



Lineer Hızlandırıcılarda Salındırıcı Yapılarının Tasarımı ve Optimizasyonu

Hatice DURAN YILDIZ*¹

¹Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, 06830, Ankara, Türkiye

*yazışılan yazar e-posta: hdyildiz@ankara.edu.tr

(Alınış: 10.04.2018, Kabul: 10.05.2018, Yayımlanma: 31.05.2018)

Özet: Tek renkli, eş fazlı ve yüksek pik gücüne sahip lazer ışını elde edebilmek için yüksek enerjili, yayınıcı düşük elektron demetlerine, salındırıcı yapısına ve optimize edilmiş salındırıcı parametrelerine gereksinim duyulur. Bu çalışmada lineer hızlandırıcı sistemlerde elde edilen yüksek enerjili elektron demetlerinin salındırıcı boyunca uzaysal davranışları, farklı alternatifler üzerine salındırıcı yapısı ve demet yolu boyunca salındırıcının yerleşim optimizasyonu ve parametrelerinin simülasyonu yapılmıştır. Elektron demetlerinin manyetik yapılar, salındırıcı içerisindeki davranışlarının uzaysal modellemesinin ve salındırıcı sistemin modelleme sonuçlarının birbirini destekler değerlerde olması gerekir. RADIA Programı ile yapılan modelleme çalışmaları ve analitik hesaplamalar sonunda salındırıcının aralık genişliği, salındırıcı uzunluğu, salındırıcının K parametresi, doyum uzunluğu, oluşan lazerin doyum gücü ve diğer parametreler optimize şekilde elde edilmiştir. 3 GeV'den daha yüksek enerjili kompakt elektron demetleri 12 mm aralıkla yerleştirilmiş şekilde modellenen salındırıcıda 31.5 m uzunluğunda doyuma ulaşarak eş fazlı bir şekilde ışına yapar. Bu ışımaların üst üste bindirilmesiyle GigaWatt gücünde lazer elde edilir. Çalışmalarda salındırıcı parametresi, K'nın etkisi de dahil edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Lineer Hızlandırıcı, Salındırıcı, Eşfazlı, Doyum Uzunluğu, Doyum Gücü.

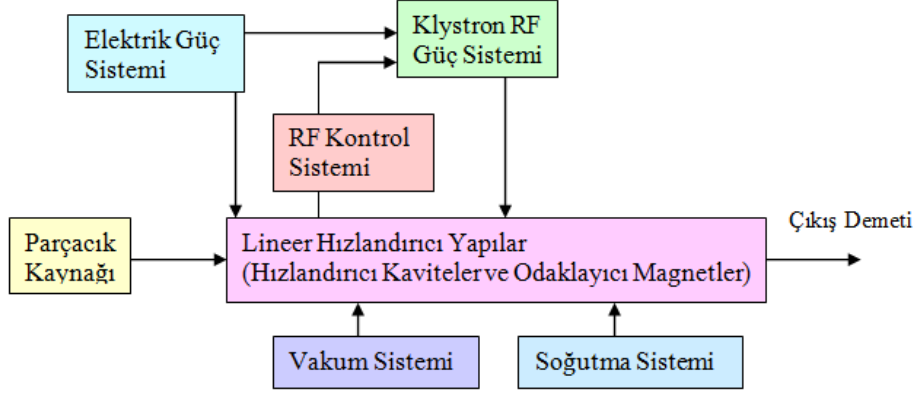
Design and Optimisation of Undulator Structures at Linear Accelerators

Abstract: High energy electron beam with low emittance, undulator structure, and optimized undulator parameters are required in order to have monochromatics, coherent, and high peak power laser light. In this study, the spatial behaviours of the high energy electron beams which is obtained in the linear accelerator systems, the undulator structure on the different alternatives, and the placement optimization and parameters of the undulator along the beam line are simulated. Spatial modeling of the behavior of electron beams in magnetic structures, undulator and the modelling results of the undulator system must be supportive each other. Modelling studies with the RADIA Program and at the end of the analytical calculations, the gap width, undulator length, saturation length, undulator K parameter, saturation power of the generated laser and the other parameters of the oscillator have been obtained and optimized. Compact electron beam energy with higher than 3 GeV coherently radiate reaching saturation of 31.5 m long in the undulator which is modelled at 12 mm intervals. By superimposing these radiation, the laser is obtained in the GigaWatt power. In the studies, the effect of the undulator parameter, K, was also included.

Key words: Linear Accelerator, Undulator, Coherent, Saturation Length, Saturation Power.

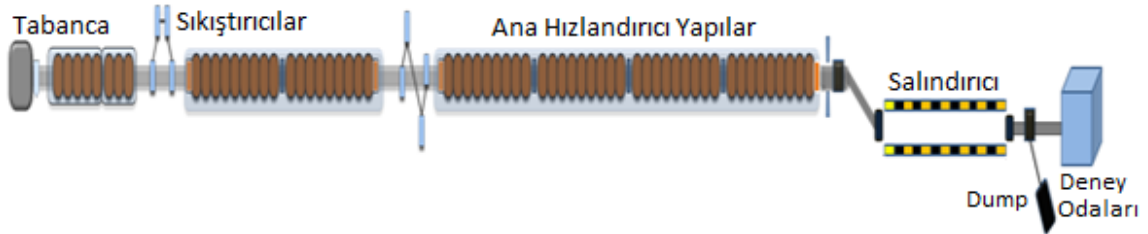
1. Giriş

Günümüzde hızlandırıcı sistemler parçacık kaynağı, ana hızlandırıcı kısımlar ve ışının elde edildiği salındırıcı yapılar olmak üzere üç ana bölümde incelenmektedir. RF alanları ve soğutucu yapılar, vakum, kontrol, diyagnostik sistemleri gibi yardımcı birçok sistem de üç ana yapı içerisinde yer alır. Ana hatlarıyla lineer bir hızlandırıcı Şekil 1.'de görülmektedir.



Şekil 1. Lineer hızlandırıcılarda ana sistemler

Kaynaktan elde edilen temel parçacık demetleri RF güç sistemleri sayesinde süper iletken ve normal iletken kavite ve odaklayıcı yapılar aracılığıyla hızlandırılarak demet enerjileri yükseltilir. Bu sırada demetin kalitesi, yeri, akımı ölçülüp, diyagnostiği yapılır. Aşağıda, Şekil 2.'de lineer hızlandırıcı bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2. Lineer hızlandırıcı bileşenleri

Yüksek enerjili elektron demetleri salındırıcı manyetik yapılardan (undulatör) geçerken ışın yapar. Bu ışın tek renkli, yüksek güce sahip ve eş fazlı olarak elde edilebilir. Salındırıcı manyetik yapılar olarak günümüzde SmCo ve NdFeB kullanılmaktadır. Salındırıcı magnet yapıları ışın elde edildiği ve dışarı uygulama odalarına alındığı bölüm olduğundan önemlidir. Yapılan modelleme çalışmalarında hızlandırıcı sistem içerisine demet yolu boyunca demet odaklayıcı kuadrupol, sıkıştırıcı demet kompresörleri, süper iletken (SC) demet hızlandırıcı ve enerji yükseltici kavite hücreleri yerleştirilmiştir. Süper iletken kavite içerisine RF alanları uygulanarak demetler hızlandırılmaktadır. Enerjileri yükseltilmiş demetler manyetik salındırıcılardan geçerken ışın yaparlar. Salındırıcı bölümünde enerjisini kaybeden elektronların dışarı alınmasını sağlayan dış kısmı alüminyum, iç kısmı karbondan oluşan silindir şeklinde dump (Faraday Kafesi) sistemi bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında 1 - 3.5 GeV elektron demet enerjili, 1 - 15 nm dalga boylu ve GW mertebesinde yüksek güçlü lazer elde edilmesi öngörülmektedir. Salındırıcı tasarım ve yerleşim parametrelerinin elde edilmesi kapsamında yapılan çalışmalar $3\frac{1}{2}$ - hücrelik tabanca hızlandırıcı kavitesi ve ana hızlandırıcıda 3.45 GeV enerjili elektron demetlerinin elde edilmiş çalışmalarının devamı şeklindedir [1].

Güney Kore'de 0.1-13 nm dalga boyu aralığında lazer elde edilebilen PAL-XFEL (Pohang Accelerator Laboratory) ve FLASH2 (Desy, Almanya) Deneyleri, elde edilen lazer dalga boyu, ulaşılan demet enerjileri ve diğer demet parametreleri açısından çalışmalarımızla benzer değerlere sahiptir [2, 3]. Elde edilmesi planlanan 1-15 nm dalga boylu lazerler; magnetik malzemelerin özelliklerinin araştırılmasında, protein altyapısının, kodlanması ve üretilebilecek kopyalarının araştırılmasında ve malzemelerin yüzey analizi çalışmalarında kullanılacaktır.

2. Materyal ve Metot

Lineer hızlandırıcılarda süper iletken kaviterler sayesinde hızlandırılarak demet halinde yüksek enerjilere ulaştırılan elektronların salındırıcı aralığı içerisinde ışınım yapması, gelen elektron demetlerinin enerjisine, demetin kompaktlığına, salındırıcının uzunluğuna, dalga boyuna ve özellikle salındırıcı parametresine bağlıdır.

Yapılan modelleme çalışmaları demir hibrid salındırıcının seçilmesinin istenilen dalgaboyunu kapsaması yönünden uygun olduğunu göstermiştir. Alttaki Tablo 1.'de, Denklem 1.'deki pik manyetik alanı göz önüne alınarak, bütün farklı malzemeleri içeren salındırıcı çeşitleri için özellikler verilmiştir.

$$B_{peak} = a \text{Exp} \left(b \frac{g}{\lambda_u} + c \left(\frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Burada a, b ve c aşağıda Tablo 1'de verilen sabitler olmak üzere, g salındırıcı aralığı ve λ_u da salındırıcının dalga boyudur.

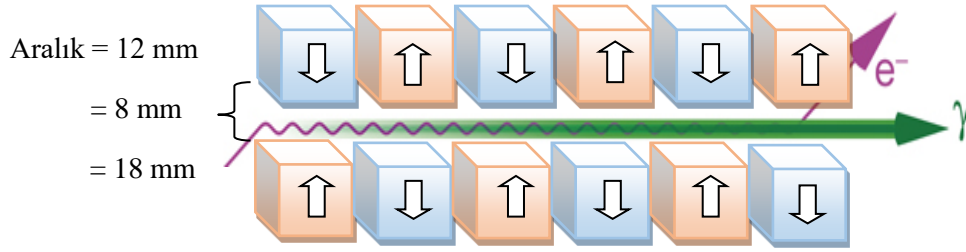
Tablo 1. Manyetik alanı, dalga boyu ve salındırıcı aralığına göre değişim gösteren ve üretimi yapılabilen 8 farklı salındırıcı sistemi

Tip	Tanım	a	b	c	Sınırlar (cm)
A	PPM*, Planar, Dik Manyetik Alan	2.076	-3.24	0	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
B	PPM*, Planar, Yatay Manyetik Alan	2.4	-5.69	1.46	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
C	PPM*, Helical Manyetik Alan	1.614	-4.67	0.62	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
D	Hibrid ile Vanadium Permendur	3.694	-5.068	1.52	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
E	Hibrid ile Demir	3.381	-4.73	1.198	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
F	SC, Planar, Aralık=1.2 cm	12.42	-4.79	0.385	$1.2 < \lambda_u < 4.8$
G	SC, Planar, Aralık=0.8 cm	11.73	-5.52	0.856	$0.8 < \lambda_u < 3.2$
H	Electromagnet, Planar, Aralık = 1.2 cm	1.807	-14.3	20.316	$4 < \lambda_u < 20$

*PPM = Pure Permanent Magnet (Magnet Block Material: NdFeB) [4]

2.1 Salındırıcı Parametrelerinin Seçimi

Lazer üretiminde salındırıcının magnet materyali ve manyetik aralık en önemli tasarım parametrelerindedir. Bu makalede 8, 12 (detaylı) ve 20 mm olmak üzere 3 farklı manyetik aralık üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Son yıllarda parlak X-ışınlarını elde etmek için vakumlu salındırıcılar artan sıklıkta kullanılmaya başlanmıştır. Vakumlu salındırıcılar demet yolu boyunca bileşenlerin düzenlenmesi ve hizalanması için de kullanılır. Bu salındırıcıların bir dezavantajı fazdan kaynaklanır. Faz iki tür zorluk çıkarır. Birincisi yüksek vakum altında magnet sıralanışı sadece dikey doğrultuda değil elektron yolu boyunca da hareket eder. Diğer dezavantaj ise hareketli magnet sıralanışının uçları ile vakum açıklığının RF geçişlerinin birleştirilmesindedir. Böylece vakumlu durumda çok yöne ayarlanmış salındırıcı geliştirmek zordur. Şekil 3.'te görüldüğü gibi 2 karşılıklı set halindeki salındırıcı sistemi arada elektron demetinin geçeceği ve lazerin elde edileceği aralık 20, 12 ve 8 mm şeklinde alınmıştır. Bu aralık, “step motor” denilen bir sistem ile daraltılıp genişletilebilmektedir. Aralığın genişliği elde edilecek lazerin doyum uzunluğu, dalga boyu ve salındırıcı parametresi ile orantılıdır. Aralığın küçük değerlerinde lazer daha çabuk doyuma ulaşır; yani, doyum uzunluğu daha kısadır. Küçük alınan aralık, daha az akım ve verilen manyetik alana ulaşmak için manyetik materyalin gerektirdiği daha az hacim demektir. Elektron demetinden elde edilen ışınlar dar aralık içerisinde eş fazlılığı yakalamak için uygun ortamı daha çabuk elde ederler. Fakat aralığın gereğinden fazla dar olması da elektronların ışıma yapmalarını zorlaştırır.



Şekil 3. Manyetik yapıların dizilişi

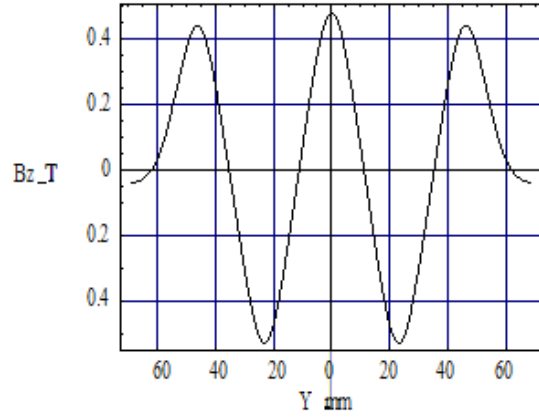
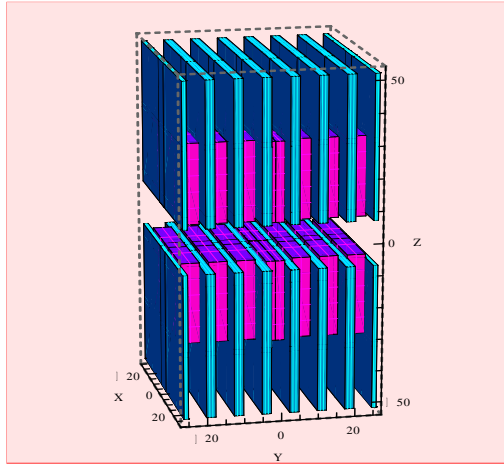
Aşağıda, Tablo 2.'deki değerler sırasıyla 8 ve 12 mm aralıklar için diğer parametrelerin uyum aralığını göstermektedir. Tablodan görüleceği üzere salındırıcı aralığına göre pik manyetik alanı ve salındırıcı uzunluğu değişmektedir.

Tablo 2. Salındırıcı Parametreleri

Parametre, [Sembol]	Birim	Değeri
Salındırıcı aralığı, [g]	cm	1.2 (0.8)
Salındırıcı periyodu, [λ_u]	cm	1,5
Pik manyetik alanı, [B_{peak}]	T	0.4817 (0,787)
K parametresi	-	(1,1)
Salındırıcı periyod sayısı, [N_u]	-	(1580)
Salındırıcı uzunluğu, [L_u]	m	30 (23,7)
SC Planar	-	F
FODO Periyodu	m	6,6
Kuadrupol uzunluğu	m	0,1256
Beta	m	8

Salındırıcı tolerans gereksinimleri, salındırıcı için, $0.1 < g / \lambda u < 1$ şeklinde alınır. Aralık ve salındırıcı dalgaboyu üzerine gelen sınırlama aralık şeklinde olup, ışın dalgaboyunu etkilemektedir.

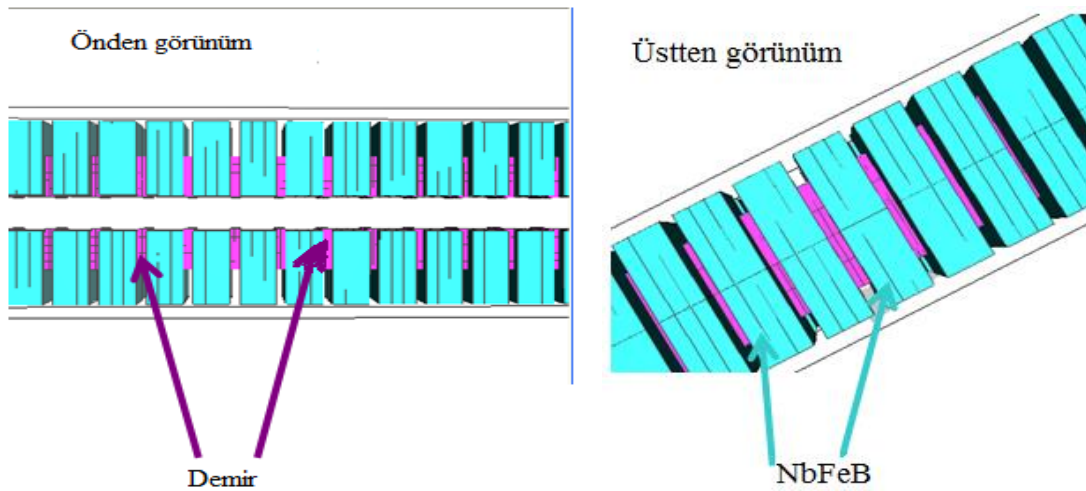
Salındırıcı için sıralı şekilde NdFeB alaşımı ve Fe kullanılması öngörülmektedir. Salındırıcı blokları dikdörtgensel şekilde seçilmiştir. Salındırıcı sistemi için aralık 12 mm ve salındırıcı periyodu 15 mm'dir. Merkezi manyetik alan $B_z(0, 0, 0) = 0.4817 T$ 'dir. Aşağıda, Şekil 4.a)'da salındırıcı yapının manyetik materyallerinin 12 mm aralık alınarak Radia Kodu ile modellenmesi sonucu salındırıcı magnetlerinin dizilişinin 3 boyutta görünümü verilmektedir [5]. Salındırıcı magnetlerin manyetik alanının y eksenine doğrultusundaki salınım davranışı ise b)'de görülmektedir.



Şekil 4. a) Salındırıcının Radia Programı ile 3 boyutta modellenmesi,

b) Manyetik alanın y eksenine boyunca davranışı

Radia ile salındırıcı tasarımının geometrik yapısının önden ve üstten 2 boyutta görünümü aşağıdaki şekildedir (Şekil 5.). Salındırıcı magnetlerin materyali olarak; pembe renkli aradaki küçük kısımlar demirden, büyük bloklar ise NbFeB kalıcı (Permanent) materyallerinden yapılmıştır.

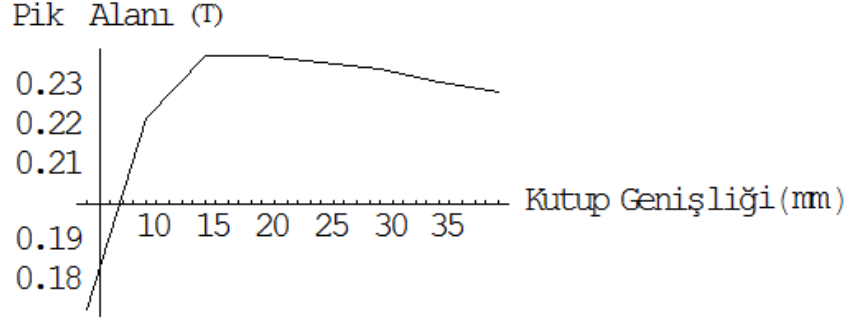


Şekil 5. Salındırıcı sisteminin a) Önden görünümü,

b) Üstten görünümü

Magnet materyalleri kolayca kırılabilirdiği için dikkatli taşınmalıdır. Ayrıca taşıma sırasında birbirlerine yapışma tehlikesine karşı önlem alınmalıdır. Magnetlerin yakınına metal içeren eşyalarla yaklaşılmamalıdır. NbFeB, demagnetiklenmeye karşı son derece dayanıklıdır.

Çalışmamızda bir set 5 m uzunluğunda olmak üzere 6 set (5x6=30 m) halinde tüm salındırıcı sistemi öngörülmüştür. Salındırıcının pik manyetik alanı için Tablo 1’de verilen a, b ve c sabitlerinden yararlanarak “E” ve “F” salındırıcı tipleri seçilmiş ve bunlar üzerine Radia kullanılarak pik manyetik alanına göre kutup genişliği elde edilmiştir (Şekil 6.).



Şekil 6. Radia çalışmaları sonucunda pik manyetik alanının (T) kutup genişliğine (mm) göre değişimi

Mıknatıslanmanın (Magnetization) Ortalama Kararlılığı: 0,000283585 T
 Maksimum Tam Mıknatıslanma: 2,10744 T
 Maksimum H Vektörü: 1,07691 T
 Merkezdeki Manyetik Alan $B_z(0,0,0)$: 0,240426 T

Merkezi manyetik alanın 2 farklı değeri için ($B_z(0,0,0) = 0.4817 T$, $B_z(0,0,0) = 0,240426 T$) ve salındırıcının 2 farklı aralık uzunluğu için (12 mm ve 18 mm) değerler hesaplanmıştır.

- Salındırıcı türü Demir-Hibrit ve magnet malzemesi olarak NbFeB kalıcı (permanent) magnet seçilmiştir.
- Aralık uzunluğu örnek olarak maksimum durum (en geniş) 20 mm alınarak Radia programında 3 cm periyotlu, periyot sayısı 60 olan salındırıcı tasarlanmıştır (Tablo 3.).
- Tasarımı yapılan salındırıcı kısmı 1.8 m uzunluğundadır.

Tablo 3. Radia ile yapılan modellemede kullanılan parametreler

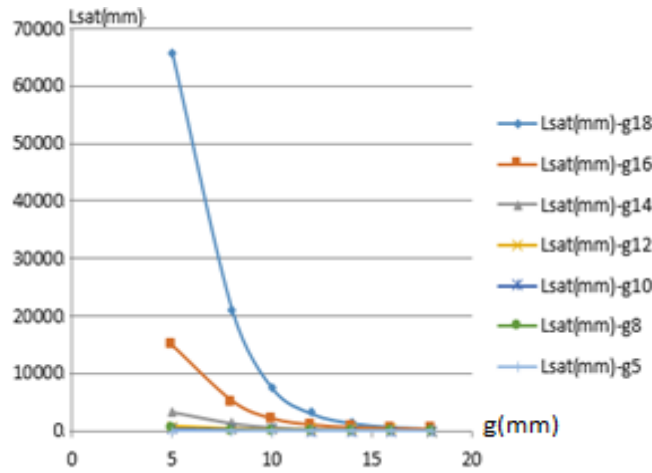
Salındırıcı Parametreleri	Değeri
Salındırıcı periyodu [mm]	30
Periyot Sayısı	60
Salındırıcı Parametresi	0.3-0.9
Maksimum Salındırıcı Parametresi	0.8
Salındırıcı aralığı (mm)	20

Merkezdeki manyetik alan $B_z(0,0,0) = 0.240426 T$ için Radia ile tasarlanan salındırıcıların pik manyetik alanının (T) kutup genişliğine (mm) göre değişimi ve salındırıcı magnetlerin manyetik alanı Şekil 4.'e benzer şekilde elde edilmiştir. Fakat 20 mm'den düşük aralıklarda ışımının daha etkin elde edildiği görülmüştür. 20 mm aralıkta alan dağılım etkileri etkindir.

3. Bulgular

Modelleme çalışmaları ile bir önceki başlıkta elde edilen sonuçlara göre aralığı 12 mm ve salındırıcı periyodu 15 mm olan, $B_z(0,0,0) = 0.4817 T$ merkezi manyetik alan seçeneğinin çalışmalar kapsamında devam ettirilmesine karar verilmiştir. Dünyadaki salındırıcı sistemi üzerine yapılan çalışmalarda aralığı 8 mm ve hatta 5 mm değerlerinde vakum içerisine çalışan salındırıcı sisteminin kullanıldığı ileri teknolojilerin ürünü sistemler de mevcuttur [6, 7]. Bu değer aralıklarında modelleme çalışmaları da devam etmektedir.

Aralık değerleri aktif Dünya Laboratuvarlarındaki aralık değerleri olan 5-12 mm değerlerini de kapsayacak şekilde 5-18 mm aralığında alınarak yapılan modelleme çalışmalarının sonucu olarak aralığın lazerin doyum uzunluğuna göre değişimi Şekil 7.'de görülmektedir.



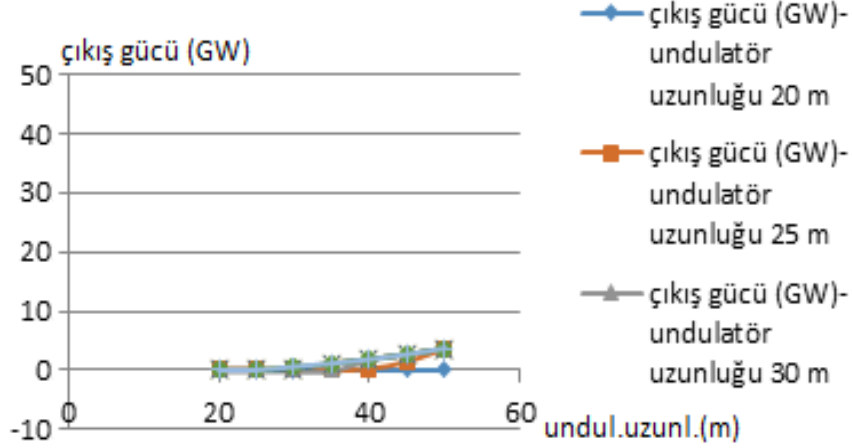
Şekil 7. Demir hibrit salındırıcı aralığının doyum uzunluğuna göre değişimi

Tablo 4. Salındırıcı ve demet özellikleri

Parametre	Değeri
Enerji (GeV)	3,45
Pik akımı (kA)	2,000
Yük (nC)	0,100
Normalize yayınım (mrad)	1,002
Enerji dağılımı (MeV)	1,040
Salındırıcı periyodu (mm)	15,000
K-rms	1,280
FODO-periyodu (m)	6,600
Kuadropol uzunluğu (m)	0,1780
Beta (m)	7,000
Salındırıcı uzunluğu (m)	35,100

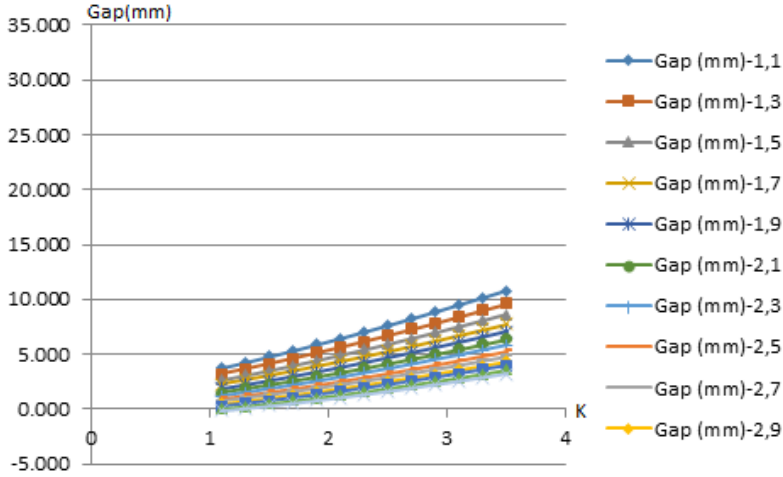
M. Xie Modeli kullanılarak elde edilen değerler yukarıdaki tabloda görülmektedir [8].

Fazla uzun salındırıcı içerisinde koherent ışınım elde edilemez. Kısa salındırıcıda doyum uzunluğu yeterli olmayacağından yüksek güçte ve doyuma ulaşmış lazer elde edilemez. Tablo 4.'teki değerler ve salındırıcı-lazer parametrelerinin analitik formülleri kullanılarak yazdığımız bilgisayar kodunun çıktılarına göre aşağıdaki şekiller (Şekil 8., Şekil 9. ve Şekil 10.) elde edilmiştir. Salındırıcı uzunluğunun ışınım gücüne bağlılığı 12 mm salındırıcı aralığı için aşağıdaki şekilde (Şekil 8.) görülmektedir.



Şekil 8. 12 mm salındırıcı (undulatör) aralığı için salındırıcı uzunluğuna göre lazer ışınım gücü

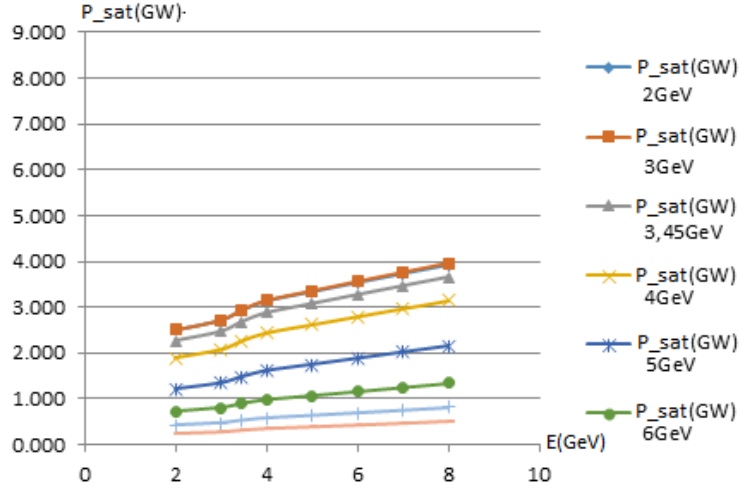
Demir hibrit salındırıcı aralığının boyutsuz salındırıcı parametresine (K) göre değişimi Şekil 9.'daki gibidir. Salındırıcı için K parametresi 1.1 ile 3.5 arasında değişir.



Şekil 9. Salındırıcı aralığının (Gap) K parametresine göre değişimi

Salındırıcıya gelen elektron demetinin demet enerjisine ve iyi odaklanmış olma durumuna göre çıkış lazerinin gücü değişir. Yüksek demet enerjilerinde yüksek lazer gücü elde edilir. Gücü azalan elektron demetleri "Faraday Kafesi" denilen bir sistem içerisinde, salındırıcı çıkışında gönderilir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 10.) K sabit tutularak (1,28), 12

mm aralık için farklı elektron demet enerjilerine göre çıkış lazerinin doyum gücü görülmektedir.



Şekil 10. Sabit K parametresi ve farklı demet enerjileri için doyum gücünün (P_{sat}) artışı

4. Sonuç ve Yorum

Modelleme çalışmaları sonunda enerjisi azalan elektron demetlerini, demet yolundan almak ve yerin altında durdurmak için Faraday Kafesi kullanılmıştır. Enerjisini koruyan demetler NdFeB ve Fe sıralı yoğun manyetik alana sahip salındırıcıdan geçerek ışımaya yapmış ve bu ışımalar üst üste bindirilerek lazer ışını elde edilmiştir. Bu çalışma boyunca salındırıcı yapısı, demet yolu boyunca yerleşimi, dalga boyu ve uzunluğu gibi parametrelerin en uygun değerleri elde edilmiştir. 18 ve 20 mm aralıklar için alan dağılım etkilerinin çok etkin olduğu, 5 mm ve daha küçük aralıklarda ise elektron demetlerinin ışımaya yapmalarının zor olduğu modelleme çalışmalarından görülmektedir. Sonuç olarak 8 veya 12 mm salındırıcı aralığı ve 3.45 GeV'lik elektron demet enerjisi için 31.5 m doyum uzunluğu elde edilmiştir. Bu değer demet parametre değerleri yakınlık gösteren PAL-XFEL ve FLASH2 demetlerindeki değerle uyumlu şekilde elde edilmiştir. Salındırıcıdan sonra elde edilen tekrenkli ve eş fazlı ışının gücünün 10^9 Watt (GigaWatt) mertebesine çıkabildiği görülmüştür.

Kaynakça

- [1] H. Duran Yildiz, R. Cakir, and D. Porsuk, "Design and simulation of 3½-cell superconducting gun cavity and beam dynamics studies of the SASE-FEL System at the Institute of Accelerator Technologies at Ankara University," *Nucl.Instrum.Meth.*, A785 pp. 180-190, 2015.
- [2] I. S. Ko, H. Kang, and et al., "Construction and Commissioning of PAL-XFEL Facility," *Appl. Sci.*, 7, 479; doi:10.3390/app705047, 2017.
- [3] B. Faatz, M. Braune, and et al., "The FLASH Facility: Advanced Options for FLASH2 and Future Perspectives," *Appl. Sci.*, 7, 1114; doi:10.3390/app7111114, 2017.
- [4] P. Elleaume, J. Chavanne, B. Faatz, "Design considerations for a 1 angstrom SASE undulator," *NIMA*, 455 (3), pp. 503-523, 2000.
- [5] O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, "A 3D Magnetostatics Computer Code for Insertion devices," SRI97 Conference August 1997, *J. Synchrotron Rad.*, 5, 481-484, 1998.
- [6] Available: www.spring8.or.jp/pdf/en/indu_appli/p42-43.pdf

- [7] Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, In-Vacuum Undulators at ESRF, TOPA013.pdf
- [8] M. Xie, *Proceedings of the Particle Accelerator Conference*, Dallas, TX, (IEEE, New York, 1995), 1995.

Hatice DURAN YILDIZ, hdyildiz@ankara.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3469-6045>