

Yüksek Çözünürlüklü Elektron Spektrometresi için Sintilatör Ekran Konumlandırması

Mert Şekerci^{1,*}, Suat Özkorucuklu¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Çünür Doğu Kampüsü, 32260, Isparta, Türkiye

*Yazışılan yazar e-posta: mertsekerci@sdu.edu.tr

Alınış: 27 Kasım 2012, Kabul: 10 Nisan 2013

Özet: Bu çalışmada, elektron spektrometrelerinde (ESM) görüntüleme elemanı olarak kullanılan sintilatör ekranların yüksek çözünürlüklü sonuç elde edilmesi amacıyla hassas bir şekilde konumlandırılmaları için gerekli hesaplama ve benzetim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, manyetik alan ile yüklü parçacıkların bükülmesi sonrasında sahip oldukları enerji dağılımının 6 boyutlu uzayda benzetimini yapabilen ve demet karakteristiği hakkında bilgiler veren General Particle Tracer (GPT) paket programı kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektron spektrometre (ESM), yüksek çözünürlük, sintilatör ekran, konumlandırma.

Positioning of Scintillating Screens for High Resolution Electron Spectrometer

Abstract: In this study, required calculation and simulation operations were carried out to for precisely positioning the scintillator screens that used in electron spectrometers (ESM) as a viewing element to obtain high resolution results. For this purpose, a package program, General Particle Tracer (GPT) was used which could simulate the energy distribution of the charged particles in 6 dimension space after they bended due to a magnetic field and gives information about the beam characteristic.

Key words: Electron spectrometer (ESM), high resolution, scintillator screen, positioning.

1. Giriş

Elektron spektrometreleri (ESM), temel olarak iki ana kısımdan oluşan ve çalışma mantığı yüklü parçacıkların manyetik alan kullanılarak bükülmesine dayanan sistemlerdir [1]. ESM içerisinde ilerleyen elektron demeti, iki kutuplu mıknatıs sayesinde oluşturulan manyetik alana girdiği andan itibaren; yörüngelerinde elektronların enerjilerine göre farklı miktarlarda bükülmeler olacaktır ve bükülme miktarları Lorentz kuvveti ile hesaplanabilmektedir [2]. Günümüzde halen pek çok ESM çeşidi mevcut ve kullanılmaktadır. Örnek olarak yüzey bariyer detektörleri, termoluminesant dozimetreler, sintilatör fiberler, görüntüleme plakaları ve sintilatör ekranları (sintilatör-kamera detektörleri) gösterilebilir [3]. Sintilatör-kamera detektör sistemleri, sahip oldukları yüksek tekrarlanma oranlı çalışma hızı ve görüntülemelerinin sağladığı detaylı uzaysal dağılım bilgisinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu çalışma, 10 - 100 MeV aralığında enerjiye sahip ışınımlar üretebilen Laser Wake Field Accelerator (LWFA) - Lazer Dalga Alanı Hızlandırıcı (LDAH) demet hattında konumlandırılmış, sintilatör-kamera detektörüne sahip bir EMS'nin daha yüksek çözünürlükte görüntüleme yapabilmesi için sintilatör ekranların konumlarının tam ve hassas olarak belirlenebilmesi için gerçekleştirilmiştir [4, 5].

Şekil 1.'de hesaplamaların yapıldığı tanımlı sistem verilmiştir. Burada, yatay olarak l ekseninde ve şekle göre soldan sağa doğrultuda ilerleyen parçacıkların bükücü mıknatısa orta noktasından girdikleri varsayılarak bükülme yarıçapı ρ ve bükülme açısı α gösterilmiştir. Çizelge 1.'de kurulu deney düzeneği ve örnek modele göre tanımlanmış olan ve sabit olarak kabul edilen parametreler verilmiştir.

Çizelge 1. Bükücü mıknatıs özellikleri

İki Kutuplu –Bükücü– Mıknatıs Parametreleri	
Manyetik Alan	1 T
Mıknatıslar arası boşluk	5 cm
Mıknatıs-Yarık arası mesafe	1 cm
Mıknatıs Boyutları (x-y)	200 – 150 mm
K parametresi	1/6

Yüklü parçacıkların bükücü mıknatısa girdikleri noktanın yapılan analiz hesaplamaları sonucunda Denklem 1.'de de gösterildiği gibi çıkış açısını, dolayısıyla buna bağlı tüm değişkenleri etkilediği görülmüştür [7].

$$\beta_{ex} = \sin^{-1} \left(\frac{p - ep \cdot B \cdot 0,2998}{p} \right) \quad (1)$$

Bu ifade de β_{ex} çıkış açısını tanımlarken, p parçacığın sahip olduğu momentumun GeV/c cinsinden değerini, ep parçacıkların bükücü mıknatısa giriş konumlarının orijin kabul edilen sol alt köşeden olan mesafesini metre cinsinden ve B ise bükücü mıknatısın sahip olduğu manyetik alanı Tesla cinsinden temsil etmektedir.

2.2. Transfer Matrisleri ve 6-Boyutlu Uzay

Yüklü bir parçacığın veya birçok parçacıktan oluşan paketçik yapısının bir noktadan başka bir noktaya olan hareketini incelerken transfer matrisleri kullanılır. Transfer matrislerinin oluşturulabilmesi; hareket eksenini, koordinat sistemi, kullanılacak model ve parçacık enerjileri üzerindeki varsayımların, tanımlı sisteme uyumlu bir şekilde seçilmesi ile mümkündür [4]. Bu matrisler; altı boyutlu uzayda, yüklü parçacığın hareketinin var olduğu her bölge için farklı şekilde tanımlanır ve bu şekilde elde edilen matrisler hareketin tamamını ifade edecek olan tek bir matris oluşturulmasında kullanılır [3, 6]. Bir sistemde kullanılacak olan transfer matrisinin elde edilmesi için o sistemde var olan alt sistemlere ait transfer matrislerinin, yüklü parçacığın hareketinin ters istikametinde matris çarpımı yapılması gereklidir [3]. Bu işlem sonucunda elde edilen tek matris o sistem için kullanılabilir transfer matrisidir. Buradaki önemli olan bu matrislerin her birinin aynı boyutlu uzayda tanımlanmış olmasıdır.

Bu çalışmada Denklem 2.'de tanımlanmış olan 6-boyutlu uzayda hesaplanmış transfer matrisleri kullanılmıştır. Bunun nedeni, elektron paketçiklerinin bir noktadan diğer bir noktaya aktarılırken demet kalitesinin mümkün olduğu kadar sabit tutulmaya çalışılması ve bu amaçla da demet transferi sırasında 6-boyutlu faz uzayında tüm kontrollerin yapılması gerekliliğidir.

$$\mathbf{X}(s) = \begin{pmatrix} x \\ x' \\ z \\ z' \\ \delta l \\ \frac{\delta p}{p} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Bu tanımlama, tek bir parçacık için yapılarak benzetim programı aracılığı ile makro parçacık sistemine uyarlanmıştır. Kullanılacak olan bu sonuç transfer matrisi Şekil 1.'de gösterilen tanımlı sistem için Denklem 3.'de verilmiştir.

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}_{\text{cikis}} \mathbf{M}_{\text{kenar_cikis}} \mathbf{M}_{\text{miknatis_ic}} \mathbf{M}_{\text{kenar_giris}} \mathbf{S}_{\text{giris}} \quad (3)$$

Burada $\mathbf{S}_{\text{giris}}$ parçacıkların mıknatısa girmeden önceki sürüklenme bölgesindeki hareketlerini; $\mathbf{M}_{\text{kenar_cikis}}$ mıknatısın çıkış bölgesindeki kenarın parçacıklara etkisini, $\mathbf{M}_{\text{miknatis_ic}}$ mıknatısın iç bölgesinin parçacıklara etkisini, $\mathbf{M}_{\text{kenar_giris}}$ mıknatısın giriş bölgesindeki kenarın parçacıklara etkisini ve $\mathbf{S}_{\text{cikis}}$ ise parçacıkların mıknatıstan çıktıktan sonraki sürüklenme bölgesindeki hareketlerini tanımlamaktadırlar. Parçacıkların bu bölgelerdeki hareketlerini tanımlayan transfer matrisleri aşağıda verilmiştir [7].

$$\mathbf{S}_{\text{giris}} = \begin{pmatrix} 1 & s_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{\text{kenar_giris}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta_{12}}{\rho} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\tan(\beta_{11} - \psi_{12})}{\rho} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\text{miknatis_ic}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \rho \cdot \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & \rho \cdot (1 - \cos \alpha) \\ \frac{\sin \alpha}{\rho} & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 & \rho \cdot \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \rho \cdot (1 - \cos \alpha) & 0 & 0 & 1 & \rho \cdot (\alpha - \sin \alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$M_{kenar_ciltis} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta_{ex}}{\rho} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\tan(\beta_{ex} - \Psi_{ex})}{\rho} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$S_{ciltis} = \begin{pmatrix} 1 & s_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & s_f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Bu transfer matrislerinde kullanılan değişkenler ise Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Transfer matrisleri değişkenleri

s_i ve s_f	Yarığa ve kesişim noktasına olan mesafe
β_{in} ve β_{ex}	Parçacıkların giriş ve çıkış açıları
Ψ_{in} ve Ψ_{ex}	Giriş ve çıkış kenarlarında saçak alanı etkisi
α	Bükülme açısı
ρ	Larmor (Bükülme) yarıçapı

Denklem 3. kullanılarak parçacıkların tüm sistem boyunca referans parçacığa göre hareketini tanımlayan transfer matrisi elde edilir. Bu transfer matrisi ile parçacıkların ilk durumunu tanımlayan matrisin; matris çarpımı yapılarak parçacıkların son durum matrisleri Denklem 9.'da verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{pmatrix} x_f \\ x_f' \\ z_f \\ z_f' \\ \delta l_f \\ \frac{\delta p_f}{p_f} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ x_i' \\ z_i \\ z_i' \\ \delta l_i \\ \frac{\delta p_i}{p_i} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Buradan x_f için çarpım işlemi yapıldığında ise Denklem 10. bulunur.

$$x_f = T_{11}x_i + T_{12}x_i' + T_{13}z_i + T_{14}z_i' + T_{15}\delta l_i + T_{16}\frac{\delta p_i}{p_i} \quad (10)$$

Denklem 10. kullanılarak yapılan hesaplamalar ile bükücü mıknatısa farklı konumlardan giren, farklı enerji değerlerine sahip parçacıkların sahip oldukları enerjiyle orantılı olarak yörüngelerinde meydana gelen bükülmeler sonucunda yörüngelerinin bükücü mıknatıs içerisinde veya dışarısında kesiştikleri nokta tayin edilir. Bu kesişim noktası, her enerji değeri için farklı, sadece bir kez ve noktasal olacak biçimde Şekil 1'de gösterilen $x-l$ düzleminde gerçekleşecek şekildedir. Sintilatör ekranlarının bu noktasal kesişim noktalarına yerleştirilmeleri durumunda yüksek çözünürlüklü enerji spektrumu analizi yapılabilecektir. Bükülmenin bir düzlemde olduğu paralel-denk noktaya görüntüleme metodu kullanıldığından, Denklem 10.'da enerji (momentum)

dağılımı teriminin katsayısı olan T_{16} terimi dışında kalan diğer tüm terimlerin toplamı sıfıra eşit olmalıdır [4] ve bunun için ise kendiliğinden sıfır olmayan ifade olduğundan T_{11} teriminin sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir. Ancak, parçacıklar bükücü mıknatısı terk ettikten sonra bükülme olmadan doğrusal bir yol izleyerek hareketlerine devam ettikleri için T_{11} teriminin sıfıra eşitlenmesi ile elde edilecek s_f değeri, kesişim noktasının koordinatlarını doğru olarak vermeyecektir [7]. Bu durumda, trigonometrik bir hesaplama yapılarak kesişim noktasının tam koordinatı elde edilir ve en yüksek çözünürlükte sonuç için konum belirlenir.

2.3. Hesaplama Çalışması

Bu çalışmadaki analitik hesaplamalar Mathematica [8] paket programında geliştirilen kodlar ile yüksek enerji bölgesi ve düşük enerji bölgesi olarak tanımlanabilecek iki bölge için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu Mathematica kodları, tanımlanan sabitleri kullanarak, değişken değerleri hesaplamakta ve ardından bu değişkenleri ve sabitleri transfer matrislerinde kullanarak parçacıkların kesişim noktası olan s_f değerlerini hesaplamaktadır. Bu hesaplamaların, benzetim çalışmalarında kullanılacak programlar tarafından yapılabilmesi mümkün olduğu halde, ayrıca geliştirilen bu Mathematica kodları ile yapılması, hesaplama ve benzetim sonuçlarının uyumluluğunu kontrol etmektir.

Yapılan çalışmalarda 10-100 MeV enerji aralığı 5 MeV'lik artışlarla, 100-500 MeV enerji aralığı ise 25 MeV'lik artışlarla taranmış ayrıca parçacıkların mıknatısa girdikleri üç farklı giriş noktası; 0.0285 m, 0.075 m ve 0.140 m değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. 10 - 100 MeV enerji aralığının taranmasının nedeni LWFA'nin üretebileceği enerji aralığının bu değerler arasında olmasındandır. Kullanılan sistemde bükücü mıknatısının manyetik alanının 1T ve mıknatıslar arası mesafenin 50 mm olarak kabul edilmiştir. Ayrıca saçak alanı hesaplamasında kullanılacak olan k parametresinin $1/6$ olduğu ve Larmor (bükülme) yarıçapının ise Denklem 11.'de gösterildiği şekilde hesaplandığı bilinmektedir [7].

$$\rho = 3.335 \text{ p/B} \quad (11)$$

Burada p parçacıkların GeV/c cinsinden momentum değerini ifade ederken B ise Tesla cinsinden manyetik alandır. Parçacıkların birbirlerine paralel ve mıknatısın giriş kenarına dik olacak şekilde hareket ettikleri varsayıldığı için giriş açısı değeri β_{in} , sıfır olarak kabul edilir fakat çıkış açısı β_{ex} bükülme açısından 90 derece çıkarılması ile elde edilir. Negatif bükülme açısının elde edilmesi parçacıkların mıknatısın giriş yaptıkları kenara dik kenarından çıkış yaptıklarının göstergesidir. Giriş ve çıkış kenarlarındaki saçak alanı etkisi hesaplanırken giriş ve çıkış açısı değerleri değiştirilerek Denklem 12. kullanılır [6].

$$\psi_{ex} = ((k + g)/\rho) * (1 + \sin|\beta_{ex}|^2) \quad (12)$$

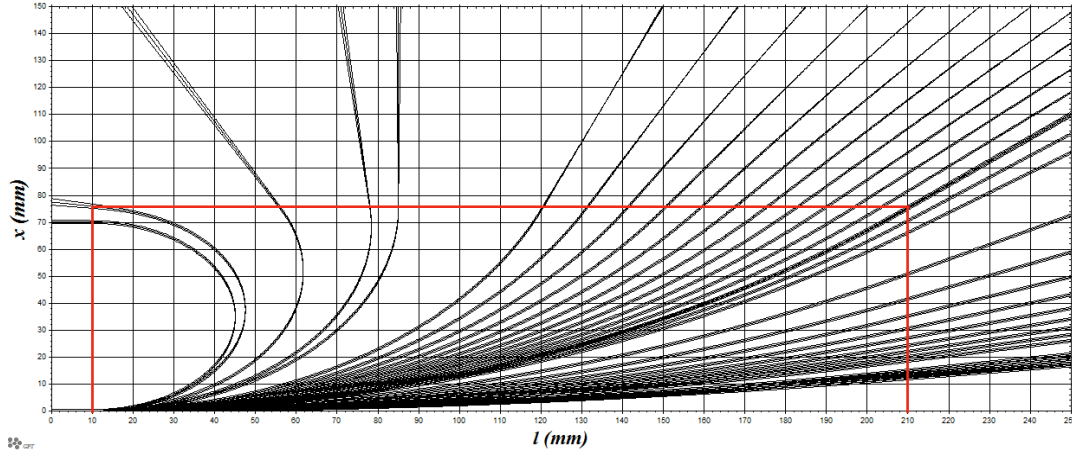
Bu eşitlikte ψ_{ex} saçak alanı etkisi için kullanılırken, k daha önce belirtilen saçak alanı parametresi, g bükücü mıknatıslar arasındaki boşluk mesafesi, ρ Larmor (bükülme) yarıçapı ve β_{ex} ise çıkış açısını tanımlamaktadır. Bükülme açısı olan α 'nın hesaplanmasında ise trigonometrik eşitlikler kullanılmıştır. Bu açıklamalar ve

denklemler ışığında geliştirilen Mathematica kodları ile daha önce belirtilen enerji aralığı ve parçacıkların mıknatısa giriş noktaları için her bir duruma ait Larmor yarıçapı, bükülme açısı, parçacıkların mıknatıstan çıkış açısı ve kesişim noktaları değerleri hesaplanmıştır.

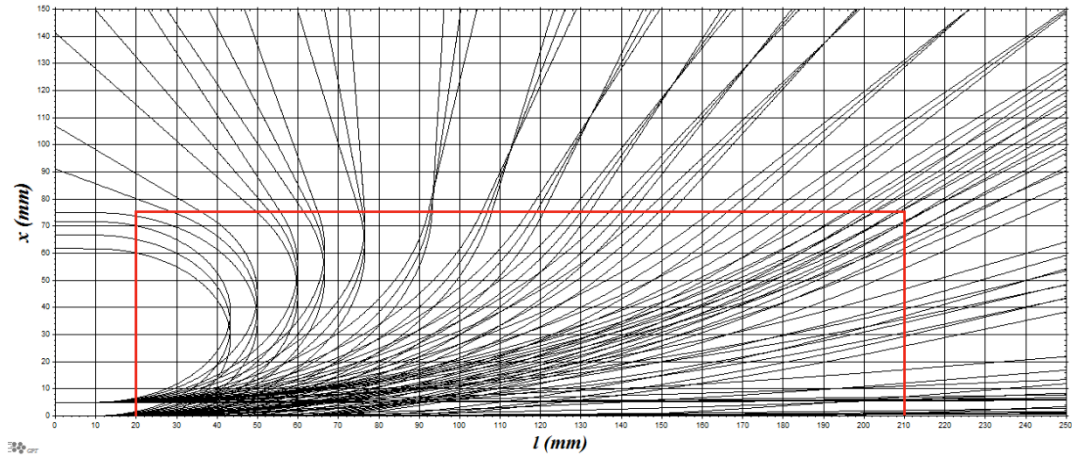
2.4. Benzetim Çalışması

Bu çalışmada GPT (General Particle Tracer) isimli paket program kullanılmıştır [9]. GPT, farklı işletim sistemlerinde kullanılabilen ve yüklü parçacıkların elektromanyetik alan altındaki dinamiklerini hesaplayabilen yüksek başarımlı bir benzetim programıdır. Bu program ile daha önce oluşturduğumuz Mathematica kodu ile yaptığımız hesaplamaların benzetimini gerçekleştirilmiş ve her iki işlem sonucunu karşılaştırarak doğruluklarının kontrol edilmesi sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda daha önce belirtilen enerji aralığındaki parçacıkların hareketleri ve kesişim noktalarının varlığı, Şekil 2.'de parçacıklar arasındaki mesafe 5 mm olduğu, Şekil 3.'de ise 0.5 mm olduğu durumlar için görselleştirilmiştir. Her iki şekilde de, çerçeve içerisinde kalan alan bükücü mıknatısın iç kısmının üst yarısını temsil etmektedir.



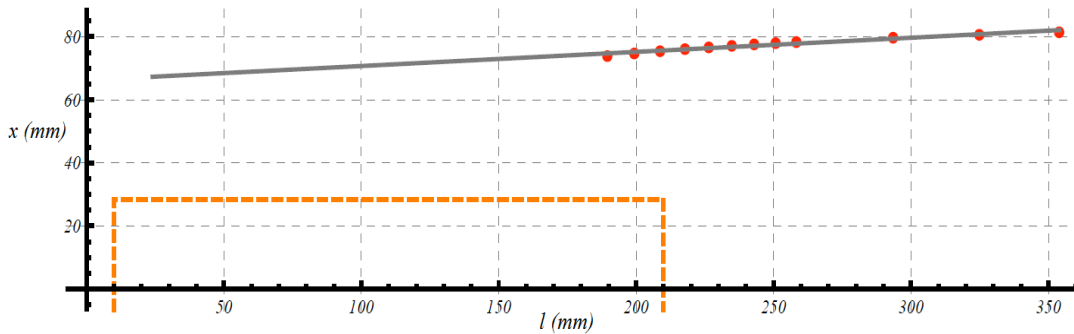
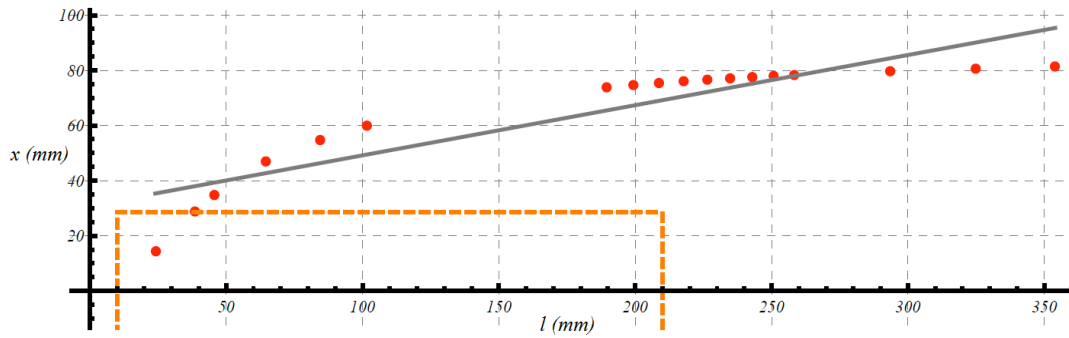
Şekil 2. 5 mm aralıklı yüklü parçacıkların manyetik alanda hareketleri



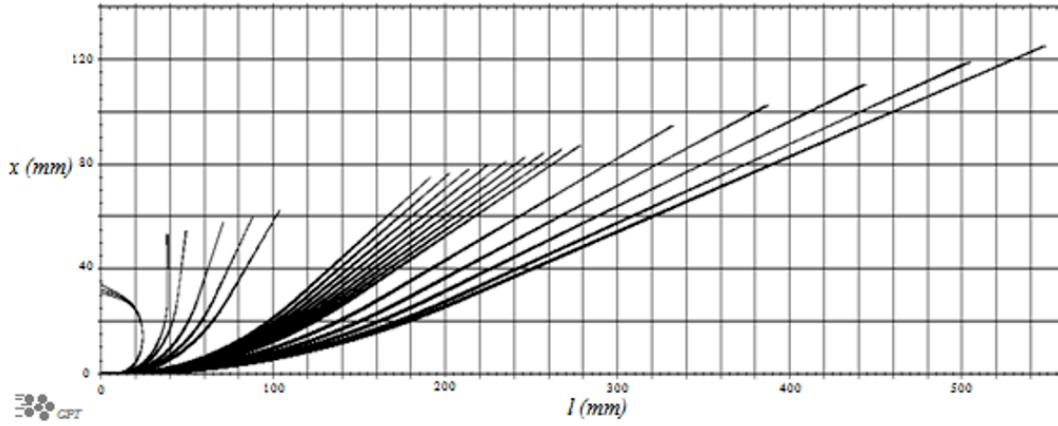
Şekil 3. 0.5 mm aralıklı yüklü parçacıkların manyetik alanda hareketleri

Şekil 2. ve Şekil 3.'te görüldüğü gibi, çok yüksek enerji bölgelerinde mıknatısa 0.075 m'den giren parçacıkların muhtemel kesişim noktaları oldukça uzakta olmakta ve ayrıca parçacıkların mıknatısa girdikleri kenarın paralelinde olan kenardan çıktıkları için görüntülenmeleri ancak ikincil bir ekran kullanılması durumunda mümkün olabilmektedir. Takip eden süreçte, GPT benzetim programında ekran tanımlaması yapılmadan önce, Mathematica kodu ile farklı enerji değerlerinde parçacıklar içeren demet için en iyi çözünürlüğü sağlayacak muhtemel ekran konumlandırmasını yapabilmek için hesaplamalar tekrarlanmış ve ayrıca GPT ile elde edilen kesişim noktalarının koordinatları belirlenmiştir. Benzetim programında ekran tanımlaması yapıldıktan sonra ise daha önceki hesaplamalarda ve benzetimlerde kullanılan enerji değerlerindeki demetler bu ekran üzerine gönderilmiştir. Benzetim programında kullanılan bu ekran komutunun özelliği, parçacıkların üzerine çarpmalarından sonra yok olmalarını sağlamasıdır. Bu sayede ekran üzerindeki benek büyüklüğü (parçacık demetlerinin ekran üzerinde bıraktıkları kesit alanı) hesaplanarak çözünürlük ve bu sayede de enerji -momentum- dağılımı hakkında yorum yapılabilmektedir.

Bu işlemlerden, tüm kesişim noktalarının kullanılması sonucu elde edilen muhtemel ekran konumu Şekil 4.'de; sadece yüksek enerji bölgesindeki parçacıklara ait kesişim noktalarının kullanılması sonucu elde edilen muhtemel ekran konumu ise Şekil 5.'de gösterilmiştir.



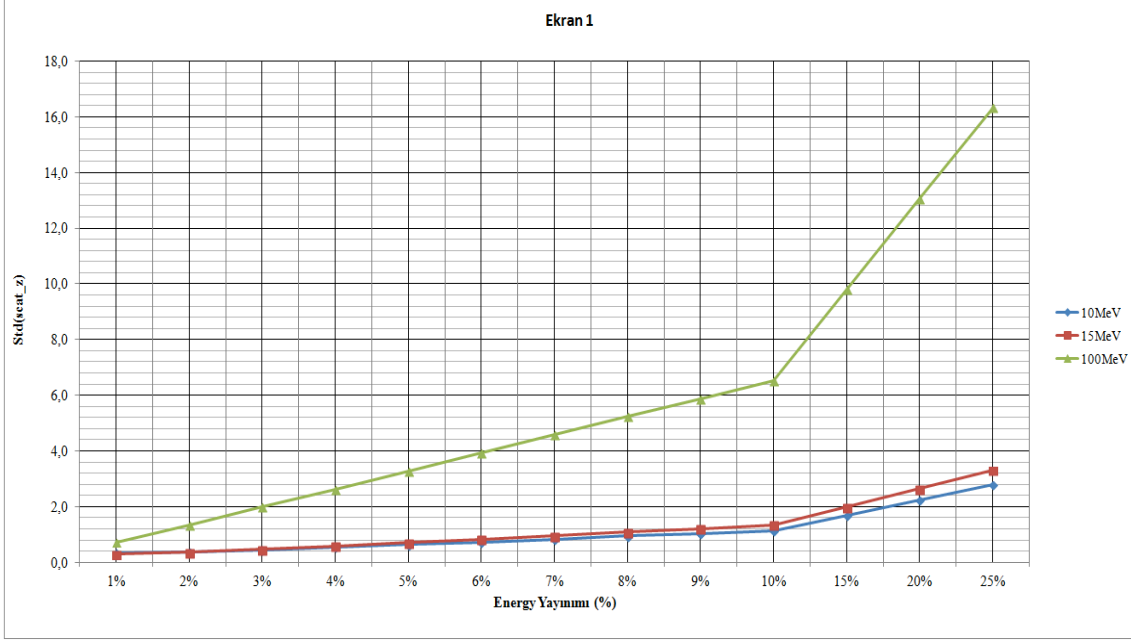
Şekil 4. ve Şekil 5.'de gösterilen hesaplamalar parçacıkların bükücü mıknatısa girişlerinin 0.0285 m olması durumuna aittirler. Benzetim programında ekran komutunun kullanılması sonucu ise Şekil 6.'da görselleştirilmiştir.



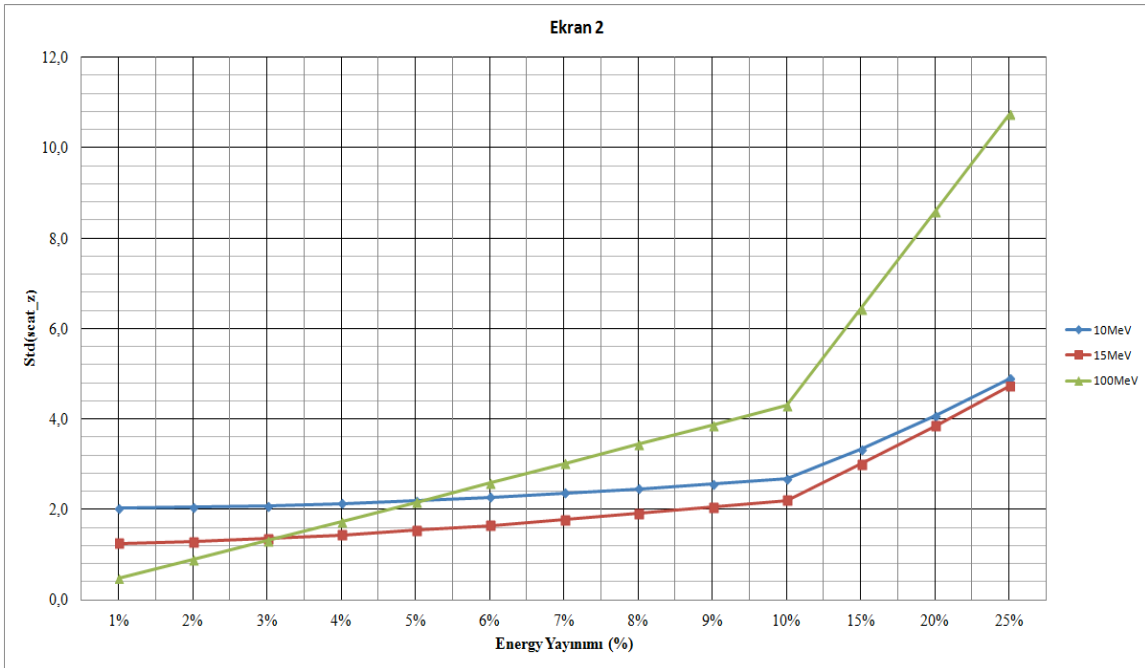
Şekil 6. GPT benzetim programında sintilatör ekran konumunun modellenmesi

3. Tartışma ve Sonuç

Gerçekleştirilen hesaplama ve benzetim çalışmalarıyla, tanımlı sistemin üretebileceği 10 – 100 MeV aralığındaki ışınımların tamamını yüksek çözünürlük ile görüntülemek için kullanılacak olan Ekran 1.'in Şekil 4.'de gösterildiği gibi yerleştirilmesi gerektiği hesaplanmıştır. Sadece yüksek enerji bölgesinin yüksek çözünürlük ile görüntülenmek istenmesi durumunda ise kullanılacak olan Ekran 2.'nin Şekil 5.'deki şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Her iki ekran için hesaplamaların doğruluğu 10, 15 ve 100 MeV enerji değerlerine sahip parçacıklar içeren demetler kullanılarak benzetim çalışmaları ile kontrol edilmiştir. Bu amaçla belirtilen enerji değerlerinde parçacıkları içeren paketçikler; enerji yayınımları %1'den %10'a kadar birer birer ve %10'dan %25'e kadar beşer beşer artacak şekilde tanımlanarak ekrana çarptırılmış ve ekran üzerindeki izleri incelenmiştir. Şekil 7. ve Şekil 8.'de gösterilen grafiklerde yatay eksen tanımlanan enerji yayınımlarını, dikey eksen ise ekran üzerindeki çarpmalar sonucu oluşan izlerin büyüklüğünü ifade etmektedir. Her iki enerji aralığına yönelik ekran konumlandırmasındaki ortak beklenti, enerji yayılım değerinin değişmesi ile ekran üzerine çarpmalar sonucu oluşan izlerin miktarlarının değişmesinin yüksek hassasiyetle ölçülmesi ve bu sayede yüksek çözünürlüklü sonuçların elde edilip edilemeyeceğinin gözlemlenmesidir. Yapılan benzetimler sonucunda elde edilen ve Şekil 7. ile Şekil 8.'de gösterilen grafiklerle açıklanan durumlara göre, yüksek çözünürlük elde etmek amacıyla yerleştirilen ekranlar, her iki tarama aralığında da sadece yüksek enerjili parçacıkların gözlemlenmesi amacına başarıyla hizmet etmiş ve olumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 7. Tüm enerji değerleri için ekran çözünürlüğü yorumu



Şekil 8. Yüksek enerji değerleri için ekran çözünürlüğü yorumu

Teşekkür

Bu çalışma, “Summer Student” Yaz Okulu Öğrencisi olarak Almanya’nın Dresden kentinde bulunan Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) araştırma merkezinin “Laser-Particle Accelerator” biriminde görevli Dr. Arie Irman gözetiminde gerçekleştirilmiştir. Dr. Irman’a ve HZDR’ye sağlanan imkanlar ve olumlu etkilerinden ötürü; ayrıca Yükseköğretim Kurumu Yurtdışı Lisansüstü Eğitim Bursları birimine bu programa katılmamı maddi olarak desteklemelerinden ötürü teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Nakamura K., Wan W., Ybarrolaza N., Syversrud D., Wallig J., ve Leemans W.P., 2008. Broadband single-shot electron spectrometer for GeV class laser-plasma-based accelerators, *Review of Scientific Instrument*, 79, 053301.
- [2] Leemans W. ve Esarey E., 2009. Laser-driven plasma-wave electron accelerators, *Physics Today*, 62(3), 44-49.
- [3] Wille K., 1996. The Physics of Particle Accelerators: An Introduction, *Oxford University Press*.
- [4] Irman A., 2012, Özel görüşmeler.
- [5] Pukhov A., Meyer-Ter-Vehn J., 2002. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime, *Applied Physics B*, 74, 355-361.
- [6] Brown K.L., 1982. SLAC Report – 75, Rev.4
- [7] Dugan G., Misuri A., Leemans W., 2001. Design and performance estimates for the l'OASIS experiment magneti spectrometers, *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- [8] <http://www.wolfram.com/mathematica> (Erişim Tarihi : 02/07/2012).
- [9] GPT Kullanıcı Kitabı, 2012. Pulsar Physics.

Suat Özkorucuklu eposta: suatozkorucuklu@sdu.edu.tr