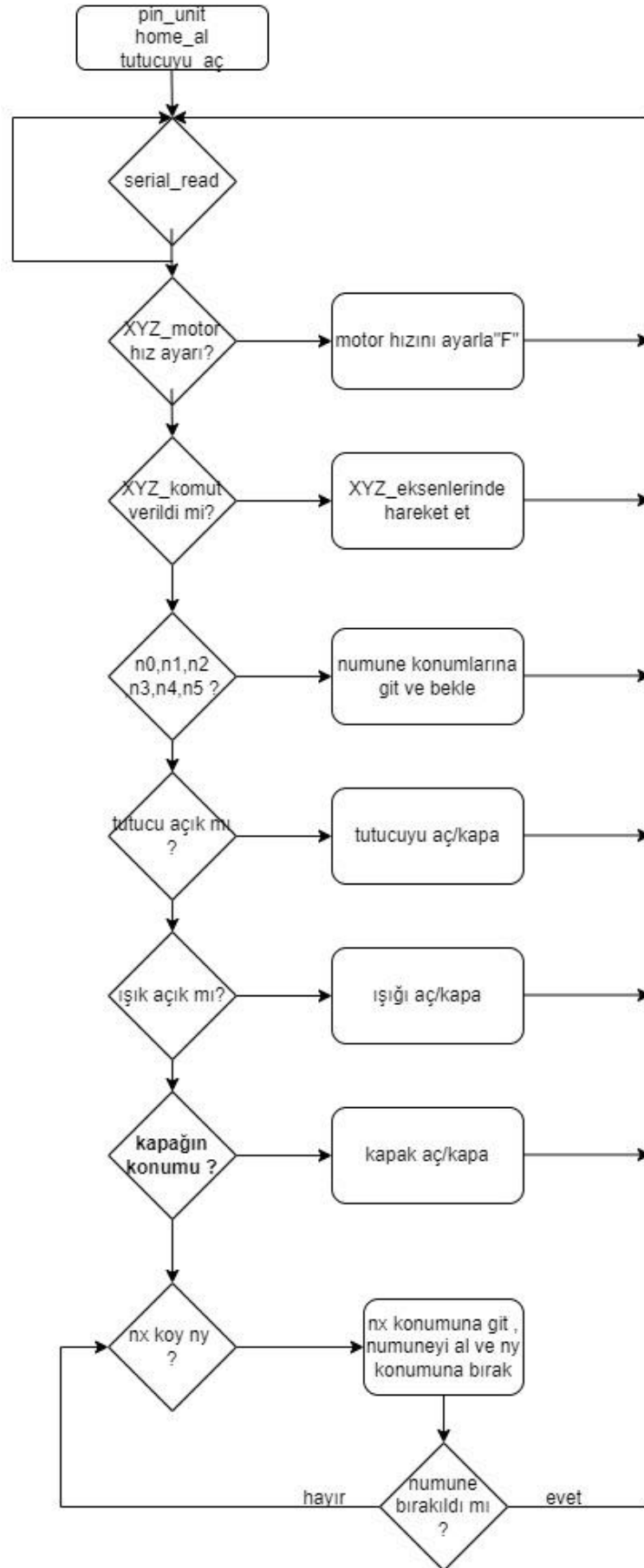
Şekil 4. Sistemin elektronik parçaları.

Yüksek saflıkta germanyum dedektörü numune değiştirici sisteminde ilk olarak iskelet sisteminin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bunun için V-Slot sigma profilleri kullanılmıştır. Y ekseninin hareketini sağlayan 20x40 sigma profili dikey olarak yerleştirilmiştir. Bu iki profili birbirine tutturmak için üst kısımdan 20x20 sigma profil ile desteklenmiştir. Sigma profilleri birbirine monte ederken sigma profiller için imal edilmiş gizli köşebentler kullanılmıştır. Böylece hem daha sağlam hem de görünüş açısından daha düzgün bir görünüm elde edilmiştir. Daha sonra X eksenindeki rayın hareketini sağlayan 20x20 v-slot sigma profili X eksenine yerleştirilmiştir. Bunun için önce lazer kesimden elde edilen metal parçaların sigma profil üzerine montajı yapılmış ve X ekseninin aynı zamanda Y eksenine dikey olarak çalışmasını sağlamak için metal parçalar üzerine V-Slot tekerlekleri monte edilmiştir. Oluşan bu parça Y eksenini oluşturan 20x40 V-Slot sigma profilin üzerine yerleştirilmiş ve tekerleklerin sigma profil üzerinde düzgün bir şekilde çalışmasını sağlamak için kalibrasyon ayarı yapılmıştır. Dedektörün kapağını açıp kapamak için de trapez mil kullanılmıştır.



Şekil 5. 3B çizimleri (a) Numune tutucu ve (b) numunelerin konulduğu parçaları.

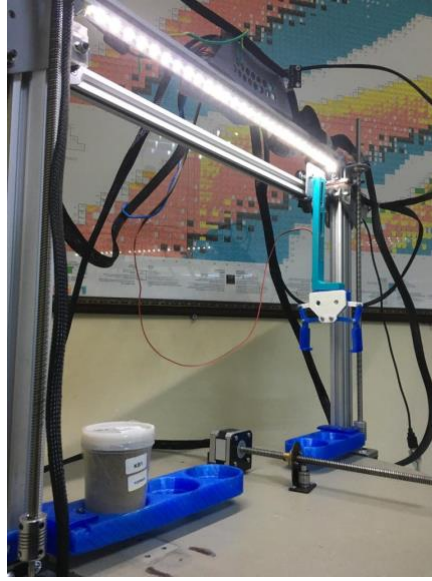
Cihazın numune tutucu kol kısımları (Şekil 5a) ve numunelerin konulacağı parçaların (Şekil 5b) tasarımı 3B çizim programı kullanılarak hazırlandı ve daha sonra bu parçalar 3B yazıcılarda basılarak cihaza monte edilmiştir. Cihazın çalışmasını sağlayacak motorları kontrol eden mikrodenetleyici kodları bu cihaza özel olarak yazılmıştır. Buna göre istenilen konuma gitme, numunelerin konumlarına gitme, numune alma ve istenilen konuma bırakma, ışığı yakma, söndürme, kapağı açma-kapama vb. özellikler sağlanacak şekilde kodlamalar yapılmıştır. Bu özellikler birer fonksiyon olarak yazılmıştır. Seri haberleşme ile bilgisayardan alınacak belli karakter dizileri ile bu fonksiyonlar aktif hale getirilmektedir. Yazılımın algoritması Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Gömülü sistem algoritması.

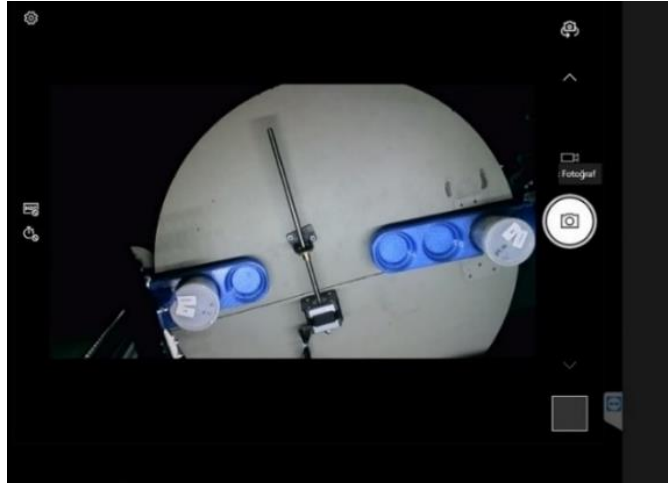
3. Bulgular ve Tartışma

Tasarlanıp geliştirilen uzaktan kontrollü numune değiştiricisi öncelikle elektronik laboratuvarında denenmiş ve donanım ve yazılımında görölen eksiklikler giderilmiştir. Numune değiştirici daha sonra Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan yüksek saflıkta germanyum dedektörüne monte edilmiştir. Uzaktan kontrollü numune değiştiricisinin detektöre montajının yapılmış hali Şekil 7’de görüntölenmektedir. Geliştirilen sistem farklı boyutlardaki numune kaplarının değişim işlemlerini de sorunsuz bir Şekilde gerçekleştirmektedir.



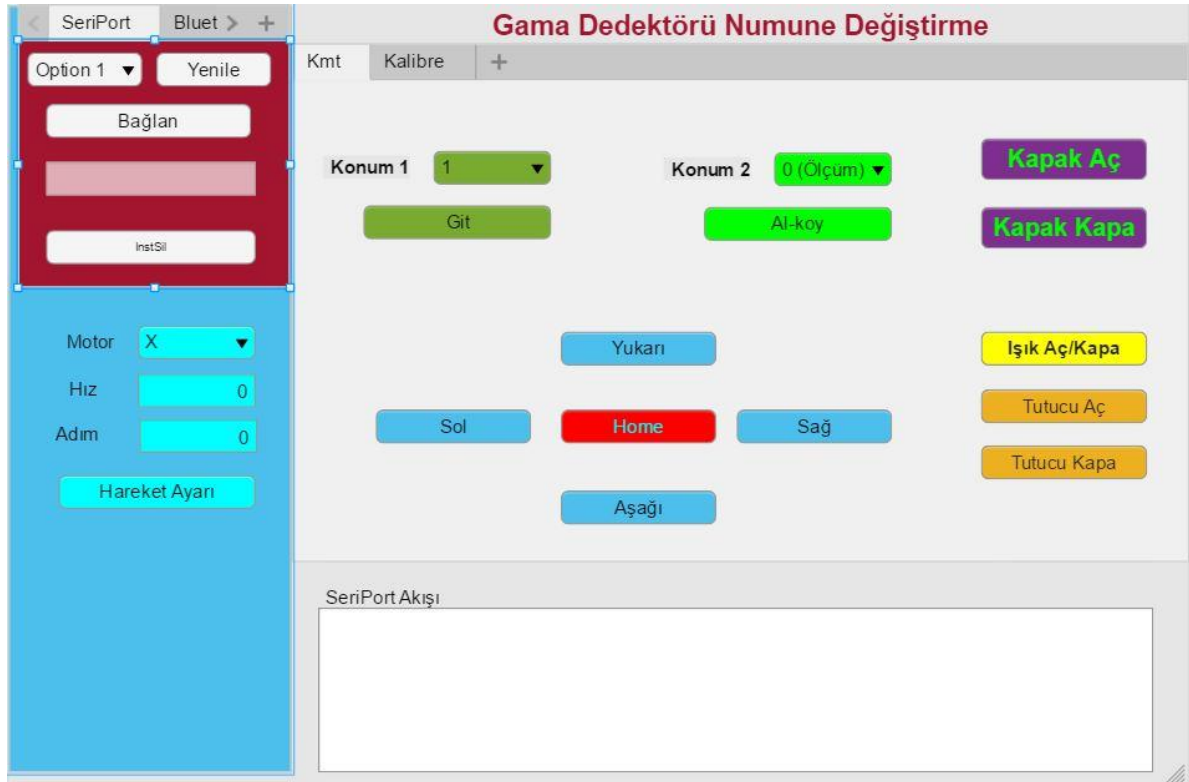
Şekil 7. Geliştirilen uzaktan kontrollü numune değiştiricisinin dedektöre montajlanmış görünümü

Yüksek saflıkta germanyum dedektörü, zırlı ölçüm odası iğerisine konulan numunenin (toprak, su, herhangi bir doğal veya yapay malzeme) yaydığı gama radyasyonunu ölçmektedir ve yapılan ölçümler bir bilgisayarda görüntölenmektedir. Tasarlanan uzaktan kontrollü numune değiştiricisi de aynı bilgisayara bağlanmıştır. Bu bilgisayara uzaktan bağlanarak numune değişimlerinin herhangi bir zamanda ve yerden yapılması sağlanmıştır. Ayrıca, cihazın üzerine yerleştirilen kamera sayesinde numune değişimi esnasında gerçekeşebilecek sorunlar gözlemlenebilmekte ve anında müdahale edilebilmektedir. Şekil 8’de gece vaktinde uzaktan bağlantı ile yapılan numune değişiminden bir görüntü gösterilmektedir.



Şekil 8. Geliştirilen cihazın gece vaktinde uzaktan kontrol edilmesi

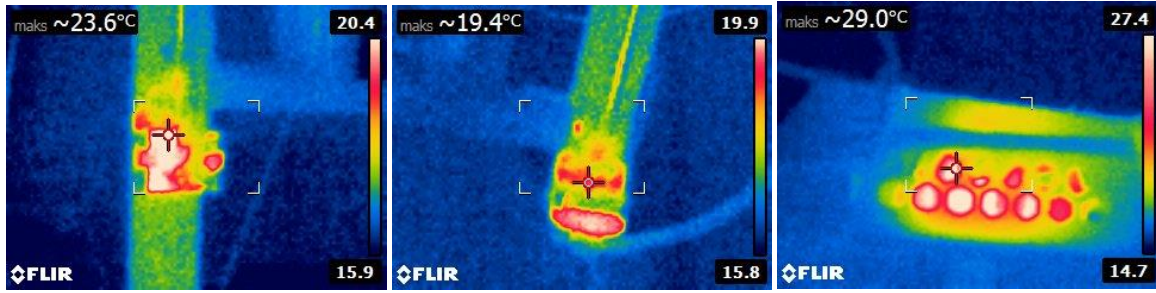
Ayrıca, araştırmacıların geliştirilen sistemi daha rahat kontrol edebilmesi için kullanıcı grafik arayüzü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu grafik arayüzü Şekil 9’da gösterilmektedir. Bu arayüz ile mikro denetleyiciye hareket komutları gönderilmektedir. Geliştirilen uzaktan kontrollü numune değiştiricisi 2022 yılının Kasım ayından itibaren kullanılmakta olup sorunsuz bir şekilde çalışmaktadır. Gerekli olduğunda hem yazılımsal hem de donanımsal olarak güncelleme yapılmaktadır.



Şekil 9. Kullanıcılar için tasarlanan grafik arayüzünün görseli

Sistemin sıcaklık tepkisi termal kamera ile incelenmiştir. Ortam sıcaklığı 14°C iken motorlardaki sıcaklığın 24°C, motor sürücü devrelerindeki sıcaklığın ise 29°C olarak ölçülmüştür.

Bu ölçümler motorlar sürekli olarak çalışırken alınmış değerlerdir. Şekil 10’da sırasıyla iki step motor ve elektronik devreden alınan termal kamera resimleri verilmiştir.



Şekil 10. Step motor ve elektronik devreden alınan termal kamera resimleri

Bu sistem yapılmadan önce ölçümlerin bitişleri gece yarısı veya hafta sonuna denk geldiğinde dedektör, boşta beklemekte ve bu süre boyunca hem sıvı azot hem de elektrik enerjisi tüketmektedir. Öte yandan, dedektörü kullanan kişi numune değiştirmek için geç saatte Laboratuvara geldiğinde, ekstrasdan akaryakıt tüketimi olacaktır. Bu durumlarda dedektör aylık olarak yaklaşık 150 saat boşta kalmaktadır. 2023 yılı başı itibariyle sıvı azot fiyatı 16 TL+KDV ve yaklaşık olarak 0,984 dolardır. Buna göre yıllık 354 dolarlık sıvı azot israf olmaktadır. Bunun yanında, elektrik sarfiyatı da olmaktadır. Tasarlanan cihaz sadece elektrikle çalışmaktadır. 12V’luk gerilimle çalışan cihaz motorların çalışma durumlarında 1,5 A – 1,9 A akım çekmektedir. Sitemin çalışma durumlarına göre çektiği akım değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Gerçekleştirilen cihazın elektrik sarfiyatı

Durum	Akım (A)	Süre (sn)	Güç (W)	Enerji (W*sn)
Kapak açma	1,88	30	22,56	676,8
Boşta aşağı	1,55	26,5	18,6	492,9
Dolu yukarı	1,11	26,5	13,32	352,98
Dolu aşağı	1,04	26,5	12,48	330,72
Boşta yukarı	1,62	26,5	19,44	515,16
Kapak kapama	1,89	30	22,68	680,4
Toplam (1 kez kullanım)				3048,96
2 kez kullanım/gün				6097,92
Boşta durması/gün	0,0105	86040	0,126	10841,04
Toplam günlük sarfiyat				16938,96

Cihaz ortalama günde iki kez kullanılmakta ve yaklaşık olarak günlük 16938 Wsn’lik bir enerji harcamaktadır. Bu da yıllık 1,717 kWh’lik enerjiye denk gelmektedir. Elektriğin 1 kWh fiyatı yaklaşık 0,09 dolardır. Buna göre cihazın yıllık elektrik sarfiyatı 0,156 dolar olmaktadır. Buna göre gerçekleştirilen cihaz, hem kullanıcıya kolaylık hem de enerji ve maddi tasarruf sağlamaktadır.

4. Sonuçlar ve neriler

Zırhlı numune odasına sahip dedektörlerde manuel olarak zamanında numune değişimi yapılmadığında dedektör hem elektrik sarfiyatı yapmakta hem de sıvı azot tüketmektedir. Bu da, boş yere hem elektrik enerjisi hem de sıvı azot israfına yol açmaktadır. Bu alışma ile hâlihazırda Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında kullanılan Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü (HPGe) uzaktan erişimle kontrol edilebilir bir cihaza dönüştürülmüştür. Uzaktan kontrollü numune değiştiricisi dedektöre uygulanırken dedektörün yapısı hiçbir şekilde değiştirilmemiştir. Bu sayede, hem araştırmacılara büyük kolaylık sağlanmış hem de elektrik ve sıvı azot israfının önüne geçilmiştir. Ayrıca, zırhlı ölçüm odalı radyasyon dedektörleri birçok farklı kurum ve işletmede bulunduğundan bu çalışma sayesinde farkındalığın artması ve bu tür sistemlerin yaygınlaşması öngörülmektedir. Geliştirilen ve kurulan uzaktan kontrollü numune değiştiricisi, diğer gama spektrometrelerine ve hatta bu şekilde numunelerin değiştirilmesi gereken diğer analitik tekniklere rahatlıkla uyarlanabilir niteliktedir. Bunun yanında, geliştirilen uzaktan kontrollü numune değiştiricisinin ticari değeri olan bir ürün olacağı beklenmektedir. řu anda uzaktan erişimle numune değişimi yapılabilen bu sistemin devamında görüntü işleme yöntemleri kullanarak otonom şekilde numune değişimi yapılacaktır. Ayrıca, Gama Dedektörü yazılımı ile ilişkilendirme yapılmasıyla uzaktan erişime gerek kalmadan tam otonom olarak numune değişimi yapılması sağlanabilecektir.

Teşekkür

Bu alışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-B kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

YK ve EY cihazın gerçekleştirilmesinde ve ölçümler alınmasında katkıda bulunmuştur. EY, YK, ST, SD alışma içerindeki cihaz tasarımı ve makale organizasyonunda katkıda bulunmuştur.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Canas, H., Mula, J., Díaz-Madroñero, M., and Campuzano-Bolarín, F. (2021). Implementing industry 4.0 principles. *Computers & industrial engineering*, 158, 107379. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107379>
- Çelebi, A., Korkmaz, A., Yılmaz, T., & Tosun, H. (2019). 3 boyutlu yazıcı ile 6 eksenli robot kol tasarım ve imalatı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 269-278.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., and Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Gago, J., Baltuano, O., Hernandez, Y., Cunya, E., Chan, R., & Bedregal, P. (2018). Design and Manufacture of a Sample Changer Made In-House for Irradiation Automation in Neutron Activation Analysis. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 49(26), No: 49053200.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of cleaner production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Gümüş, F. (2017). Bilgisayarla Bütünleőik İmalat Sistemi Tasarımı. *Mühendis Beyinler Dergisi*, 1(2), 53-69.
- Hoshikawa, A., Ishigaki, T., Nagai, M., Kobayashi, Y., Sagehashi, H., Kamiyama, T., ... & Kasao, T. (2009). Development of an automatic sample changer for iMATERIA. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 600(1), 203-206. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.11.031>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., and Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6, 239-242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Martiel, I., Buntschu, D., Meier, N., Gobbo, A., Panepucci, E., Schneider, R., ... & Wang, M. (2020). The TELL automatic sample changer for macromolecular crystallography. *Journal of synchrotron radiation*, 27(3), 860-863. <https://doi.org/10.1107/S1600577520002416>
- Neto, A.D., Menezes, M.A.B. C., Pelaes, A.C.O. and Jacimovic, R. (2018). Automatic sample changer for neutron activation analysis at CDTN, Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 315, 689-694. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5672-5>
- Unlu, K., Pearson, C., Hauck, D. K., & Kuniholm, P. I. (2009). Dating volcanic eruptions with tree-ring chemistry. *IEEE Potentials*, 28(5), 36-44. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2009.934193>