TÜBİTAK

İkincil Emisyon Elektronlarına Dayalı Kompakt Kalorimetre Tasarımı, Yapımı ve İşletimi

Program Kodu: 1001

Proje No: 113F337

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Ferhat ÖZOK

Araştırmacılar:
Prof. Dr. M. Nizamettin ERDURAN
Doç. Dr. Taylan YETKİN
Doç. Dr. E. Aslı YETKİN

Danışman:
Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN

MART 2017
İSTANBUL

Önsöz

“İkincil Emisyon Elektronlarına Dayalı Kompakt Kalorimetre Tasarımı, Yapımı ve İşletimi“ başlıklı projemizde yüksek enerji ve nükleer fizik deneyleri için ikincil emisyon elektronları kullanılarak kompakt ve modüler bir kalorimetrenin tasarlanması, üretilmesi ve test edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda öncelikle ikincil elektron emisyon (SEE) üretimi için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları için GEANT4 kullanılmıştır. Simülasyonlar için GEANT4 SEE Fizik sınıfı hazırlanmış test edilmiştir. Simülasyon verilerinin ışığında kalorimetre bileşenlerinin tasarımı üretimi ve testleri yapılmıştır.

Bu çalışma TÜBİTAK 113F337 numaralı projesi kapsamında desteklenmektedir.

İÇİNDEKİLER

Önsöz	i
İçindekiler	ii
Şekil Listesi	iii
Tablo Listesi	v
Özet	vi
Abstract	vii
1.Giriş	1
2.Literatür Özeti	3
3.Gereç ve Yöntem	5
3.1. Geant4 Simülasyon Çalışmaları	5
3.1.1. ROOT Tabanlı İEE Simülasyon Paketi	6
3.1.2. GEANT4 İEE Sınıfının Hazırlanması ve Testleri	11
3.2. Kalorimetre Tasarımı	15
3.3 Voltaj Bölücü ve Sinyal Toplayıcı Devre Tasarımı	16
3.4. Araştırma Laboratuarları	17
4. Bulgular ve Sonuçlar	19
4.1. Detektör Simülasyonları ve Literatür ile Karşılaştırılması	19
4.2. Prototip İnşası	22
4.3. Elektronik Kartların Tasarım Test ve Üretimleri	25
5.Tartışma Sonuç	28
Kaynaklar	30

Şekil Listesi

Şekil 1: İkincil Emisyon elektron Simülasyon paketi ara yüzü **6**
Şekil 2: (Sol) Simülasyon paketi kullanılarak gönderile elektron enerjisine göre ikincil emisyon eldesi gösterilmiştir. Mavi renkle gerçek ikincil elektron eldesi, yeşil rediffused elektron eldesi, kırmızı ile geri tepen elektron eldesi gösterilmiştir. Siyah çizgiler ise toplan ikincil elektron eldesini göstermektedir. "Data" noktaları ise [21] nolu makaledeki Fig.6'dan alınmıştır. (Sağ) Alkalisi aşınmış alüminyum alaşım yüzey için verilen ikincil elektron eldesi dağılımı [22] **8**
Şekil 3: 10 eV elektron demeti için ikincil elektronların enerji spektrumu. Data" noktaları ve MC (PhysRevSTAB.5.124404) dağılımı [21] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır. **8**
Şekil 4: 30 eV elektron demeti için ikincil elektronların enerji spektrumu. Data" noktaları ve MC (PhysRevSTAB.5.124404**)** dağılımı [21] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır. **9**
Şekil 5: a-) 295 eV elektron demeti için ikincil elektronların tüm enerji spektrumu. b-) Bu spektrumun 50 eV'a kadar olan kısmı. "Data" noktaları ve MC (PhysRevSTAB.5.124404) dağılımı [21] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır. **9**
Şekil 6: (Sol) Bakır yüzeye dik olarak çarptırılan 20, 40 ve 100 eV elektron demetleri için ikincil elektronların enerji spektrumu. (Sağ) Aynı birincil elektron enerjilerine sahip elektronların Altın yüzeye çarptırılması sonucu elde edilen ikincil elektron enerji spektrumları [18]. **11**
Şekil 7: 10 keV enerjili elektron tabancası kullanılarak üretilen 10 olayın izleri **11**
Şekil 8: 20 keV enerjili elektron tabancası kullanılarak üretilen simülasyonların karşılaştırılması. Sol: İkincil emisyon elektronların sayısı (mavi ROOT tabanlı algoritma, kırmızı Geant4 tabanlı algoritma). Sağ: İkincil emisyon elektronların enerji spektrumu (mavi ROOT tabanlı algoritma, kırmızı Geant4 tabanlı algoritma) **12**
Şekil 9: 10 katmandan oluşan plastik ışıldayıcılı örnekleme kalorimetresi(2cm kurşun soğurucular arasında aktif algıç olarak1cm plastik ışıldayıcı bulunmaktadır) **12**
Şekil 10: (a) 30GeV, (b) 50 GeV ve (c) 100 GeV elektron demeti için kalibre edilmiş toplam enerji birikimi **13**
Şekil 11: 10 katmandan oluşan ikincil emisyon modülü kalorimetresi (2cm kurşun soğurucular arasında aktif algıç olarak ikincil emisyon modülleri konulmuştur.) **14**
Şekil 12: (a)30GeV,(b)50 GeV ve (c)100 GeV elektron demeti için kalibre edilmiş toplam enerji birikimi **14**
Şekil 13. Detektör Tasarımı için teknik çizimler. Sarı renkte gösterilen veri okuma ve besleme için elektronik kart, kırmızı kablo dynode besleme kabloları ve sinyal kablosudur. Şeklin 3. sırasında görünen çerçeveler dynode çerçeveleridir. Orta sırada bakır meshler ile

dynode çerçeveleri gözükmektedir
16
Şekil 14: HV Bölücü Devre Şeması. Bu devre ile Katot ile Anot arası bölme yapılarak farklı tabakalara farklı HV değerleri verilebilmektedir. **17**
Şekil 15: MSGSU Detektör Tasarım Ar-GE Laboratuarı **18**
Şekil 16: YTU Fizik Bölümündeki Laboratuarı **18**
Şekil 17: Değişik enerjilerdeki elektron demeti için İkincil elektron eldesi (sol) ve 10 eV enerjili elektron demeti için İEE spektrumu (sağ). **19**
Şekil 18: Geant4 Simülasyon çalışmalarında kullanılan kalorimetre modülünün şematik gösterimi **20**
Şekil 19: 10 GeV (sağ) ve 50 GeV (sol) elektron demetleri için kalorimetre yanıtı **20**
Şekil 20: İEE ve sintilatör kalorimetreleri için elektromanyetik sağanağa dedektör yanıtının lineerliği **21**
Şekil 21: Elektromanyetik sağanak için İEE ve sintilasyon kalorimetreleri için enerji çözünürlüğü **22**
Şekil 22: Bakır mesh **22**
Şekil 23: Dynode Çerçeveleri **23**
Şekil 24: Bakır mesh örtülerin hazırlanması **23**
Şekil 25: Dynodeların üretimi için çerçevelerin bakır örtüye yapıştırılması **24**
Şekil 26: Dynodeların üretimi **24**
Şekil 27: Dedektör gerilim bölücüsünün elektronik şeması. **25**
Şekil 28: Dedektör gerilim bölücüsünün PCB tasarımının ön ve arka yüzü. **26**
Şekil 29: Dedektör gerilim bölücüsünün üretilmiş PCB'si. **26**

Tablo Listesi

Tablo 1: 10 eV electron için [21] nolu makaleden sayısallaştırılmış enerji ve ikincil emisyon kazanç değerleri. X değerleri enerjiyi (eV), Y değerleri ise dδ/dE'yi vermektedir **10**

Tablo 2: 30 eV electron için [21] nolu makaleden sayısallaştırılmış enerji ve ikincil emisyon kazanç değerleri. X değerleri enerjiyi (eV), Y değerleri ise dδ/dE'yi vermektedir. **10**

Tablo 3: 295 eV electron için [21] nolu makaleden sayısallaştırılmış enerji ve ikincil emisyon kazanç değerleri. X değerleri enerjiyi (eV), Y değerleri ise dδ/dE'yi vermektedir. **10**

Tablo 4: Kurşun+Işıldayıcı kalorimetresi için ölçülen enerjiler ve enerji çözünürlüğü **13**

Tablo 5: Kurşun+SEE kalorimetresi için ölçülen enerjiler ve enerji çözünürlüğü **15**

Tablo 6: İEE ve sintilasyon kalorimetreleri için enerji yanıtı ve çözünürlüğü **21**

Tablo 7: Gerilim bölücüsünün SPICE simülasyonu ve ölçüm sonuçları **26**

Özet

Yüksek enerji fiziğinde ve nükleer fizikte parçacıkların enerjilerini ölçmede en çok uygulanan yöntemlerden birisi kalorimetre ile enerji ölçümüdür. Kalorimetreler, birincil parçacıkların oluşturduğu parçacık sağanaklarının kristal gibi homojen maddeler ya da kuartz veya plastik sintilatör gibi örnekleme maddeleri kullanılarak taşıdıkları enerjinin önce ışık, ve daha sonrasında da foto-dedektör kullanarak sinyale dönüştürülmesine dayanır. Kristal malzemeler veya plastik sintilatörden yapılan kalorimetreler günümüzdeki yüksek radyasyon ortamında çalışan deneylerde uzun dönemde sinyal verimi ve kalibrasyon için sorun teşkil etmekte, aynı zamanda çok yüksek hızlı tetikleme ve olay seçimi algoritmaları için kimi zaman hızlı ve dar genişlikli sinyal üretememektedirler. Kuartz malzemeler kullanılarak yapılan kalorimetreler hem hızlı ve dar sinyal üretmesi hem de yüksek radyasyona çok dayanıklı olmasına karşın, GeV başına foto-elektron sayısı olarak da ifade edilebilen, yüklü parçacık başına üretilen sinyal miktarının düşüklüğü ve hadronik sağanak yapan parçacıkların sadece elektromanyetik kısımlarına hassas oldukları için çoğunlukla yüksek enerji çözünürlüğü gerektirmeyen dedektör bölgelerinde kullanılmaktadır. Bu nedenle kalorimetre Ar-Ge çalışmalarının çoğu bu boşluğu dolduracak yeni malzeme ve dedektör tasarımlarına odaklanmaktadır. Tasarlanan kalorimetre modülü, ikincil emisyon elektronların üretilmesi ve çoğaltılması tekniğine dayalı olup, yüksek radyasyona dayanıklı, hızlı sinyal veren foto-çoğaltıcılarda kullanılan malzemeler kullanılmıştır.. Bu sayede yukarıda sayılan kalorimetrelerin performansından daha iyi bir performans elde etmek ve modüler yapısı nedeni ile farkı geometrilerde ve kalınlıklarda diziler ile hem elektromanyetik hem de hadronik kalorimetre amaçlı olarak kullanılabilecektir. Ayrıca, önerilen kalorimetrenin Ar-Ge ve yapımı aşamalarında ortaya konulacak ve bilimsel literatüre kazandırılacak bilgi, yüksek enerji fiziğinde kullanılan kalorimetre teknolojileri arasında alanında öncü bir rol oynayacaktır. Bunların yanı sıra, deneysel fiziğin pek çok alanında yaygın olarak kullanılan açık kaynaklı Geant4 simülasyon paketine ikincil emisyon elektron sürecinin düşük enerjili süreçler listesine, ihtiyacı karşılayacak şekilde bu projenin çıktısı olarak yerleştirilmesi, hem kalorimetre malzemesi simülasyonu hem de foto-çoğaltıcı simülasyonlarında bilimsel çalışmalarda çok sıklıkla kullanılacak bir katkı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kalorimetre, Örnekleme tipi detektörler, Parçacık sağanakları, İkincil emisyon elektron

Abstract

Energy measurement by using calorimeters is by far the most used method in high energy and nuclear physics. Calorimeter technique is based on converting the energy of secondary particles from the showering primary particle into light by using homogeneous crystal, quartz or plastic scintillators as sampling materials, and then producing signal from the collected light by using photo-detectors. Calorimeters made from crystals or plastic scintillators are found to be insufficient for today's high radiation environment experiments, and at the same time are not very suitable for very fast triggering and event selection algorithms based on their signal production timing and signal width. On the other hand, calorimeters based on quartz material produce both fast and narrow signals, and also radiation hard. Nevertheless their signal strength per charged particle, also known as photo-electron/GeV, is low and they are mostly sensitive to the electromagnetic core of the hadronic showers. Because of these they are commonly used in the detector regions where very high energy resolutions are not necessary. The calorimeter module is based on a detection technique where secondary emission electrons are produced and multiplied. The design of the calorimeter will be based on material which are commercially available, radiation hard, fast signal producing and used already in conventional photo-multipliers. Thus, it will be ensured that the calorimeter module will have better performance than other types of calorimeter described above, and thanks to its modular design it can be build in different geometries and arrays for electromagnetic and hadronic energy measurements. Also, adding secondary emission process to Geant4, an open source simulation package which is widely used in experimental physics, as a low energy physics process will contribute both to the calorimeter material and photo-multiplier simulations, both of which are highly sought after in scientific studies.

Keywords: Calorimeter, Sampling type detector, Particle shower, Secondary Emission Electron

1.GİRİŞ

Bu projenin amacı, yüksek radyasyon ortamlarında (elektron, foton, nötron, proton gibi) parçacıkların enerjilerini örnekleme yapan tabakalardan ikincil emisyon elektronlarını üretip çoğaltarak sinyal üretmek için kullanan bir kalorimetre modülü tasarlamak, imal etmek ve işletmektir.

Parçacık fiziği ve nükleer fizikte kullanılan kalorimetreler parçacıkların özelliklerinin kullanılan madde içerisinde tamamen soğurularak belirlenmesine dayanır. Özellikle parçacık fiziğinde çok kullanılan kalorimetre yöntemi yüksek Z elementlerden yapılan soğurucu ile etkileşen yüksek enerjili parçacıkların oluşturduğu elektromanyetik ve hadronik sağanakların (shower) ışıma yapan (sintilasyon ya da Cherenkov) diğer maddelerle (aktif bileşenler) etkileştirerek enerjilerini ölçmedir. Bu tip kalorimetrelerde yüksek enerjili deneylerde karşılaşılan en büyük sorun aktif bileşenlerin zamanla radyasyon nedeniyle sinyal üretme etkinliğini kaybetmeleri ve hassas ölçümler için gerekli olan kalibrasyon yöntemlerinde bu radyasyon etkilerinin etkisinin tamamen ortadan kaldırılamayışıdır.

Kullanılacak teknik nedeni ile yoğunluğu, aynı amaçla üretilen kalorimetrelere göre yarı yarıya kadar az olan ve geliştirilecek tasarım yoluyla benzerlerine göre daha küçük (kompakt) olan bu kalorimetrenin öncelikli uygulama alanı halen Avrupa'da çalışmakta olan hızlandırıcı komplekslerindeki yüksek radyasyonda çalışacak olan yeni dedektör sistemlerine entegre edilerek parçacık enerji ölçümlerinin yapılmasıdır. Dedektörü farklı biçimlerde üretme kolaylığı, benzeri dedektörlere göre daha ucuza yapılması ve aktif kısımların normal vakum gerektiren şartlarda birleştirilebilmesi kolaylığından dolayı önerilen bu kalorimetrenin, uluslararası merkezlerde tasarlanan deneylerin enerji akışını ölçecek kısımlarda, radyasyonun çok yüksek olduğu huzme demetlerinin geçtiği borulara yakın kısımlarda ve diğer kalorimetre (örneğin elektromanyetik bir kalorimetre ile) birbirini takip edecek şekilde kurularak elektromanyetik sinyal/hadronik sinyal yanıtını telafi edecek kombinasyonlarda kullanılması mümkün olacaktır.

Geliştirilmekte olan bu kalorimetre temel olarak, ışıma yapan aktif bileşen ve ışığı sinyale çeviren foto-sensörler kullanmak yerine, doğrudan elektromanyetik ve hadronik sağanaktaki parçacıkların ikincil emisyon elektronları oluşturacak malzeme ve sinyal çoğaltıcıdan tasarlanan aktif bileşenlerin kullanılmasına dayandığı için, MeV ya da GeV mertebelerinde yüksek verimli doğrudan iyonizasyon dedektörü olacaktır. İkincil emisyon elektronları üretmek için alkali antimonide, berilyum oksit (BeO), magnezyum oksit (MgO), galyum fosfit (GaP) ve galyum arsenit fosfit (GaAsP) gibi maddelerle kaplanmış nikel, çelik ya da bakır-berilyum alaşımından yapılmış elektrotlar kullanılması sayesinde sinyal üreten ve yükselten bu aktif

maddenin O(100) GRad'ler seviyesinde radyasyon dayanıklılığı vardır. Geant4 simülasyon paketi ile farklı sinyal katodu malzemelerinin ve dynode yapılarının değerlendirilmesi için simülasyon çalışmaları yapılmakla beraber, döviz kurlarındaki artış, temin edilebilme kolaylığı ve maliyet gibi nedenlerle proje kapsamında bakır dynodeların kullanılmasına karar verilmiştir ve dynode malzesi olarak bakir mesh kullanılmıştır.

2. Literatür Özeti

İkincil emisyon elektronların parçacık dedektörü olarak kullanılabileceği fikri ve ilk kullanım biçimleri 1970'lere kadar gitmektedir. 1970'li yıllarda hüzme kayıp sisteminin bir parçası olarak ilk kez CERN'de alüminyum katot elektron çoğaltıcıları kullanılmıştır. Bu cihaz esasen endüstriyel olarak üretilen bir fototüpün foto-katodunun bir alüminyum katot ile değiştirilmiş halidir [1]. Son yıllarda bu yöntemin hızlandırıcılarda sıklıkla kullanıldığı durumlar ile karşılaşmaktayız [2, 3, 4]. Özellikle yapısının basit, sağlam ve üretiminin ucuz olması nedeniyle hızlandırıcı görüntüleme sistemlerinde kullanılmaktadır. Aynı zamanda yüksek radyasyona dayanıklı metal ve metal kaplamalarla üretildiğinden hızlandırıcıların çok ağır radyoaktif çalışma ortamlarında sorunsuz çalışmaktadırlar [3]. İkincil emisyon elektronlarının sayılmasına dayanan bu yöntemde, 1974'de Greupner ve arkadaşlarının önerdiği gibi [5], aygıta gelen birincil parçacıklar bir iyon-elektron dönüştürücüsü yardımıyla ikincil elektronlara dönüştürülüp çoğaltılmaktadır. Bu model aslında günümüzde kütle spektrometresindeki iyon algılamasının temelidir [6]. Bununla beraber, elektron çoğaltma teknolojisi aynı zamanda foto-çoğaltıcılarda da sıklıkla kullanılmaktadır [6]. Yukarıda sayılan örnekler ikincil emisyon elektronların doğrudan parçacık dedektörü olarak kullanıldığı ilk uygulamalardır. Günümüzdeki hızlandırıcıların ulaştığı enerji seviyelerinde yeni parçacıkların üretilip ölçümlerinin yapıldığı dedektör merkezlerinde, özellikle hüzme demetine yakın bölgelerde, çok yüksek radyasyona dayanıklı parçacık dedektörlerine ihtiyaç vardır. Kalorimetrelerin dayandığı temel çalışma ilkesi olan ve kalorimetre ortamına giren birincil parçacıkların oluşturduğu sağanak biçimindeki ikincil parçacıkların enerjilerini aktif madde kullanarak fotona çeviren yöntemde karşılaşılan en temel sorun (genellikle kristal ya da plastik sintilatör olan) aktif malzemelerin radyasyona çok dayanıklı olmaması ve ilk iki-üç yıldan itibaren ışık kazancında (gelen parçacık başına üretilen foton sayısı) düşmelerin gözlenmesidir [7].

X-ışını ile görüntüleme (örneğin [8, 9]), Tokamaklar gibi plasma hapseden cihazların sıcaklıklarının belirlenmesinde sorun teşkil eden yüksüz parçacıkların taşıdıkları enerjilerin ölçülmesinde (örneğin [10, 11]), protonların kullanıldığı kanser tedavilerinde hüzme görüntülenmesinde [12], olduğu gibi çok farklı alanlarda kullanılan ikincil emisyon elektron mekanizmasının kalorimetre uygulamaları yok denecek kadar azdır. Özellikle 1990'larda karşımıza çıkan ilk fikirler ve üretilen prototipler [13,14] ikincil emisyon elektronlarla ilgili yeterli bilginin olmayışı, elektron çoğaltıcı yapıların günümüzdeki kadar geliştirilememiş ve teknolojinin pahalı olması gibi nedenlere yüksek enerji fiziğinde çok fazla uygulama alanı bulamamıştır. Bu çalışmalarla ortaya konulan bilgi ve kalorimetre karakteristikleri günümüzdeki ihtiyaca yanıt verecek nitelikte değildir.

Yukarıda verilen bilgilerin ışığında, bu proje ile ortaya konan ikincil emisyon elektron algılanmasına dayalı kalorimetre tasarımı modern yüksek enerji fiziği deneylerinin çalışma ortamına uygun, sinyal hızı belirlenmesi iyi yapılmış ve gerekli tetikleme mekanizmalarıyla uyumlu, modüler bir tasarım izleneceği için hem elektromanyetik hem de hadronik enerji ölçümlerinde kullanılabilecek bir kalorimetre olacaktır.

3. Gereç ve Yöntem

3.1. Geant4 Simülasyon Çalışmaları

İsmini GEometry ANd Tracking (geometri ve iz sürme) kelimelerinden alan Geant4, nesne tabanlı C++ programlama dilinde hazırlanmış Monte Carlo metodlarını kullanarak hesaplama yapan bir yazılım paketidir. Yüksek enerji, nükleer ve parçacık fiziği deneylerinde detektörle parçacık etkileşimlerini simüle etmek amacıyla CERN de (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) geliştirilmiştir. Geant4 simulasyon paketi ile, ilgili parçacık sıfır kinetik enerjiye ulaşıncaya kadar veya bir etkileşme sonucu yok oluncaya kadar, parçacığın madde ve dış elektromanyetik alanlarla etkileşmeleri dikkate alınarak adım adım taşınımı yapılır. Bu simulasyon paketi, sistemin geometri ve malzeme bilgisini, ilgili temel parçacıkları, birincil olayların üretilmesini, parçacıkların sistem boyunca izlenmesini, parçacık etkileşimlerini belirleyen fizik süreçlerini, dedektör cevabını, olay (event) verilerinin oluşturulmasını, olay ve iz bilgilerinin depolanmasını, dedektör ve parçacık yörüngelerinin görselleştirilmesini gerçekleştiren kodları içerir. Ayrıca Geant4 ün önemli özelliklerinden biri de ana program içerisinde G4UI yöneticisi (Geant4 User Interface) kullanılarak makro dosyalarının kullanımını sağlanmaktır. Bu sayede yazılan programın özelliğine göre, program içerisinde değişiklik yapılmadan makro dosyalar üzerinde değişiklik yaparak istenilen simülasyon özellikleri değiştirebilir. Geant4' ten alınan çıktılar AIDA, JAIDA ve ROOT gibi farklı analiz ve Qt görüntüleme programları ile incelenebilmektedir. Simulasyonların gerçekleştirilmesi için üç temel sınıfın (class) tanımlaması zorunludur. Bunlar;

- DetectorConstruction; bu sınıfta geometri ve malzeme bilgilerinin tanımlanması yapılır.
- PrimaryGeneratorAction; birincil olay üretimi ile ilgili bilgileri (birincil parçacığın kimliği, başlangıç konumu, enerji vs) içerir.
- PhysicsList; kullanılan fiziksel süreçleri, parçacık etkileşimlerini ve temel parçacık bilgilerini içerir.

Simulasyon esnasında hiç bir şekilde geometri ve malzeme özellikleri değiştirilemeyeceğinden bu tanımların ilk başta yapılması gereklidir. Bunun için Construct() metodu uygulanarak dedektörün konumu, malzemesi ve pozisyonu tanımlanır. Dedektör hacminin tanımlanması üç aşamada gerçekleştirilir.

Katı hacim : küre, silindir, koni vs. gibi katı hacimler tanımlanır.

Mantıksal hacim :Katı hacime ait malzeme, duyarlılık, varsa elektromanyetik alan ve görsel özellikler tanımlanır.

Fiziksel hacim : Konumu, dönüşü ve gerekliyse çoklu kopyalanması yapılır.

Geant4 de ikincil emisyon elektronlarını (İEE) doğrudan hesaplamak için yazılmış GEANT4 kütüphaneleri içerisinde özel bir fizik sınıfı yoktur. Bu nedenle ikincil emisyon elektronlarının da katıldığı simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için Geant4 içerisinde yeni bir fizik sürecinin tanımı yapılmalıdır. Bu amaçla Furman'nin ikincil emisyon elektronlarının simülasyonu için sunduğu model [21] kullanılarak yazılan G4Secondary olarak adlandırılan ikincil emisyon fizik sınıfı Geant4 kütüphanesine eklenmiştir. Furman ve Pivi tarafından sunulan bu modelde de toplam verim , elastik geri saçılma verimi, re-difused elektronlar ve gerçek ikincil elektronlar verimlerinin toplamı olarak tanımlanmıştır. Gerçek ikincil emisyon elektronlarının enerji dağılımı için henüz kesin bir model yoktur. Furman ve Pivi diğer grup elektronları için var olan modellerde ki verim ve enerji dağılım ifadelerini ve de deneysel verilerin fit edilmesi sonucu hesapladıkları katsayıları kullanarak yeni bir model üretmeye çalışmışlardır. Furman ve Pivi tarafından önerilen modelleme kullanılarak Geant4 fizik kütüphanesine eklenmek üzere ikincil elektron emisyon fizik sınıfı oluşturulmuştur. Furman ve Pivi'nin makelesinde verilen modelden yararlanılarak öncelikle ROOT analiz paketi kütüphanelerini kullanan bir simülasyon kodu hazırlanmış ve test edilmiştir. Yazılan bu kod ile yapılan simülasyonlar ile literatürdeki sonuçlar karşılaştırılmış ve doğruluğu test edilmiştir. İkinci aşama olarak yazılan bu kod, GEANT4 fizik kütüphaneleri içerisinde tanımlanmış olan fizik sınıflarının formatına uygun hale getirilerek, GEANT4 içerisindeki fizik süreçlerine eklenmiştir. Böylelikle simülasyonlarda bu fizik sürecinin kullanımı sağlanmıştır.

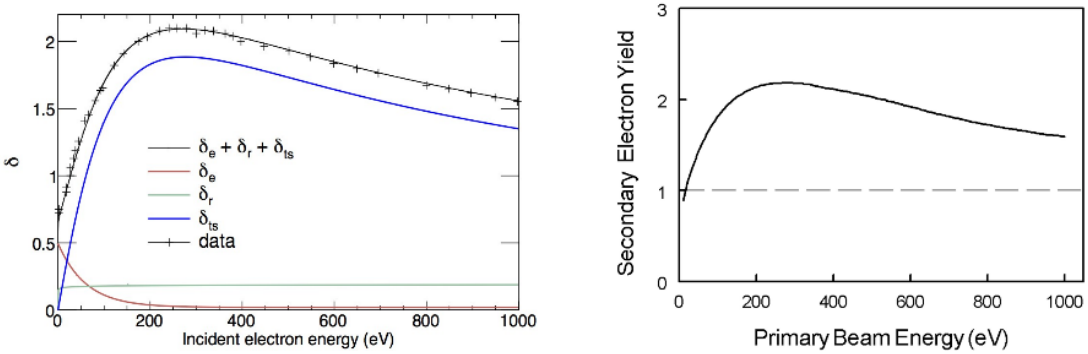
3.1.1 ROOT Tabanlı İEE Simülasyon Paketi

M.A Furman ve M.T.F. Pivi'nin önerdiği yöntem kullanılarak açık kaynak kodlu bir simülasyon paketi hazırlanmıştır. ROOT [9] tabanlı olarak yazılan bu simülasyon paketi için ayrıca bir de ara yüz hazırlanmıştır. Şekil 1 de hazırlanan simülasyon paketinin ara yüzü görülmektedir.



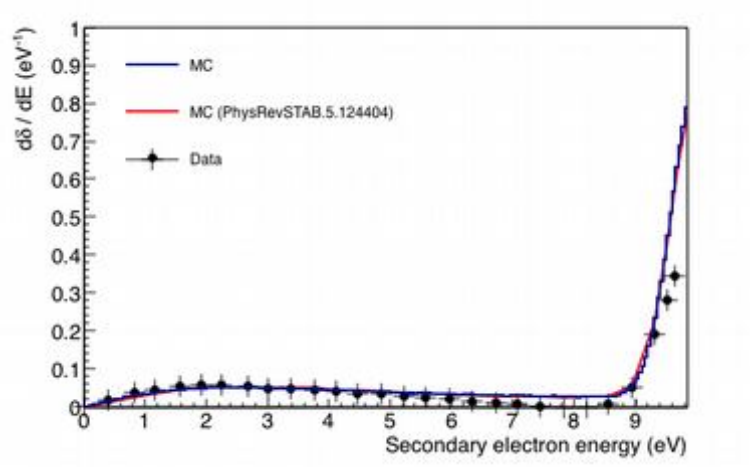
Şekil 1. İkincil Emisyon elektron Simülasyon paketi ara yüzü

Ara yüzün amacı, kullanıcıların ihtiyaç duyabilecekleri değişiklikleri kod üzerinden yapmak yerine ara yüz kullanarak yapabilir hale gelmesidir. Bu şekilde süreç içinde oluşabilecek hataları minimuma indirmek hedeflenmektedir. Simülasyon çıktılarının gösterildiği Şekil 2,3 ve 4 de “data” ve “MC (PhysRevSTAB.5.124404)” olarak verilen dağılımlar Ref.[21]'de verilen makaleden alınmıştır. Bu makalede kullanılan veriler erişime açık (public) değildir ve makale içinde “Data courtesy of N. Hilleret for chemically cleaned but not in situ vacuum-baked samples.” şeklinde kişisel teşekkürle belirtilmiştir. Bu nedenle bu verilere erişmek için, aşağıda verilen, alternatif bir yöntem kullanılmıştır. Bu rapor döneminde simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen çıktıların doğruluğunu test edebilmek için çıktıların [21] nolu makalede gösterilen veriler ve bu verilere Monte Carlo çalışmasına dayanan bir yöntemle yapılan fit çizimlerinin karşılaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla [21] nolu makaledeki Fig.7'de “data” ve “fit” olarak gösterilen dağılımlar “Plot Digitizer” yazılımı (http://plotdigitizer.sourceforge.net/) kullanılarak yeniden çizdirilmiştir. Bu yazılım yardımıyla bir histograma ait x ve ye eksenleri tanımlanmış, ve mouse ile belirlenen histogramın her hangi bir noktası için x ve ye değerleri program yardımıyla belirlenmiştir. Bu yöntem kullanılarak elde edilen veri noktalar ise ROOT paketinin TGraph sınıfı kullanılarak çizdirilmiştir. Böylelikle [21] nolu makalede verilen sonuçlar bu projede yürütülen simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen çıktılarla karşılaştırılmıştır. Şekil-2 ile gösterilen gelen elektron enerjisine karşılık ikincil emisyon değerleri grafiğindeki “data” değerleri [21] nolu makaledeki Fig.6'dan alınmıştır. Bu veriler bakır bir yüzeye gönderilen farklı enerjiye sahip elektronlara karşılık elde edilen ikincil elektron eldesini göstermektedir. Proje çalışmamızdaki simülasyon çalışmalarının sonuçları ikincil elektronların her bir bileşenin başarılı şekilde tanımlanabildiğini göstermekte ve bu bileşenlerin toplamının gerçek ikincil elektron eldesiyle tutarlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen ikincil elektron emisyonu sonuçları [22] nolu makaledeki Fig.4'ten alınan ve aşağıda Şekil 2 sağda gösterilen (alkalisi aşınmış alüminyum alaşım yüzey için verilen) dağılımla karşılaştırılabilir sonuçlar vermiştir.

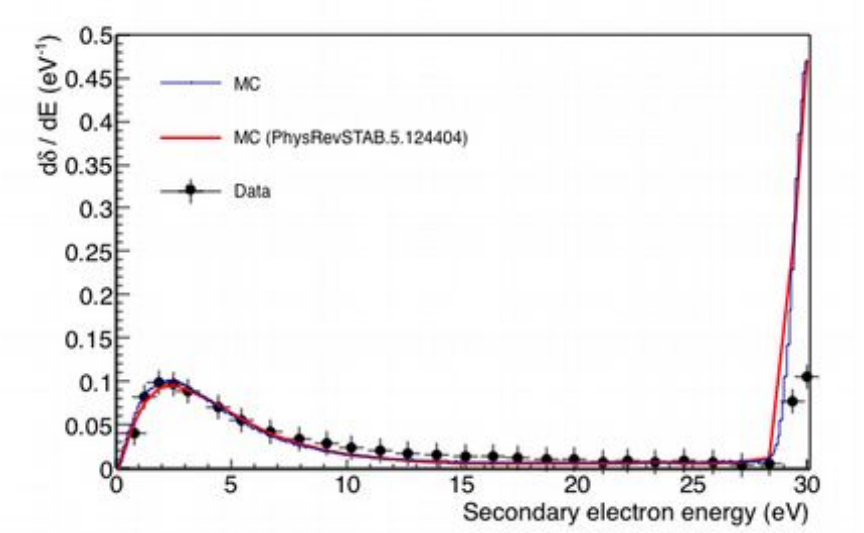


Şekil 2. (Sol) Simülasyon paketi kullanılarak gönderile elektron enerjisine göre ikincil emisyon eldesi gösterilmiştir. Mavi renkle gerçek ikincil elektron eldesi,yeşil rediffused elektron eldesi, kırmızı ile geritepen elektron eldesi gösterilmiştir. Siyah çizgiler ise toplan ikincil elektron eldesini göstermektedir. "Data" noktaları ise [21] nolu makaledeki Fig.6'dan alınmıştır. (Sağ) Alkalisi aşınmış alüminyum alaşım yüzey için verilen ikincil elektron eldesi dağılımı [22].

Şekil-3, Şekil-4 ve Şekil-5 ile verilen 10 eV, 30 eV ve 295 eV enerjilere sahip ve bakır yüzeye dik olarak vurdurulan elektron demetleri için elde edilen ikincil elektronların enerji spektrumundaki "data" ve ([21] nolu makalede fit olarak sembolize edilen) "MC (PhysRevSTAB.5.124404)" ile gösterilen dağılımlar [22] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır.

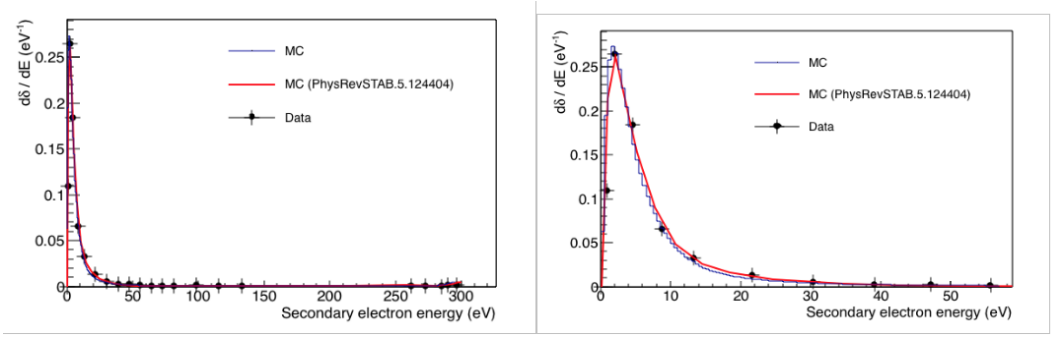


Şekil 3. 10 eV elektron demeti için ikincil elektronların enerji spektrumu. Data" noktaları ve MC (PhysRevSTAB.5.124404) dağılımı [21] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır.



Şekil 4. 30 eV elektron demeti için ikincil elektronların enerji spektrumu. Data" noktaları ve MC (PhysRevSTAB.5.124404) dağılımı [21] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır.

Simülasyon çalışmalarımızın çıktıları sonucunda elde edilen ve farklı enerji değerlerinde gönderilen elektron demetlerinin oluşturduğu ikincil elektronların enerji dağılımları [21] nolu makalede verilen deneysel verilerle ve fit sonuçlarıyla uyumludur.



Şekil 5. a-) 295 eV elektron demeti için ikincil elektronların tüm enerji spektrumu. b-) Bu spektrumun 50 eV'a kadar olan kısmı. "Data" noktaları ve MC (PhysRevSTAB.5.124404) dağılımı [21] nolu makaledeki Fig.7'den alınmıştır.

Şekillerde "data" ve "MC (PhysRevSTAB.5.124404)" ile gösterilen dağılımlar için Plot Digitizer programı kullanılarak elde edilen enerji değerleri (X) ve bu enerji değerlerine karşılık gelen (Y) değerleri 10 eV, 30 eV ve 295 eV enerjili elektron demetleri için Tablo 1-3 de verilmiştir.

Tablo 1. 10 eV electron için [21] nolu makaleden sayısallaştırılmış enerji ve ikincil emisyon kazanç değerleri. X değerleri enerjiyi (eV), Y değerleri ise dδ/dE'yi vermektedir.

X	0.011	0.410	0.824	1.154	1.567	1.911	2.255	2.682
Y (data)	0.001	0.018	0.038	0.046	0.056	0.058	0.058	0.054
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.001	0.013	0.027	0.037	0.046	0.051	0.051	0.053

X	3.012	3.370	3.769	4113	4471	4856	5.228	5.586
Y (data)	0.049	0.048	0.044	0.041	0.035	0.034	0.029	0.023
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.053	0.052	0.051	0.046	0.044	0.041	0.038	0.036

X	5.957	6.343	6.728	7.072	7.443	7.843	8214	8545
Y (data)	0.022	0.015	0.013	0.008	0.003	0.000	0.000	0.009
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.034	0.032	0.030	0.028	0.029	0.026	0.027	0.027

X	8944	9.304	9.525	9.636	9.857	9.995
Y (data)	0.053	0.191	0.280	0.345	0.384	0.390
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.057	0.220	0.435	0.572	0.789	0.916

Tablo 2. 30 eV electron için [21] nolu makaleden sayısallaştırılmış enerji ve ikincil emisyon kazanç değerleri. X değerleri enerjiyi (eV), Y değerleri ise dδ/dE'yi vermektedir.

X	0.766	1.242	1.842	2.468	3.118	4.395	5.432	6.660	7.912
Y (data)	0.042	0.083	0.099	0.098	0.090	0.071	0.056	0.043	0.034
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.051	0.076	0.092	0.096	0.091	0.073	0.058	0.041	0.029

X	9.164	10.199	11.426	12.654	13.905	15.132	16.335	17.418	18.669
Y (data)	0.029	0.024	0.021	0.018	0.016	0.015	0.014	0.012	0.011
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.020	0.016	0.012	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.006

X	19.897	21.148	22.183	23.386	24.661	25.864	27.139	28.366	29.369
Y (data)	0.010	0.008	0.009	0.008	0.008	0.008	0.005	0.006	0.078
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.012	0.251

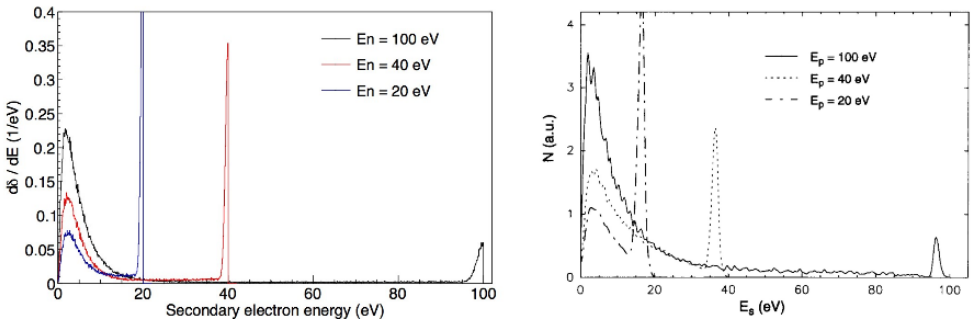
Tablo 3. 295 eV electron için [21] nolu makaleden sayısallaştırılmış enerji ve ikincil emisyon kazanç değerleri. X değerleri enerjiyi (eV), Y değerleri ise dδ/dE'yi vermektedir.

X	0.92	2.07	4.60	8.74	13.34	21.63	30.37
Y (data)	0.1096	0.2651	0.1846	0.0658	0.0328	0.0132	0.0055
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.1852	0.2589	0.1752	0.0766	0.0328	0.0117	0.0055

X	39.11	47.16	55.67	64.42	72.70	81.44	98.70
Y (data)	0.0028	0.0021	0.0018	0.0009	0.0009	0.0009	0.0012
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.0026	0.0013	0.0006	0.0003	0.0001	0.0001	0.0003

X	115.72	132.97	261.58	272.62	285.28	289.65	296.55
Y (data)	0.0006	0.0006	0.0003	0.0003	0.0000	0.0012	0.0012
Y(PhysRevSTAB.5.124404)	0.0004	0.0006	0.0011	0.0008	0.0013	0.0019	0.0040

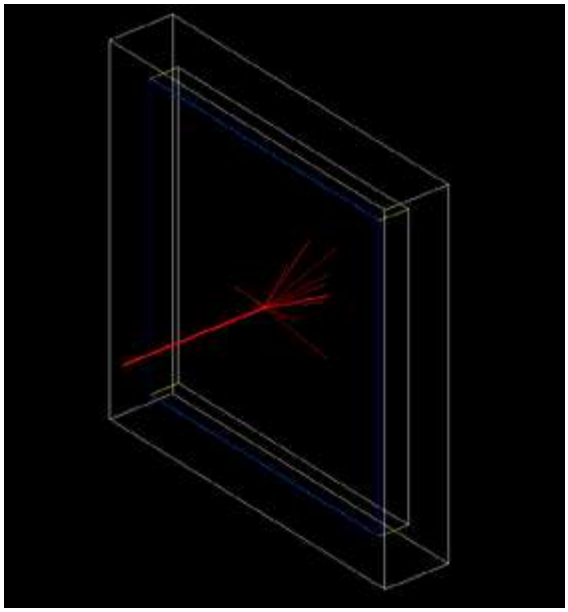
Bu çalışmada elde edilen ikincil elektron enerji spektrumları [20] nolu makalede verilen ve altın için elde edilen spektrumlarla da tutarlılık göstermektedir. Bunların karşılaştırılması Şekil 6'da gösterilmektedir.



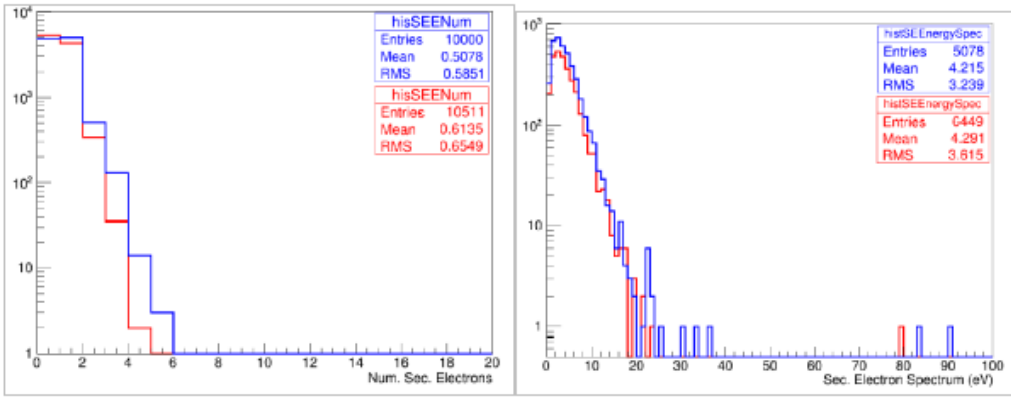
Şekil 6. (Sol) Bakır yüzeye dik olarak çarptırılan 20, 40 ve 100 eV elektron demetleri için ikincil elektronların enerji spektrumu. (Sağ) Aynı birincil elektron enerjilerine sahip elektronların Altın yüzeye çarptırılması sonucu elde edilen ikincil elektron enerji spektrumları [18].

3.1.2 GEANT4 İEE Sınıfının Hazırlanması ve Testleri

GEANT4[18] sınıfının test edilmesi için öncelikle tek bir ince (0.01 mm) bakır tabakasına 20 keV'lik elektronlar gönderilerek simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar önceki dönemde literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması yapılmış olan ROOT[24] tabanlı simülasyon paketimizin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de herhangi bir soğurucu kullanılmadan bakır yaprak hedefe 20 keV'lik elektronlar gönderilerek yapılan simülasyonun 10 olay için izleri gösterilmektedir.

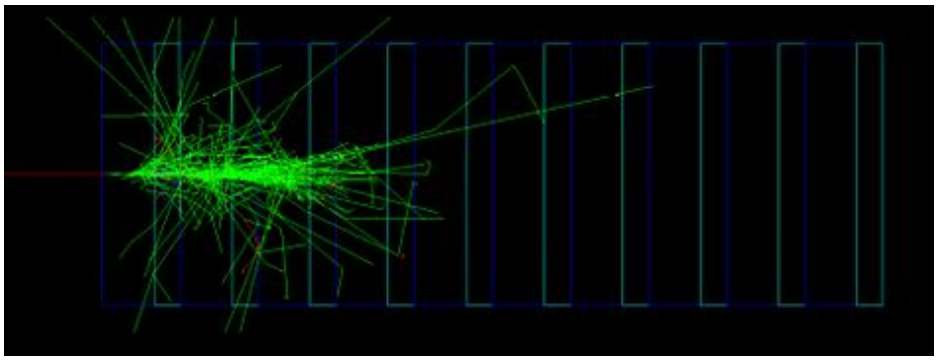


Şekil 7. 10 keV enerjili elektron tabancası kullanılarak üretilen 10 olayın izleri



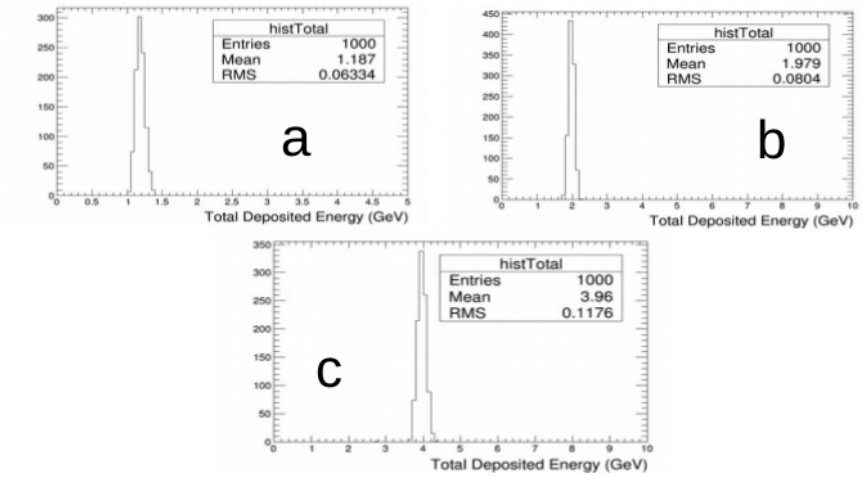
Şekil 8. 20 keV enerjili elektron tabancası kullanılarak üretilen simülasyonların karşılaştırılması. Sol: İkincil emisyon elektronların sayısı (mavi ROOT tabanlı algoritma, kırmızı Geant4 tabanlı algoritma). Sağ: İkincil emisyon elektronların enerji spektrumu (mavi ROOT tabanlı algoritma, kırmızı Geant4 tabanlı algoritma)

Şekil 8'de de görüldüğü gibi iki simülasyon modülü de karşılaştırılabilir sonuçlar vermektedir. Bu noktada madde-parçacık etkileşmelerinin etkileri gözlenmektedir. Sadece Cu yaprağa çarpan elektronların değil ana parçacığın oluşturduğu duştaki (particle shower) tüm yüklü parçacıkların ikincil emisyon oluşturma durumları söz konusudur. Simülasyon kodunun çalışma süresi, kaynak kullanımı gibi konularda yapılan optimizasyon çalışmaları ile gelişme sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmalar için elektronların simülasyonu için geçen CPU süresi 20-30 s/olay değerlerindedir. Kalorimetre simülasyon çalışmaları için öncelikle iki farklı kalorimetre tipi için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle literatürde bulunan diğer örnekleme kalorimetrelerine örnek olarak 2 cm Pb soğurucular arasında, 1 cm plastik ışıldayıcıların bulunduğu 10 katman içeren örnekleme kalorimetresi için simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 9'da gösterilen sistem için 30 GeV, 50 GeV, ve100 GeV enerjili elektron demetleri için simülasyon çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 9. 10 katmandan oluşan plastik ışıldayıcılı örnekleme kalorimetresi (2cm kurşun soğurucular arasında aktif algıç olarak1cm plastik ışıldayıcı bulunmaktadır)

Hızlı bir şekilde kalibrasyon yapabilmek için 100 GeV verileri kullanılmıştır. 100 GeV için enerji yanıtını elde edilmek için her katmandan gelen katkı bir sabit ile çarpılmıştır.



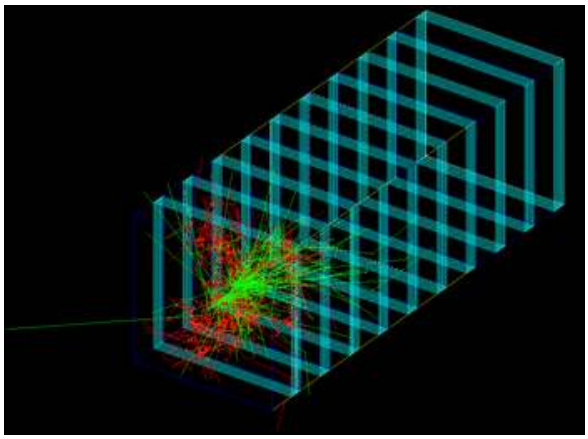
Şekil 10. (a) 30GeV, (b) 50 GeV ve (c) 100 GeV elektron demeti için kalibre edilmiş toplam enerji birikimi

Bu yöntem ile elde edilen kalibre edilmiş toplam enerji dağılımları 30, 50 ve 100 GeV için Şekil 10 da gösterilmiştir. Tablo 4'de hesaplanan enerji çözünürlüğü gösterilmiştir.

Tablo 4. Kurşun+Işıldayıcı kalorimetresi için ölçülen enerjiler ve enerji çözünürlüğü

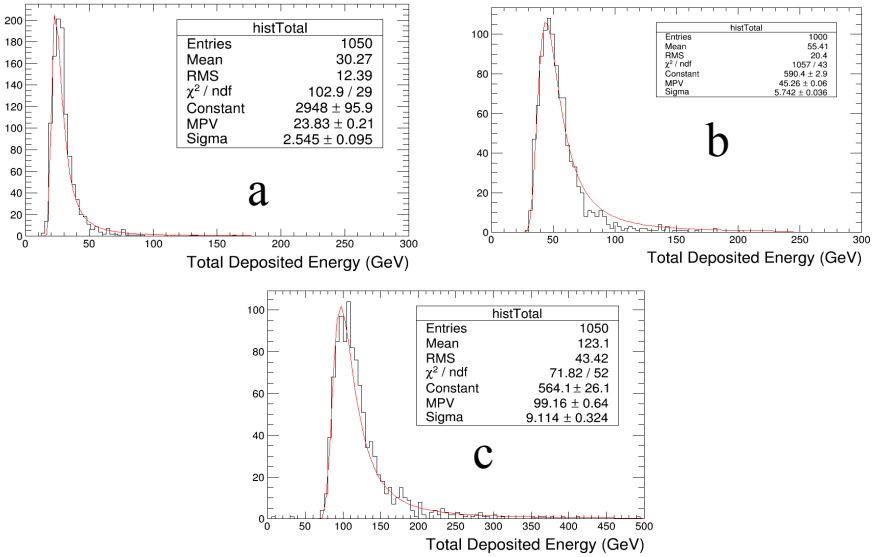
Demet Enerjisi (GeV)	Ölçülen Enerji (GeV)	RMS (GeV)	RMS/E (%)
30	29.67±0.94	1.58±0..05	5.32
50	49.48±1.56	2.01±0.06	4.06
100	99.00±3.13	2.94±0.09	2.97

İkinci aşama olarak aynı geometride ve soğurucu boyutlarında belirlenmiş ikincil emisyon kalorimetresi için 30,50,100 GeV enerjilerinde elektron demetleri için simülasyon çalışmaları tekrarlanmıştır. Şekil 11'de simülasyon çalışmalarında kullanılan örnekleme kalorimetresi geometrisi gösterilmiştir. Her bir ikincil emisyon modülünde 8 adet Cu yaprak 4 kV potansiyel farkı ile başlayıp azalarak devam eden voltaj bölüntülenmesi yapılarak yerleştirilmiştir. Cu yapraklar vakum içerisine yerleştirilmişlerdir. Geant4 simülasyonu sırasında her bir katmanda toplanan toplam ikincil elektron sayıları kaydedilmiştir. Gerçek bir algıç tasarımında bu sayı aslında algıçtan elde edilecek olan akımı (ya da potansiyeldeki değişimi) verecektir. Bu nedenle bu sayı algıç ile etkileşen parçacıkların bıraktığı enerji ile ilişkilidir.



Şekil 11. 10 katmandan oluşan ikincil emisyon modülü kalorimetresi (2cm kurşun soğurucular arasında aktif algıç olarak ikincil emisyon modülleri konulmuştur.)

Benzer şekilde 30,50 ve 100 GeV enerjili elektron demetleri kullanılarak SEE kalorimetresi için simülasyon çalışmaları tekrar edilmiştir. Benzer şekilde ikincil elektron sayıları 100 GeV'lik elektron demeti için kullanılarak her bir katman aynı katsayı ile çarpılarak enerji yanıtı hesaplanmış ve diğer enerjiler içinde kalorimetrede kalibre edilmiş enerji miktarı hesaplanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen kalibre edilmiş toplam enerji dağılımları 30, 50 ve 100 GeV için Şekil 12'de gösterilmiştir. Dağılımlardan da görüleceği üzere Gauss yerine kuyruğu olan (Landau + Gauss) dağılımlar bulunmuştur. Bu nedenle ilk aşamada tepe noktası ve dağılımları bulmak için basit bir “fit” fonksiyonu kullanılmıştır. Tablo 5'de SEE kalorimetresi için, bu fit sonuçları kullanılarak hesaplanan enerji çözünürlüğü gösterilmiştir.



Şekil 12. (a)30GeV,(b)50 GeV ve (c)100 GeV elektron demeti için kalibre edilmiş toplam enerji birikimi

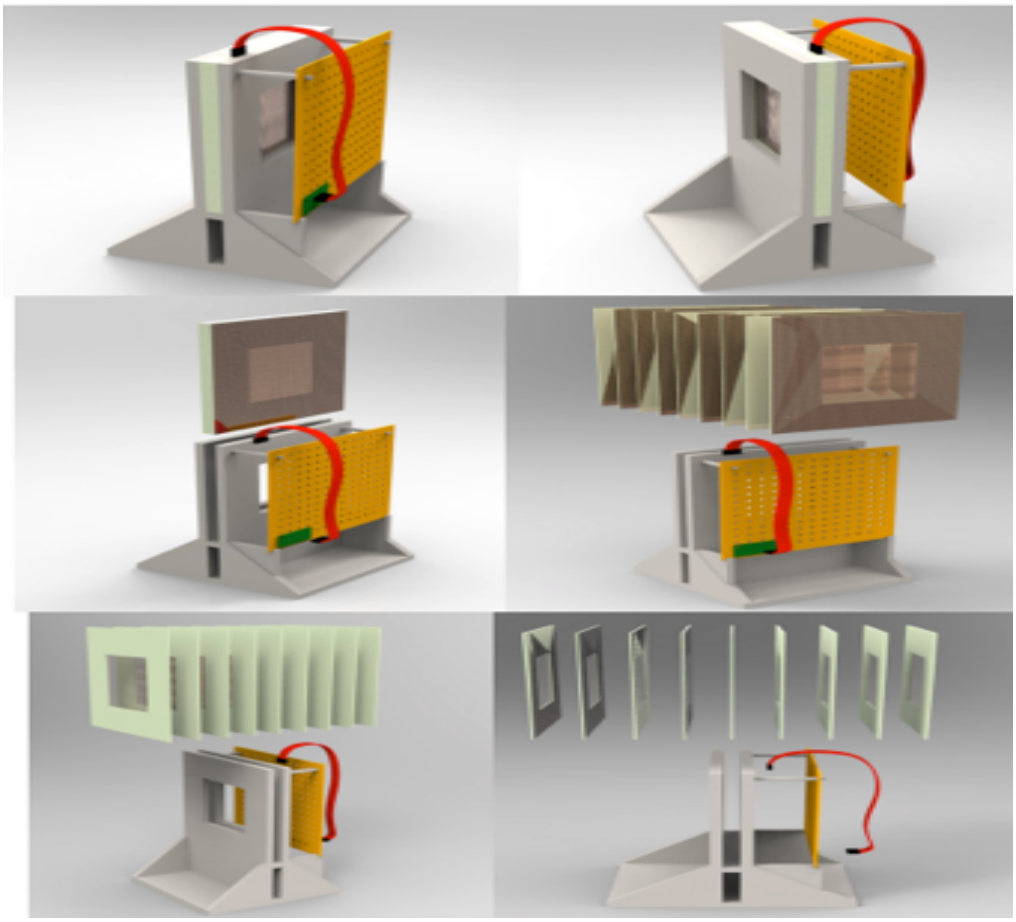
Tablo 5. Kurşun+SEE kalorimetresi için ölçülen enerjiler ve enerji çözünürlüğü

Demet Enerjisi (GeV)	Ölçülen Enerji (MPV, GeV)	Sigma (GeV)	Sigma/MPV (%)
30	23.83±0.21	2.54±0.09	10.65
50	45.26±0.06	5.74±0.04	12.68
100	99.16±0.64	9.91±0.32	9.99

Bu değerlerden görüleceği üzere elde edilen enerji yanıtları doğrusal (lineer) değildir. Bir elektromanyetik kalorimetrenin lineer olması gerektiğinden bu sonuçların ışığında yazdığımız Geant4 sürecine (G4SecondaryElecEmission) tekrar dönülüp bakılmış ve Landau kuyruğu ile lineer kısmın parçacık sağanaklarında oluşan, ve aslında ikincil emisyon elektron vermeyen, gamalardan oluştuğu saptanmıştır. Bunun ardından G4SecondaryElecEmission isimli süreçte gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Bu düzeltmelerden sonra elde edilen sonuçlar lineer bir enerji yanıtı vermiştir. Elde edilen sonuçlar ve literatür ile karşılaştırılması 4. Bulgular kısmında verilmiştir.

3.2. Kalorimetre Tasarımı

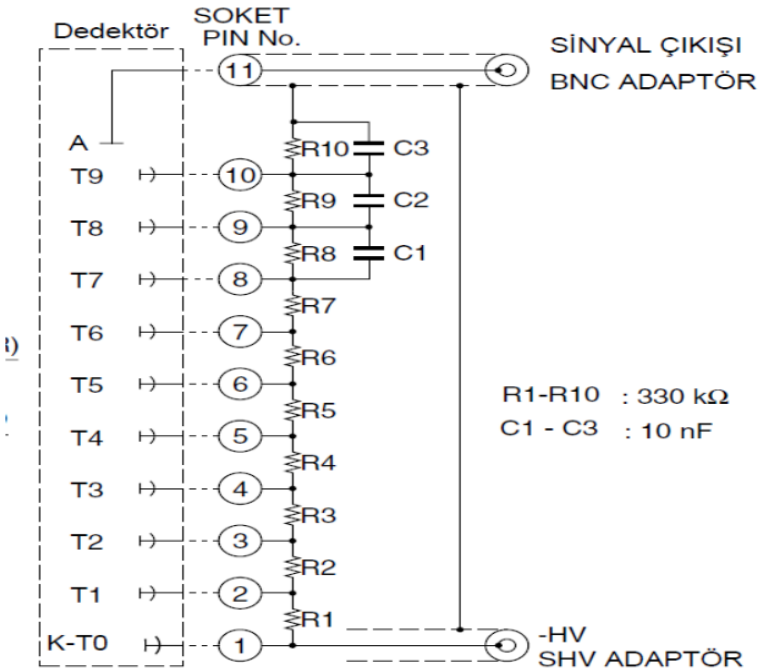
Kalorimetre prototipi tasarımı için Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi bünyesinde bulunan Endüstriyel Tasarım Merkezi (ETAM) ile hizmet alımı yöntemi ile işbirliğine gidilmiştir. Bu kapsamda simülasyon sonuçlarından yararlanılarak belirlenen geometri ve malzeme seçimlerine göre teknik çizim çalışmaları yapılmış ve çizimlere göre dynode çerçevelerinin yapısı belirlenmiştir. Şekil 13'de yapılan çalışmalarla hazırlanan teknik çizimlerden örnekler gösterilmektedir. Dynode çerçevelerinin boyutu 20cmx20cm olarak ayarlanmıştır. Bakir meshlerin görüldüğü çerçeve açıklığı ise 10cmX10cm olarak belirlenmiştir. Dynodeların bir arada duracağı destek yapısı 9 adet dynode çerçevesini taşıyacak genişlikte tasarlanmıştır.



Şekil 13. Detektör Tasarımı için teknik çizimler. Sarı renkte gösterilen veri okuma ve besleme için elektronik kart, kırmızı kablo dynode besleme kabloları ve sinyal kablosudur. Şeklin 3. sırasında görünen çerçeveler dynode çerçeveleridir. Orta sırada bakır meshler ile dynode çerçeveleri gözükmektedir

3.3 Voltaj Bölücü ve Sinyal Toplayıcı Devre Tasarımı

Dedektör prototipinde kullanılacak olan elektronik kartların (voltaj bölücü ve ön-son elektronik) tasarımı konusunda çalışmalar yapılmıştır. İEE kalorimetresinde ki her bir dynode tabakası (yaprak) arasında bir elektrik alanı farkı yaratarak ikincil emisyon elektronları hızlandırma için Şekil 14'de verilen bir devre şeması tasarlanmıştır. Bu devre şeması klasik bir gerilim bölüntüleyicisi olup foto-çoğaltıcı tüpler için benzer devreler kullanılmaktadır.



Şekil 14. HV Bölüntüleyicisi Devre Şeması. Bu devre ile Katot ile Anot arası bölüntüleme yapılarak farklı tabakalara farklı HV değerleri verilebilmektedir.

Elektronik kartların tasarım test ve üretimleri aşamasında **ArteElektronik** Firması ile hizmet alımı yöntemi ile işbirliğine gidilmiştir. Üretilen kartlar ile ilgili bilgiler bulgular bölümünde verilecektir.

3.4. Araştırma Laboratuvarları

Proje kapsamında alınan veri alım elektronikleri MSGSÜ Fizik bölümünde detektör tasarım ve AR-GE laboratuvarında tesis edilmiştir. Ayrıca YTÜ'de benzer bir laboratuvarın kurulması tamamlanmıştır. Laboratuvar alanlarında yapılan tadilatların bitmesi sonucu YTÜ Fizik bölümündeki test laboratuvarı da faaliyete geçmiştir. Eksik olan bazı ekipmanların temini ve AR-GE çalışmalarının çeşitlendirilebilmesi için Almanya'nın Darmstadt kentinde bulunan GSI-FAIR (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung-Facility for Antiproton and Ion Research) araştırma merkezi ile irtibata geçilmiştir. Bu irtibat sayesinde MSGSÜ ve YTÜ de bulunan AR-GE laboratuvarlarında kullanılmak üzere, GSI FAIR/NUSTAR grubundan bazı laboratuvar ekipmanları temin edilmiştir. Başlatılan işbirliği çerçevesinde proje bütçesinden alınan VME kontrol sisteminin, GSI'da çalışan araştırmacılar Henning Schaffner ve Nikolaus Kurz İstanbul'a gelmesi ile ROOT tabanlı MBS (Multi Branch System) ile çalışır hale getirilmiştir. Proje kapsamında temin edilen ve daha önceden var olan laboratuvar ekipmanlarına ek olarak, GSI NUSTAR grubundan temin edilen ekipmanların kurulumu gelen bu uzman araştırmacıların yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu proje kapsamında GSI

deneyenlerinde kullanılan MBS veri toplama sistemi laboratuvarımızda kurulmuş ve kullanılır duruma getirilmiştir. Böylece GSI ile eş güdüm sağlanmıştır. Böylelikle bu projede prototipi yapılan kalorimetrenin GSI'de test edilebilmesinin önü açılmıştır.



Şekil 15. MSGSU Detektör Tasarım Ar-GE Laboratuvarı

Şekil 15' de MSGSU Fizik bölümünde kurulmuş olan laboratuvarın son hali gözükmektedir. Kurulumu yapılan veri alım sistemi değişik deney düzenekleri hazırlanarak test edilmiştir. Bu testlerde değişik ebatlarda ışıldayıcı, PMT ve SiPM gibi farklı foto çoğaltıcılar kullanılmıştır. Hazırlanan deney düzeneklerinde LED ve farklı radyoaktif kaynaklar kullanılarak veri alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında bursiyer öğrencilere deney düzeneklerinin nasıl kurulacağı ve veri toplama sisteminin nasıl kullanılacağı öğretilmiştir. Şekil 16'da YTU Fizik Bölümünde kurulan Araştırma Laboratuvarı gözükmektedir.

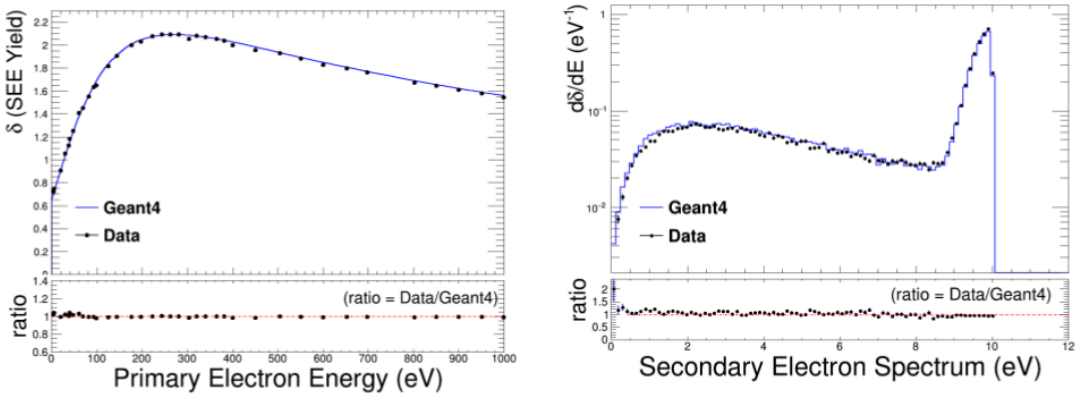


Şekil 16 . YTU Fizik Bölümündeki Laboratuvarı

4. Bulgular

4.1 Detektör Simülasyonları ve Literatür ile Karşılaştırılması

Detektör tasarımı için öncelikle literatürde var olan kalorimetre sistemlerinin İEE kalorimetresi ile karşılaştırması yapılmıştır. Öncelikle 3. bölümde belirtilen simülasyon yöntemlerinin doğruluğu test edilmiştir. Şekil 17 de ince bir bakir levha üzerine gönderilen elektron demetleri için İEE eldesi araştırılmış ve deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekilden görüleceği gibi yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlar deney verileri ile uyumludur. Bu da kullanılan yöntemin ve GEANT4 sınıfının doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.

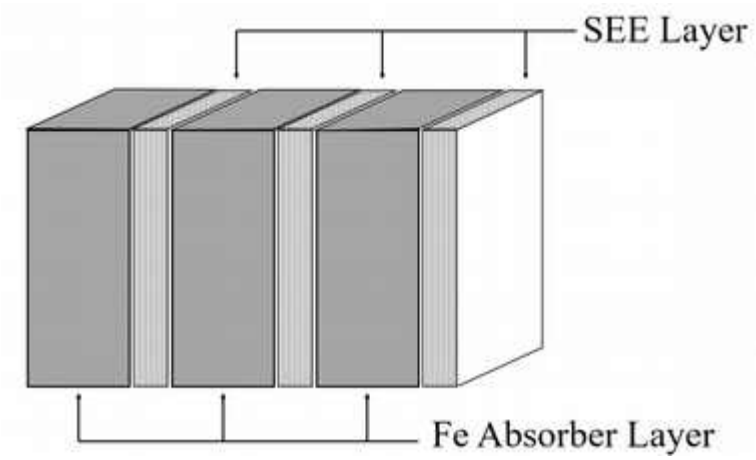


Şekil 17. Değişik enerjilerdeki elektron demeti için İkincil elektron eldesi (sol) ve 10 eV enerjili elektron demeti için İEE spektrumu (sağ). Datalar [21] nolu makaleden alınmıştır

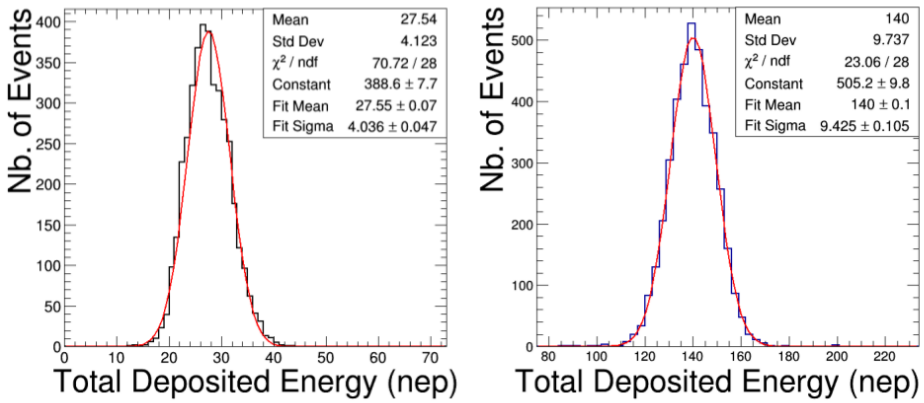
Literatürde bulunan kalorimetre çalışmaları ile karşılaştırılmak üzere 16 modülden oluşan örnekleme kalorimetresi ele alınmıştır. Örnekleme kalorimetresi 2.5 cm kalınlığında soğurucuların arasında 0.5 cm lik plastik ışıldayıcılar konularak oluşturulmuştur [16]. Şekil 18 de modülün şeması görülmektedir.

İEE dayalı kalorimetre için ise ışıldayıcıların yerine İEE modülleri yerleştirilmiştir. Geant4 simülasyon çalışmaları 10, 15, 20, 30 ve 50 GeV enerjili elektron demetleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ref. [16]'da bulunan verilerle doğrudan karşılaştırma yapabilmek için elektromanyetik kalorimetre üzerine 10 GeV enerjili müonlar gönderilip kalorimetre yanıtı 10 GeV eşdeğeri parçacık (number of equivalent particle-nep) cinsinden bulunmuştur. Bilindiği üzere müonlar kalorimetre ile çok az etkileşip, TeV altı enerjilerde, minimum iyonizasyon

yapan parçacıklar gibi (mip) davranmaktadırlar. Bu nedenle müonlar kalorimetre çalışmalarından sıklıkla kullanılan bir kalibrasyon aracıdır.



Şekil 18: Geant4 Simülasyon çalışmalarında kullanılan kalorimetre modülünün şematik gösterimi



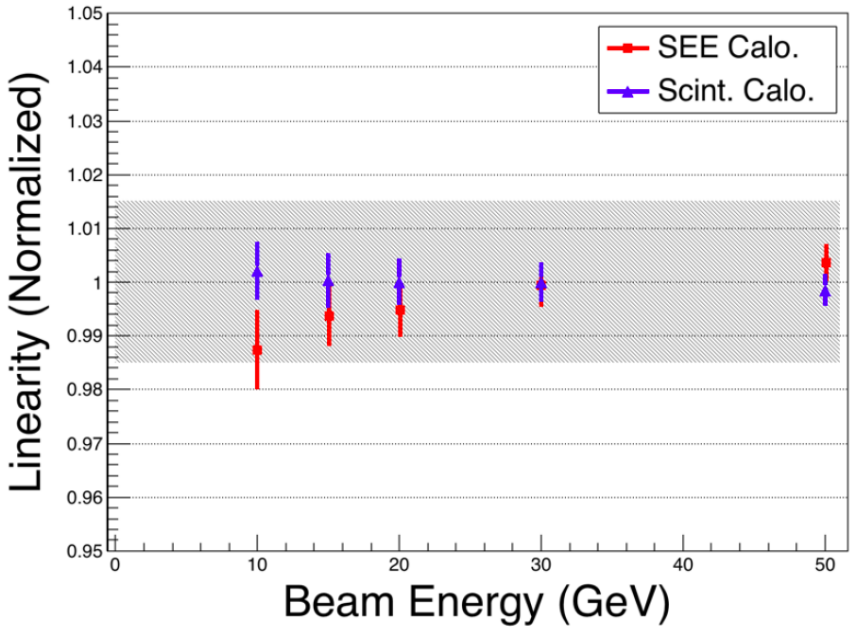
Şekil 19. 10 GeV (sağ) ve 50 GeV (sol) elektron demetleri için kalorimetre yanıtı

Karşılaştırma yapabilmek için [16] kullanılan eşdeğer parçacık enerjisi (nep) 10 GeVlik müon demetleri kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 19' da karşılaştırma için kullanılan en düşük ve en yüksek (10 ve 50 GeV) elektron demeti enerjileri için elde edilen dedektör yanıtları gösterilmektedir. Elde edilen enerji dağılımları simetrik olup Gaussyen şekille uymaktadırlar. Bu nedenle Gauss fit edilerek ortalama (μ) ve standart sapma (σ) değerleri fit sonucunda elde edilmiştir. Tablo 6 Geant4 simülasyon sonucu elde edilen enerji ortalaması, standart sapması değerlerini vermektedir. Aynı tabloda aktif malzemenin İEE yerine sintilatör olarak ele alınıp simülasyon yapılması ile bulunan sonuçlar ve bunların literatürdeki deneysel sonuçları da (parantez içindeki değeler) verilmektedir.

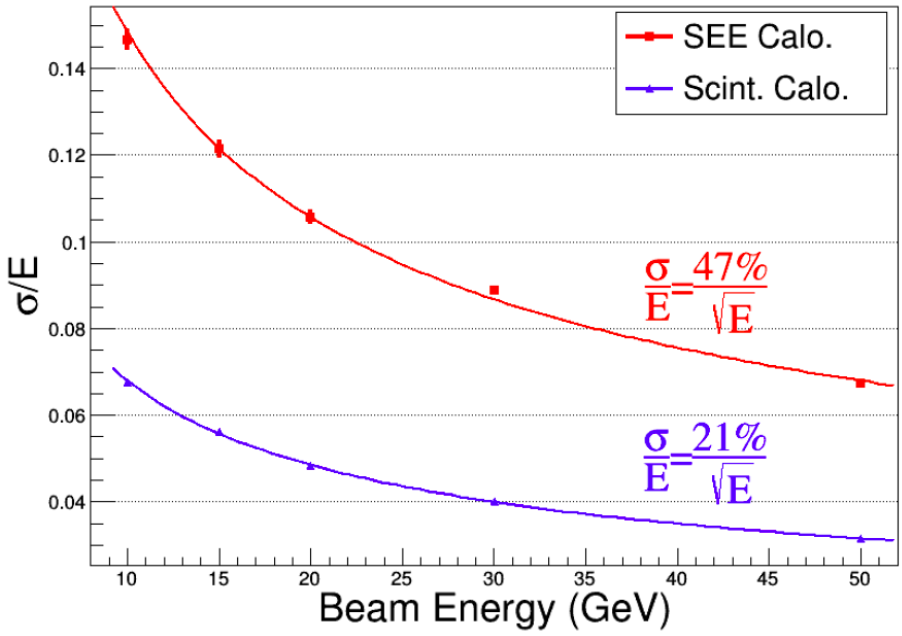
Tablo 6. İEE ve sintilasyon kalorimetreleri için enerji yanıtı ve çözünürlüğü. Parantez içinde verilen değerler Ref.[16]'dan alınmıştır.

	SEE Calo.		Scintillator Calo.	
E (GeV)	mean	σ	mean	σ
10	27.55±0.07	4.04±0.05	57.07±0.05 (55.8±0.3)	3.86±0.04 (4.5±0.3)
15	41.59±0.08	5.05±0.06	85.45±0.07 (83.9±0.1)	4.80±0.05 (5.3±0.1)
20	55.51±0.09	5.87±0.07	113.91±0.08 (114.1±0.2)	5.51±0.06 (6.3±0.2)
30	83.66±0.11	7.43±0.08	170.85±0.10 (169±0.5)	6.87±0.07 (7.4±0.4)
50	140.01±0.15	9.42±0.10	284.32±0.13 (281±1.0)	8.95±0.09 (7.9±0.9)

Şekil 20 elektromanyetik kalorimetre için İEE ve sintilasyon aktif malzemeleri kullanılarak elde edilen lineerlik eğrisini vermektedir. y ekseni ölçülen enerjinin demet enerjisine oranı olup karşılaştırma için İEE ve sintilatör sonuçları birbirlerine normalize edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre 50 GeV'e kadar sintilatör tabanlı bir kalorimetre ile yapılan karşılaştırmasında İEE kalorimetresinin %1.5'lik bir bant aralığında lineer olduğu bulunmuştur. Şekil 21 elektromanyetik kalorimetre için İEE ve sintilasyon aktif malzemeleri kullanılarak elde edilen çözünürlük eğrisini ve uygulanan fit eğrilerini vermektedir. Sintilasyon kalorimetresi için stokastik terim ~%21 iken İEE kalorimetresi için bu terim ~%47 civarındadır. Aradaki bu farkın gaz ya da vakum ortamlarında görülen yol uzunluğundaki (pathlength) çalkalanmalardan olduğu değerlendirilmektedir [30, 31].



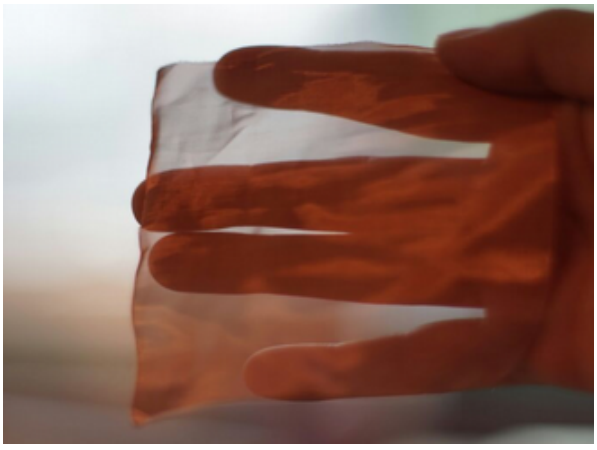
Şekil 20: İEE ve sintilatör kalorimetreleri için elektromanyetik sağanağa dedektör yanıtının lineerliği. Taralı alan 1 etrafındaki %1.5'lik bandı göstermektedir.



Şekil 21: Elektromanyetik sağanak için İEE ve sintilasyon kalorimetreleri için enerji çözünürlüğü. Gösterilen hatalar sadece istatistik hatalarıdır.

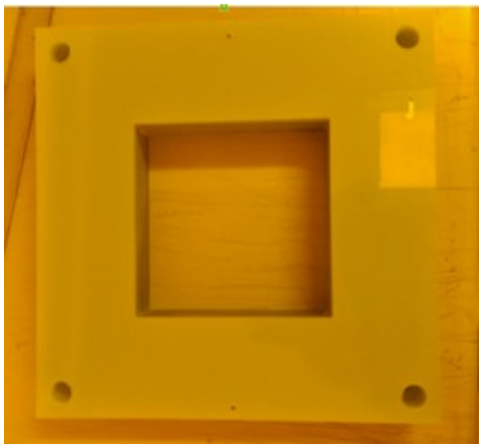
4.2. Prototip İnşası

İEE modülü için dynode üretiminde aktif malzeme olarak bakır mesh kullanılmıştır. Bakır mesh tercih edilmesinde erişim kolaylığı ve maliyeti etken olmuştur. Dynode üretimi için 53 mikron kalınlığa 74 mikron açıklık aralığına sahip inç başına 200 mesh barındıran bakır örtüler kullanılmıştır. Şekil 22 da kullanılan bakır mesh görülmektedir.



Şekil 22. Bakır mesh

Şekil 22'den da görüleceği gibi kullanılan bakır mesh çok ince ve hassas bir metal örtüdür. Bu örtünün deforme olmadan gergin bir şekilde dynode çerçevelerine yerleştirilmesi gerekmiştir. Buda teknik olarak bazı zorlukları beraberinde getirmiştir. Dynode çerçevelerinde 1.5 mm kalınlığında FR4 levhalardan yararlanılmıştır. Şekil 23 de üretilen çerçeveler gösterilmiştir.



Şekil 23: Dynode Çerçeveleri

Bakır meshlerin deforme olmadan gerilmesi ve çerçevelere monte edilmesi için Arteelektronik ile hizmet alımı çerçevesinde işbirliğine gidilmiştir. PCB üretiminde kullanılan kalıp çıkarma tekniklerinden yararlanılmıştır. Öncelikle bakır örtüler sağlam çerçeveler üzerine gerilerek özel yapıştırıcılar ile sabitlenmiştir. Şekil 24 de izlenen süreçler adım adım görülmektedir.

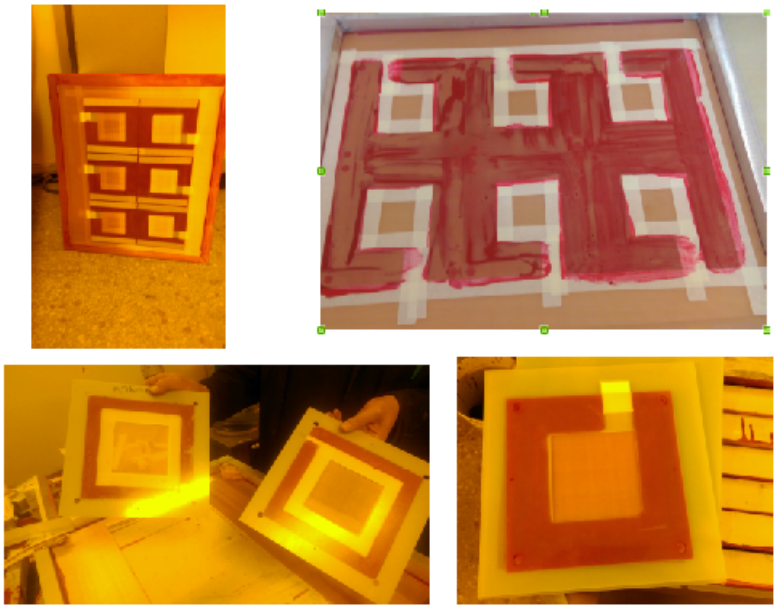


Şekil 24. Bakır mesh örtülerin hazırlanması

Bakır örtüler yeterli gerginliğe ulaşıp çerçevelere sabitlendikten sonra bu örtülerin dynode çerçevelerine montajı yapılmıştır. Bu montaj sırasında da bakır örtüler özel yapıştırıcılar ile dynode çerçevelerine yapıştırılmıştır. Bu yapıştırıcılar PCB üretimi sırasında ipek ve çelik örgüleri kasnaklara yapıştırmak için kullanılan Alman menşeili özel bir karışımdır. Yapıştırma işini gerçekleştiren firmanın elinde halen en az beş yıllık yapışmış numuneler ve ürünler bulunmaktadır. Yapıştırma ve germe işlemleri sırasında bakır meshlerin dayanabileceği en üst seviyede çerçeveler üzerine gerilmesi sağlanmıştır. Şekil 24 te bakir meşlerde oluşturulan gerilimin ölçülmesi görülmektedir. Şekil 25 ve 26 da yapılan işlemler görülmektedir.



Şekil 25. Dynodeların üretimi için çerçevelerin bakır örtüye yapıştırılması

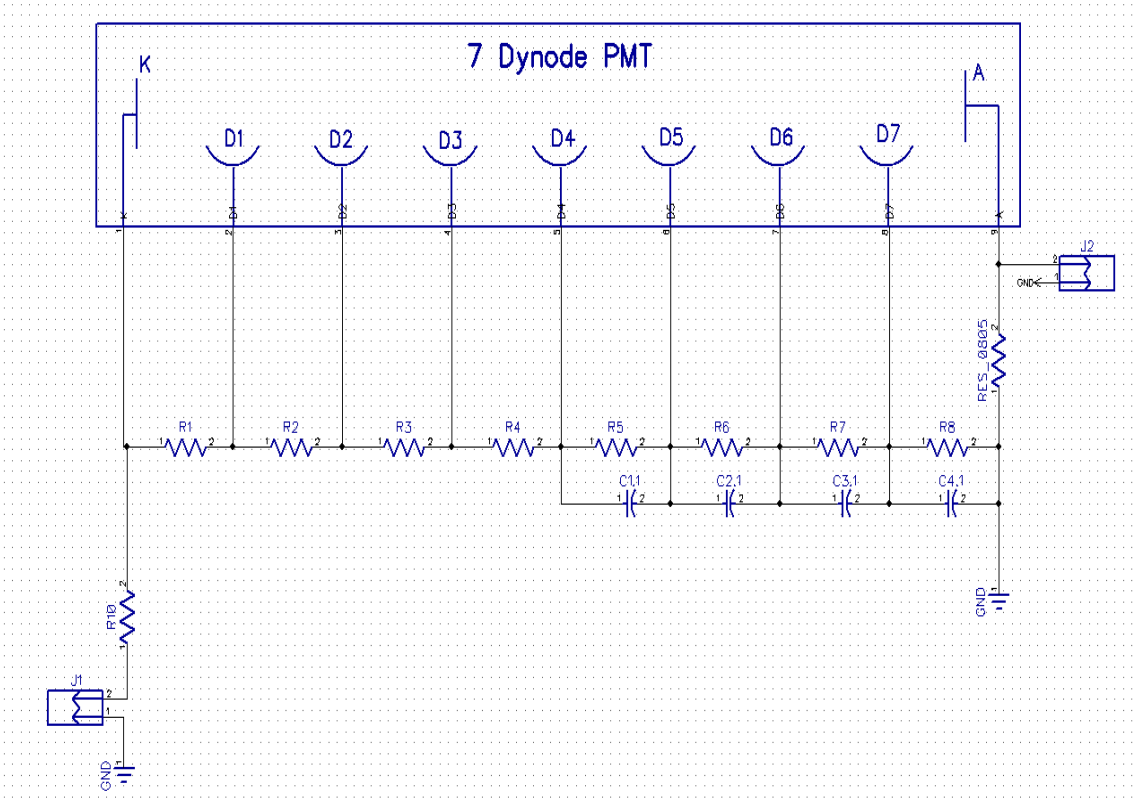


Şekil 26. Dynodeların üretimi

Dynodeların üretimi tamamlanmıştır. Dynode tabakalarının sinyal bağlantıları hazırlanmıştır. Detektör dış kabuğu için prototip aşamasında vakum tutan pleksiglass kutu tasarlanmış ve testleri yapılmıştır.

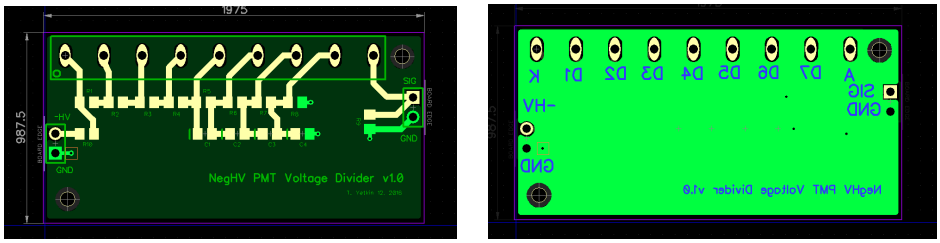
4.3. Elektronik Kartların Tasarım Test ve Üretimleri

İEE kalorimetre modülünde kullanılan dynode'lar için gerekli olan gerilim Şekil 27'te verilen bir negatif gerilim bölücüsü ile sağlanmaktadır. Bu gerilim bölücüsü tipik bir foto-çoğaltıcı devresidir. Bu devredeki kapasitörler ve dirençler yüksek gerilim altında ve mA düzeyinde akıma karşı korumalı olacak şekilde seçilmişlerdir.



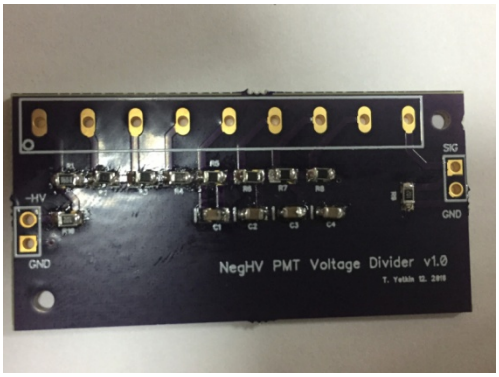
Şekil 27. Dedektör gerilim bölücüsünün elektronik şeması.

Verilen şemaya uygun olarak iki katlı bir PCB (Printed Circuit Board) tasarlanmıştır. Bu tasarımın ön ve arka yüzleri Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. Dedektör gerilim bölücüsünün PCB tasarımının ön ve arka yüzü.

Tasarımın ve SPICE simülasyonlarının ardından bu PCB'nin üretimi yapılmıştır. Şekil 29'da devre elemanlarının lehimlenmesi sonrasında elde edilmiş olan PCB'nin son hali gösterilmektedir.



Şekil 29. Dedektör gerilim bölücüsünün üretilmiş PCB'si.

Tablo 7'de ise gerilim bölücü devresinin SPICE simülasyonu ve gerilim altında elde edilen dynode değerleri gösterilmektedir. Elde edilen ölçüm değerleri ve SPICE simülasyon sonuçları birbirine oldukça yakın değerler vermiştir.

Tablo 7. Gerilim bölücüsünün SPICE simülasyonu ve ölçüm sonuçları

HV BÖLÜCÜSÜ SPICE BENZETİMİ									
HV	**VK**	**VD1**	**VD2**	**VD3**	**VD4**	**VD5**	**VD6**	**VD7**	**VDA**
50	50	38.3	32.6	27	21.5	16.1	10.7	5.33	0
100	100	76.6	65.2	54	43	32.1	21.4	10.7	0
150	150	115	97.8	81	64.5	48.2	32	16	0
200	200	153	130	108	86	64.3	42.7	21.3	0
300	300	230	196	162	129	96.4	64.1	32	0
HV BÖLÜCÜSÜ ÖLÇÜMLER									
HV	**VK**	**VD1**	**VD2**	**VD3**	**VD4**	**VD5**	**VD6**	**VD7**	**VDA**
50	50	36.97	31.25	25.86	20.68	15.62	10.55	5.4	0
100	100	74.2	62.73	51.92	41.52	31.36	21.19	10.85	0
150	150	110.8	93.6	77.5	62.02	46.85	31.66	16.18	0
200	200	148.2	125.2	103.7	82.9	62.68	43.36	24.65	0
300	300	222.2	187.8	155.5	124.4	91.9	63.54	32.48	0

Üretimi yapılan bu gerilim bölücü devre -4000 V'a kadar yüksek voltaj altında çalışabilecektir. Ancak devre elemanları veya lehim noktaları arasında ark'ların oluşmasının önüne geçilmesi gerekir. Bu amaçla tüm devre yüzeyinin, lehimleme işleminden sonra, iki karışımlı epoksi içeren, özel bir yalıtkan malzeme ile kaplanması gerekmektedir. Bu malzemenin alımı yapılmış olup yurt dışından gelişi beklenmektedir. Bu malzeme ile kaplandıktan sonra hedeflenen yüksek gerilimlere çıkılacaktır.

5. Tartışma Sonuç

Proje kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile GEANT4 için İEE sınıfı hazırlanmış ve test edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları literatürde bulunan deneysel veriler ile karşılaştırıldığında kullanılan yöntemin ve GEANT4 fizik sınıfının doğruluğu test edilmiş ve deneysel verilere uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Projenin amaçlarından biri olan detektör geliştirme araştırma konularında donanımlı laboratuvar kurma, bu konuda yetişmiş insan yetiştirme konularında gerekli adımlar atılmıştır. TÜBİTAK projesi ile sağlanan uluslar arası işbirliği sonucu GSI NUSTAR grubu ile grubumuzca yapılan anlaşma çerçevesinde DEGAS (**De**cay Spectroscopy **G**ermanium **A**rray **S**pectrometer) detektör sistemi alt birimlerinden aktif gama zırhlama biriminin testlerinin bir kısmı araştırma laboratuvarlarımızda gerçekleştirilmiştir. Hali hazırda bu proje kapsamında temin edilen cihazlar ve uluslar arası işbirliği kapsamında GSI NUSTAR grubunun desteğinde temin edilen ekipman ile üniversitelerimizde kurulmuş olan araştırma laboratuvarlarımız uluslar arası düzeyde detektör tasarım ve testlerinin yapılabileceği laboratuvarlar haline gelmiştir.

Bursiyerlerimizden birinin yüksek lisans araştırması Laboratuvarlarımızda yapılan testlerden tamamlanmıştır. Detektör simülasyon çalışmaları için yapılan çalışmalar ile bursiyer öğrencilerin detektör simülasyon araçlarına ve yazılımlarını kullanmaları sağlanmıştır. Projemiz bursiyerlerinden bir öğrencimiz grubumuzca yapılan simülasyon çalışmaları ile yüksek lisansını tamamlamıştır.

Kalorimetre tasarım ve prototip üretim aşamalarında ETAM ve ARTE Elektronik gibi merkez ve şirketler ile hizmet alımı yöntemi kullanılarak işbirliği yapılmıştır. Yapılan bu işbirliğinin daha sonraki çalışmalarda da devam ettirilerek, uluslar arası projelerde yapılacak bazı işlerin ülkemizde yapılaması sağlanabilecektir. Ancak, prototip için gerekli malzemelerin temininde bazı sıkıntılar yaşanmıştır. Özellikle bazı kritik kimyasal ve elektronik parçaların ülkemize getirilmesi zaman almıştır. Ayrıca proje başlandığı süreden itibaren döviz kurlarında yaşanan artış nedeniyle proje başlangıcında ön görülen malzemelerin yerine daha ekonomik seçimler yapılmak zorunda kalınmıştır.

Elde edilen sonuçların Rusya'da yapılan "INSTR17:Instrumentation for Colliding Beam Physics" konferansına proceedings de basılmak üzere sözlü bildiri olarak kabul edilmiştir (konferans ile ilgili belgeler sisteme eklenmiştir.). Ancak hava alanında yeşil pasaport ilgili işlemlerde çıkan sorunlar nedeniyle katılım sağlanamamıştır. Bu bildiri önümüzdeki dönemde başka uluslar arası konferanslarda sunulacaktır. Bununla beraber elektromanyetik kalorimetre konfigürasyonu için yapılmış olan simülasyon çalışması Journal of Instrumentation'a (JINST) hakem değerlendirmesi için gönderilmiştir. JINST'in preprint formatı ve değerlendirmeye alınması ile ilgili web çıktısı sisteme ek olarak yüklenmiştir.

Bunula berber proje çıktılarından elde edilen ilgili sonuçlar iki ulusal konferansta sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

Prototip üretimi tamamlanmış olup prototip ile yapılacak testlere devam edilecektir. Ülkemizin bu yıl içinde yaşadığı sorunlar nedeniyle TÜBİTAK bünyesinde proje süreçlerinin aksaması, özellikle yurt dışından temin edilmesi gereken malzemelerin alımının uzaması, hizmet alımı yöntemiyle yapılacak işlerde çalışılacak firmaların tespitinde geçen süreler nedeniyle testlerin tamamlanması ve sonuçların simülasyonlarla karşılaştırılması için iki aylık bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Gelinen son aşamada bir kaç parçanın montajı ve güvenlik testlerinin yapılması gerekmektedir. İhtiyaç duyulan ek iki aylık süre zarfında testlerin tamamlanması, analizlerinin yapılması ve simülasyon çalışmaları ile karşılaştırılması yapılacaktır. Test sonuçları ile beraber elde edilen bulguların uluslararası dergilerde yayınlanması, sempozyum ve konferanslarda sunulması planlanmaktadır.

Proje kapsamında elde edilen tecrübeler, uluslar arası laboratuvarlarla yapılan işbirlikleri çerçevesinde detektör geliştirme araştırma çalışmalarına devam edilmesi öngörülmektedir. Prototipi hazırlanan kalorimetre tasarımının ülke içinde yüksek enerjili parçacık kaynakları ile yapılabilecek testlerinin tamamlanmasından sonra testlerinin, CERN, GSI gibi merkezlerde gerçekleştirilen demet testleri çalışmalarında yapılabilmesi için gerekli koşullar araştırılacak, ülkemizde yapılamayacak testlerin de yapılabilmesi için görüşmeler yapılacaktır. Bu amaçla gerekli olan maliyetlerin karşılanabilmesi için kaynak araştırmasına gidilecektir.

Kaynaklar

1. Agoritas V. ve Johnson C., “EMI aluminum cathode electron multipliers: CERN tests”, CERN MPS/CO Note 71–51 (1971).
2. Fröhlich, L., “Experience from the commissioning of the FLASH machine protection system”, Proc. 37th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, Hamburg, Germany, (2006).
3. Dehning B. *et al*., “LHC Beam Loss Detector Design: Simulation and Measurements”, FRPMN072 Proceedings of PAC07 (2007).
4. Nariyama, N. ve Taniguchi , S., “A secondary electron emission detector for measuring the intensity of synchrotron radiation”, Rev. Sci. Instrum. 76, 033302 (2005).
5. Greupner , H., ve Krebs , K.H., “Eine Abschätzung der nachweiswahrscheinlichkeit bei der messung geringster ionenstroöme mit hilfe von ionen—elektronen-wandleranordnungen”, Il7t. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 13 81-6 (1974).
6. Hamamatsu, "Hamamatsu Photomultiplier Tubes, Basics and Applications", 3. Baskı, (2007).
7. Zorn, C.,” A pedestrian's guide to radiation damage in plastic scintillators”, Radiat. Phys. Chem., Vol. 41, No. 1/2, pp 37–43 (1993).
8. Akkerman A.,”Ultrafast secondary emission X-ray imaging detectors: A possible application to TRD”, Nucl. Instrum. Meth. **A**315, 82-91 (1992).
9. Frumkin I. *et al.*, Properties of CsI based gaseous secondary emission x-ray imaging detectors, Nucl. Instrum. Meth. **A**329 337-347 (1993).
10. Ohya K., An Improvement of Secondary Emission Detector for Energy Analysis of Charge-Exchange Neutrals Emitted from High-Temperature Plasma, Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.12, no.4, pp.254,263 (1984).
11. Deck, C.,*et al.* Iguchi, H.; Jacquinot, J.; Kawabe, T., An Orientable Secondary Emission Detector for Plasma Experiments, *Plasma Science, IEEE Transactions on* , vol.3, no.2, pp.41,45, (1975).
12. Badano, L.; Ferrando, O.; Pezzetta, M.; Klatka, T.; Koziel, M.; Molinari, G., “SLIM (Secondary emission monitor for Low Interception Monitoring) an innovative non-destructiv beam monitor for extraction lines of hadrontherapy centre” .
13. Derevshchikov, A.A., *et. al.*,” On possibility to make a new type of calorimeter: Radiation resistant vefast”, IHEP preprint 90-99, Protvino (1990).
14. *Bitsadze , G.S., et. al., Module of electromagnetic secondary emission flight type calorimeter, Nucl. Instrum. Meth. **A**334, 399-408(1993).*

15. Winn D. R ve Onel Y., “Secondary Emission Calorimeter Sensor Development” J. Phys.: Conf. Ser. 404 012021 (2012).
16. Geant4 User's Guide for Application Developers Version: geant4 10.1
17. Beringer J., et al. (Particle Data Group), “The Review of Particle Physics”, Phys. Rev. D86, 010001 (2012).
18. Sternglass E. J., “Theory of Secondary Electron Emission by High-Speed Ions”, Phys. Rev. 108, 1 (1957).
19. Ferioli G. ve Jung R. “Evolution of the Secondary Emission Efficiencies of Various Materials Measured in the CERN SPS Secondary Beam Lines,” CERN-SL-97-071-BI, (1997) .
20. Hasselkamp, D., et al.,”Particle Induced Electron Emission II”, Springer-Verlag, Berlin ; New York, (1992).
21. Wigmans, R., “Calorimetry”, Clarendon Press, Oxford (2000). Pp. 186.
22. Abramowicz, H., et al., “The Response and Resolution Of An Iron-Scintillator Calorimeter For Hadronic ve Electromagnetic Showers Between 10 Gev ve140 Gev”, Nucl. Instr. Meth., 180 429 (1981).
23. Grobner, O., “Secondary Emission, Surface Effects veCoatings”, LHC-VAC Conference, Geneva, Switzerland,(2000).
24. Hachenberg, A. ve Brauer, W. “Secondary Electron Emission From Solids”, Advances İn Electronics And Electron Physics, Vol. 11, P. 413-499, (1959).
25. Scholtz, J.J., Dijkkamp, D. ve Schmit,Z R.W.A. “Secondary Electron Emission Properties” Philips J. Res. 50 , P 375-389, (1996).
26. Furman M. A. ve Pivi. M.T. F. “ Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 5, 124404, (2002).
27. Kirby R. ,King F., “Secondary electron emission yields from PEP-II accelerator materials,” NIM A 469:1, (2001).
28. Travia A.,Dingfelder M.,”Simulation of Secondary Electron Yields From Thin Metal Foils After Fast Proton Impact”,Radiation Protection Dosimetry (2011) Vol. 143 No. 2.
29. Brun R. ve Rademakers F., “*ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework”*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86. See also http://root.cern.ch/ .
30. Wigmans R., “Calorimetry: Energy measurement in particle physics,” International Series of Monographson Physics, vol.107, Oxford University Press, (2000), pg. 190-195.
31. Wigmans R., “in: C. and I. Buvat (Eds.), Handbook of particle detection and imaging”, vol. 1, Springer Verlag, (2011), pg. 497-517.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. FERHAT ÖZOK
Proje No:	113F337
Proje Başlığı:	İkincil Emisyon Elektronlarına Dayalı Kompakt Kalorimetre Tasarımı, Yapımı Ve İşletimi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	MUSTAFA NİZAMETTİN ERDURAN, TAYLAN YETKİN, ELİF ASLI YETKİN
Danışmanlar:	İSKENDER ATİLLA REYHANCAN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2014 - 15/03/2017
Onaylanan Bütçe:	462140.0
Harcanan Bütçe:	402919.55
Öz:	?İkincil Emisyon Elektronlarına Dayalı Kompakt Kalorimetre Tasarımı, Yapımı ve İşletimi? başlıklı projemizde yüksek enerji ve nükleer fizik deneyleri için ikincil emisyon elektronları kullanılarak kompakt ve modüler bir kalorimetrenin tasarlanması, üretilmesi ve test edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda öncelikle ikincil elektron emisyon (SEE) üretimi için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları için GEANT4 kullanılmıştır. Simülasyonlar için GEANT4 SEE Fizik sınıfı hazırlanmış test edilmiştir. Simülasyon verilerinin ışığında kalorimetre bileşenlerinin tasarımı üretimi ve testleri yapılmıştır.
Anahtar Kelimeler:	Kalorimetre, O?rnekleme tipi detekto?rler, Parc?acık sag?anakları, İkincil emisyon elektron, GEANT4
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK