

## TARLA IR-SEL Salındırıcı Magnetler İçin Benzetim Çalışmaları

Halime Tugay<sup>1,\*</sup>, Suat Özkorucuklu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32200 Çünür, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Vezneciler, 34134 Fatih, İstanbul, Türkiye

\*Yazışılan yazar e-posta: halimetugay@gmail.com

Alınış: 09 Ekim 2013, Kabul: 13 Ocak 2014

**Özet:** Türk Hızlandırıcı Merkezi'nin (THM) ilk tesisi olarak süper iletken elektron hızlandırıcısına dayalı olarak osilatör modda Serbest Elektron Lazeri tesisi kurulmaktadır. Ar-Ge amaçlı kurulmakta olan bu tesisin laboratuvarının uluslararası literatürdeki adı "Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara" (TARLA) olarak bilinmektedir. Kurulacak olan SEL tesisinde, süper iletken hızlandırıcılardan elde edilen 15-40 MeV enerjili elektron demeti iki farklı salındırıcı hattından geçirilerek 2,5-250 µm dalga boyu aralığında kızılötesi SEL'in elde edilmesi planlanmaktadır. Elde edilmesi planlanan lazerin istenilen parametrelere sahip olabilmesi için kullanılacak olan salındırıcıların optimizasyon ve benzetim çalışmalarının önceden gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada RADIA ve SPECTRA programları kullanılarak testte kullanılacak olan salındırıcılar için gerekli benzetim çalışmaları yapılmıştır. Salındırıcıların manyetik alan, manyetizasyon değerleri, elektron demetinin hız ve yörünge değişimleri her iki salındırıcı için benzetim çalışmaları ile belirlenmiş ve karşılaştırma yapılarak sonuçlar verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** THM, TARLA, Serbest Elektron Lazeri, optimizasyon, benzetim çalışmaları

### Simulation Studies for TARLA IR-FEL Undulator Magnets

**Abstract:** A Free Electron Laser (FEL), which will be run on oscillator mode, constitutes the first facility of Turkish Accelerator Center (TAC). The name of the R&D test laboratory in international literature is known as "Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara" (TARLA). In this FEL center, the plan is to obtain infrared FEL within the wavelengths range of 2.5 to 250 micrometer sending electron beam with energy of 15-40 MeV accelerated with superconducting cavities through two undulator lines. Optimization and simulation studies should be completed formerly for undulators in order to obtain desired parameters for the planned laser. In this study, necessary simulation studies were done with RADIA and SPECTRA codes for undulators to be used in this facility. Simulation studies for both undulators carried out to determine the magnetic field of the undulator, magnetization values, changes in speed and trajectory of the electron beam and comparison with the results are given.

**Key words:** Free Electron Laser, optimization and simulation studies

#### 1. Giriş

Serbest Elektron Lazeri (SEL), rölativistik hızlarda hareket eden serbest elektronların kinetik enerjisini eş fazlı ve ayarlanabilir dalga boylu elektromanyetik radyasyona dönüştüren sistemlerdir. Lineer hızlandırıcıdan elde edilen elektron demeti salındırıcı magnetten geçirilir ve elde edilen salındırıcı radyasyonu dar bir konide toplanır. Yayınlanan radyasyon aynalar arasında tuzaklanarak ileri ve geri yansıtılır. Bu ileri ve geri yansımalar sırasında radyasyon salındırıcıda elektron paketleri ile etkileşir. Bu etkileşimle elektron paketleri ve elektromanyetik radyasyon arasında enerji değiş-tokuşu olur ve eş fazlı, monokromatik, yüksek akı ve parlaklık değerine sahip radyasyon elde edilir [1, 2].

Kurulumu devam etmekte olan TARLA tesisinde, osilatör modda SEL elde edilmesi planlanmaktadır. Bu amaçla 15-40 MeV enerji aralığında elektron demeti ile 2.5 cm (U25) ve 9.0 cm (U90) periyot uzunluklarına sahip iki salındırııcı kullanılarak osilatör modda çalışan orta ve uzak kızılötesi bölgelerinde (2,5-250  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında) lazerin elde edilmesi planlanmaktadır [3, 4, 5].

Bu çalışmada, U25 ve U90 salındırııcıları kullanılarak elde edilmesi planlanan lazerde kullanılacak olan salındırııcılar için RADIA [6] ve SPECTRA [7] programları kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

RADIA programı kullanılarak x ve y yönlerindeki manyetik alanlar, magnet ve kutup materyallerindeki manyetizasyon değerleri hesaplanmıştır. RADIA C++ ile yazılmış Mathematica ara yüzüne sahip ve sonlu hacim integral yaklaşımını kullanan bir programdır. Alan verisinin ilk ve son işlemleri Mathematica ile yapılır. 1D ve 2D alan grafikleri Mathematica'da bulunan "Graphics" özellikleri kullanılarak gerçekleştirilir.

SPECTRA programı kullanılarak ise x ve y yönlerindeki manyetik alanlar, elektronların hızının değişim oranı ve yörüngeleri belirlenmiştir. SPECTRA eğici magnetler ve ayrıca salındırııcılar ve zigzaglayıcılar gibi çeşitli sinkrotron radyasyon kaynaklarından yayınlanan radyasyonun optiksel karakteristiklerini hesaplamak için kullanılan C++ tabanlı bir yazılımdır ve bir grafik ara yüze (GUI) sahiptir. Böylece hesaplanmak istenilen parametreler (manyetik alan, hız değişimi vs. gibi) grafiksel olarak da gösterilebilir.

Optimizasyon çalışmalarında 15-40 MeV enerjili ve 1.0 mA ortalama akımlı elektron demeti temel alınmış ve Tablo1'de verilen salındırııcı parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 1. U25 ve U90 için hesaplamalarda kullanılan salındırııcı parametreleri

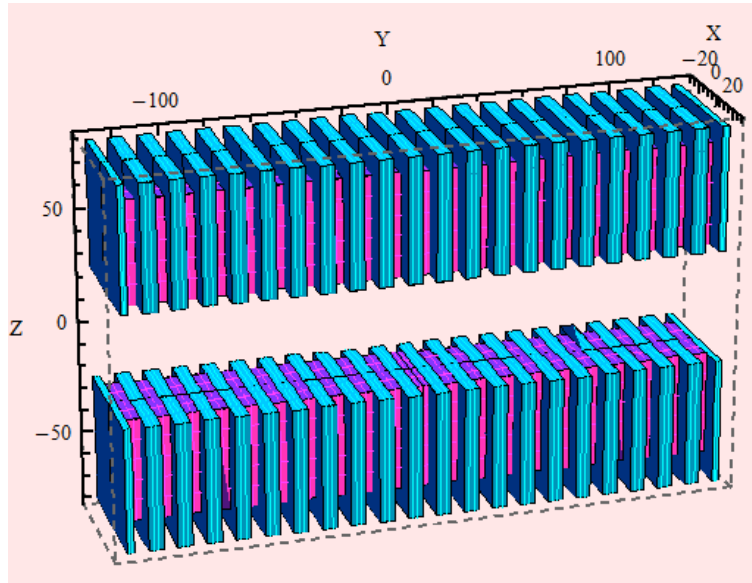
Salındırııcı Parametreleri	U25	U90
Salındırııcı Periyodu (cm)	2.5	9
Salındırma Aralığı (cm)	5	7
Salındırııcı Uzunluğu (m)	1.5	3.6
Salındırııcı Periyot Sayısı (N)	60	40
Salındırııcı Magnet Bloklarının Yüksekliği (mm)	55	90
Salındırııcı Magnet Bloklarının Kalınlığı (mm)	6.5	35
Salındırııcı Magnet Bloklarının Genişliği (mm)	60	100
Salındırııcı Kutup Ayaklarının Genişliği (mm)	40	60
Salındırııcı Kutup Ayaklarının Yüksekliği (mm)	45	50
Salındırııcı Kutup Ayaklarının Kalınlığı (mm)	6.0	10
Salındırııcı Malzemesi	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

## 3. Bulgular

Benzetim çalışmalarında düzlem salındırııcının optimizasyonu için RADIA kodu kullanılmıştır. Salındırııcı malzemesi  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 'dir. U25 hibrid salındırııcısı için

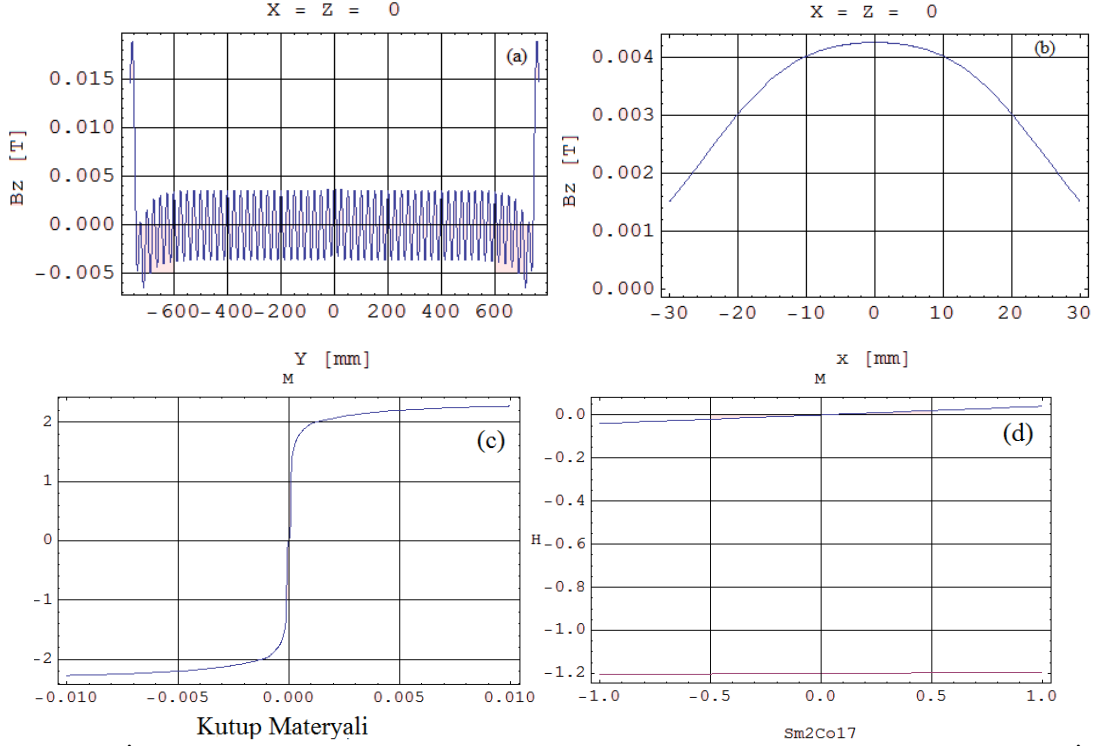
tasarlanan magnet bloklarının yüksekliği 55 mm, kalınlığı 6.5 mm ve genişliği 60 mm'dir. Magnet kutup materyali olarak Vanadyum Permendür seçilmiştir ve kutup ayaklarının genişliği 40 mm, yüksekliği 45 mm ve kalınlığı 6 mm'dir. RADIA ile tasarlanan bu U25 hibrid salındırıcısı Şekil 2'de gösterilmektedir.

Salındırıcıda her bir kutup ayağının her iki tarafına eklenen magnet blokları alan şiddetini artırır fakat tüm sistemi daha karmaşık hale getirir. Bir salındırıcı sisteminde iyi bir manyetik alan ve manyetizasyon elde etmek için uygun bir "salındırma aralığı" seçilmelidir. Bu çalışmada dalgakavuzu etkilerini, salındırıcı ve zigzaglayıcı arasındaki geçiş bölgesini dikkate alarak U25 için "salındırma aralığı" 0.05 m ve U90 için 0.07 m seçilmiştir. Çok büyük "salındırma aralığı" manyetik alanın daha da küçülmesine ve istenilen sonuçların elde edilmemesine sebep olur.



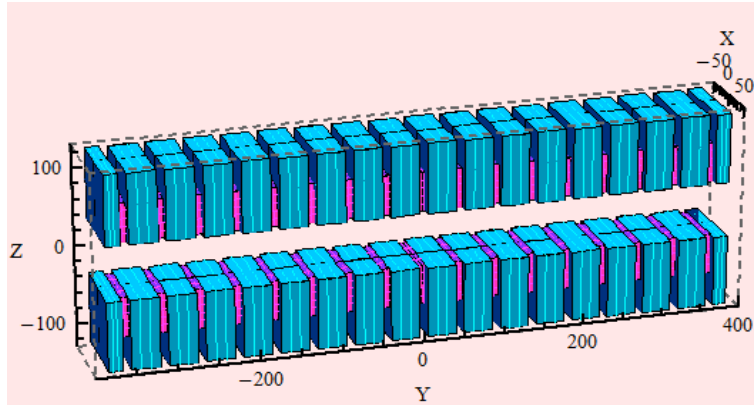
Şekil 2. U25 Salındırıcısının RADIA ile Tasarımı

RADIA ile tasarımı yapılan U25 salındırıcısının benzetim çalışmalarından elde edilen manyetik alanın x ve y yönündeki değişimi, kullanılan kutup materyali için manyetizasyonun alan şiddetine (H) göre değişimi ve kullanılan magnet materyali için manyetizasyonun alan şiddetine göre değişimi grafiksel olarak Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3a ve Şekil 3b'de manyetik alan dikey eksende x ve y yönleri yatay eksende gösterilmektedir. Şekil 3c ve Şekil 3d'deki grafiklerde yatay eksen alan şiddetinin (H) değişimini düşey eksen manyetizasyonun değişimini göstermektedir. Şekil 3'deki grafiklerden de görüldüğü gibi manyetik alan (merkezi alan) y yönünde -0.004-0.0188 T arasında değişirken, x yönünde 0.0015-0.0043 T arasında değer almaktadır. Kutup materyalinde manyetik alan şiddeti H  $\pm 0.01$  T arasında değerler alırken manyetizasyon  $\pm 2.272$  T arasında değerler almaktadır. Magnet materyalinde ise manyetik alan şiddeti H  $\pm 1.0$ T arasında değerler alırken manyetizasyon  $\pm 0.038$ T arasında değerler almaktadır.



Şekil 3. U25 İçin Manyetik Alanın (a) y-Yönündeki (b) x-Yönündeki değişimi, (c) Kutup Materyali İçin (d) Magnet Materyali İçin Manyetizasyonun Alan Şiddetine (H) Göre Değişimi

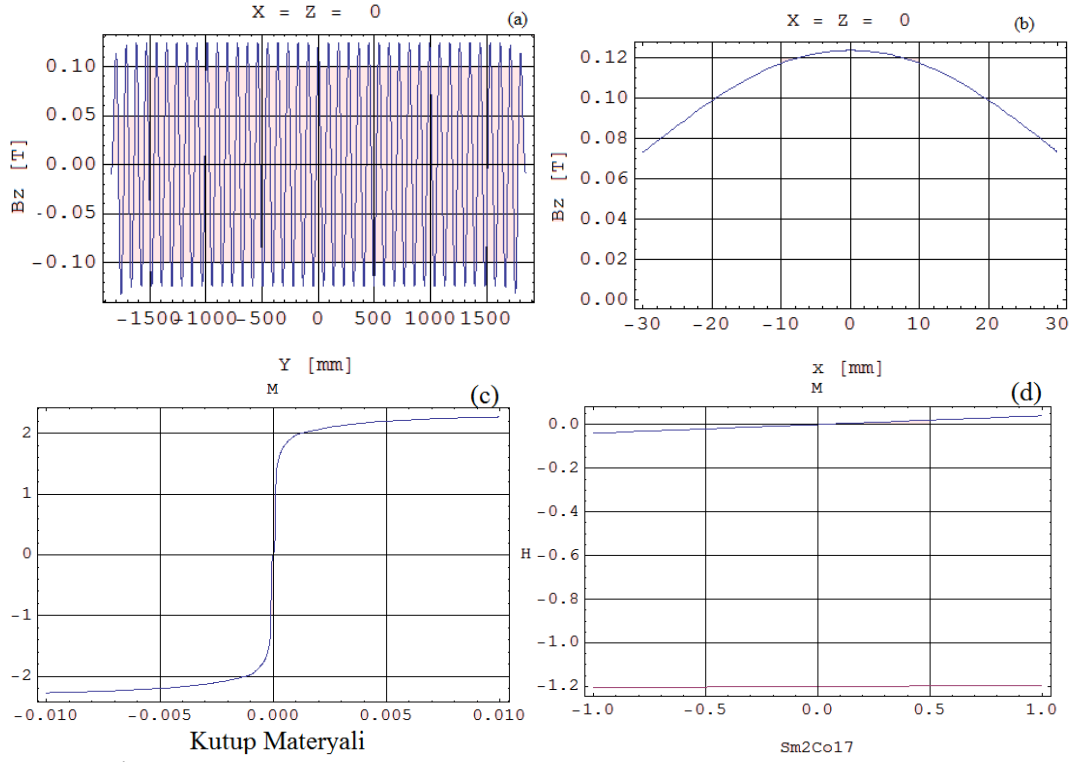
RADIA ile tasarlanan U90 hibrid salındırıcısı ise Şekil 4’te gösterilmektedir. U90 hibrid salındırıcısı için magnet bloklarının genişliği 100 mm, kalınlığı 35 mm ve yüksekliği 90 mm’dir. Kutup ayaklarının ise genişliği 60 mm, kalınlığı 10 mm ve yüksekliği 50 mm’dir.



Şekil 4. U90 Salındırıcısı Magnetin RADIA ile Tasarımı

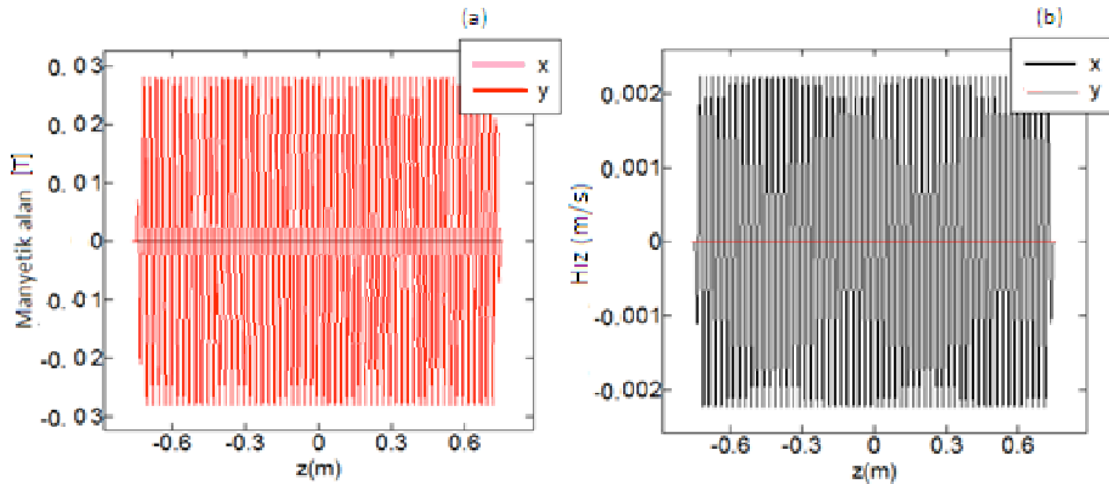
RADIA ile tasarlanan U90 salındırıcısının optimizasyonundan elde edilen manyetik alanın x ve y yönündeki değişimi, kullanılan kutup materyali için manyetizasyonun alan şiddetine (H) göre değişimi ve kullanılan magnet materyali için manyetizasyonun alan şiddetine göre değişimi grafiksel olarak Şekil 5’te verilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b’de manyetik alan dikey eksende x ve y yönleri yatay eksende gösterilmektedir. Şekil 5c ve Şekil 5d’deki grafiklerde yatay eksen alan şiddetinin değişimini dikey eksen manyetizasyonun değişimini göstermektedir. Şekil 5’deki grafiklerden de görüldüğü gibi

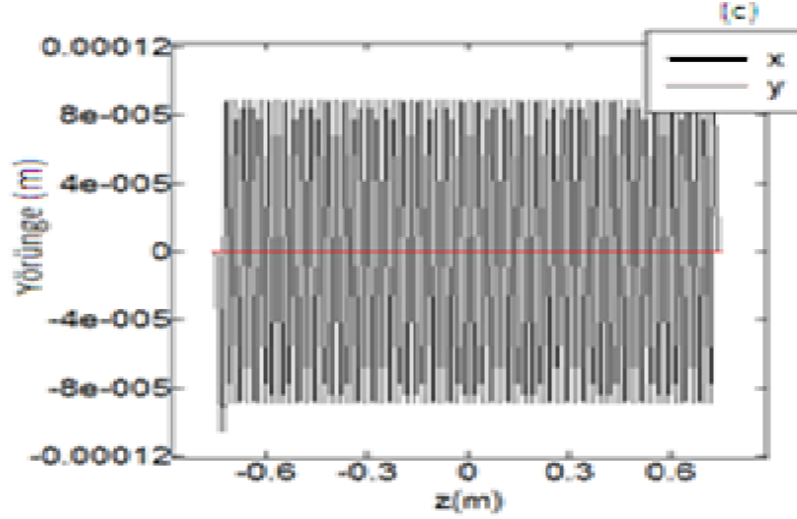
manyetik alan (merkezi alan) y yönünde  $\pm 0.125$  T arasında değer alırken, x yönünde 0.074-0.0124 T arasında değer almaktadır. Kutup materyalinde manyetik alan şiddeti H  $\pm 0.01$  T arasında değerler alırken manyetizasyon  $\pm 2.29$ T arasında değerler almaktadır. Magnet materyalinde ise manyetik alan şiddeti H  $\pm 1.0$  T arasında değerler alırken manyetizasyon  $\pm 0.04$  T arasında değerler almaktadır.



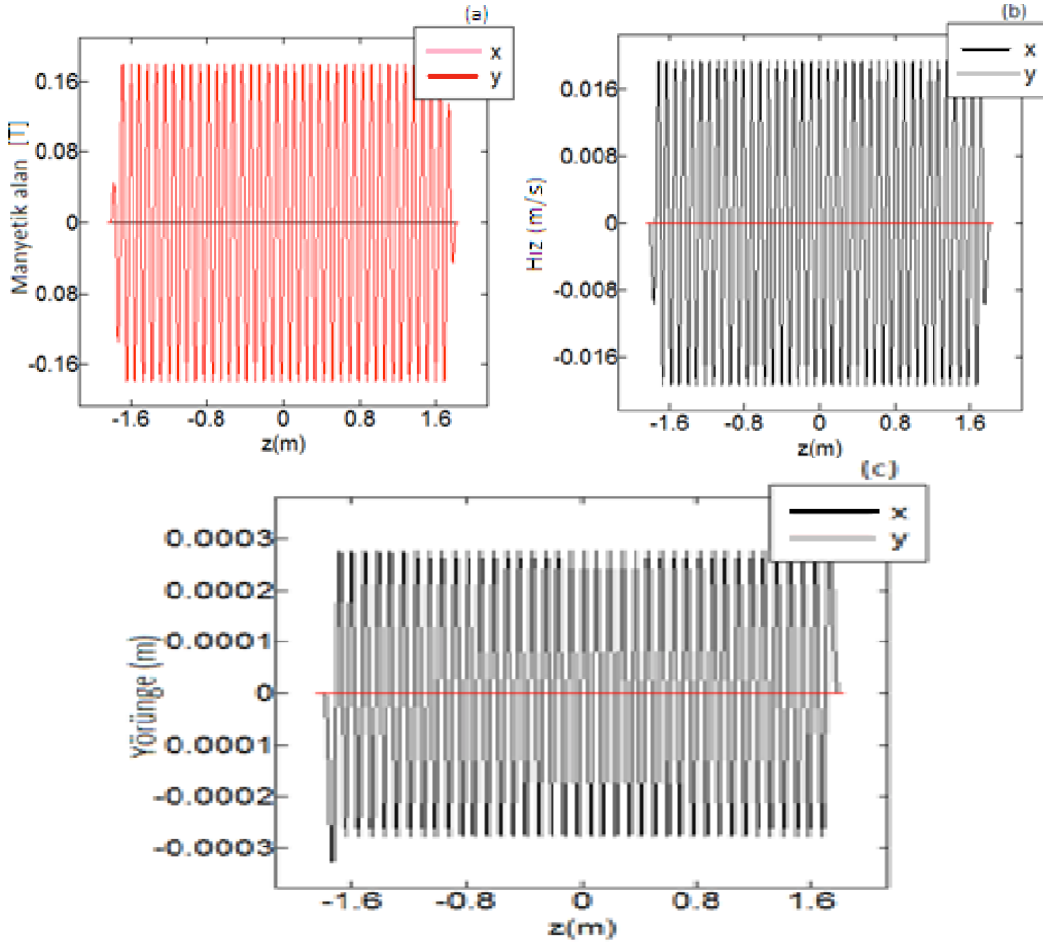
Şekil 5. U90 İçin Manyetik Alanın (a) y-Yönündeki, (b) x-Yönündeki Değişimi, (c) Kutup Materyali İçin, (d) Magnet Materyali İçin Manyetizasyonun Alan Şiddetine (H) Göre Değişimi

SPECTRA ile de U25 ve U90 undulatörleri için benzetim çalışmaları ile saldıncıda manyetik alanın değişimi, parçacığın hızının değişimi ve parçacığın yörüngesinin değişimi grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6 ve Şekil 7’de ifade edilmiştir.





Şekil 6. U25 İçin; z Eksenine Göre (a) Manyetik Alanın x ve y Yönündeki Değişimi, (b) Hızın x ve y Yönündeki Değişim Oranı, (c) Elektronun Salındırıcıda İzlediği Yörüngenin x ve y Yönündeki Değişimi



Şekil 7. U90 için; z Eksenine Göre (a) Manyetik Alanın x ve y Yönündeki Değişimi, (b) Hızın x ve y Yönündeki Değişim Oranı, (c) Elektronun Salındırıcıda İzlediği Yörüngenin x ve y Yönündeki Değişimi

Bu çalışmada SPECTRA ile yapılan analizlerde U25 için elde edilen pik alanı y-yönünde  $\pm 0.02$  T ve x yönünde  $\pm 0.002$  T arasında değerler almaktadır. U90 için y-yönündeki manyetik alan  $\pm 0.16$  T ve x-yönündeki manyetik alan  $\pm 0.06$  T değerindedir. Z eksenine bağlı olarak elektronun hareketi süresince parçacığın hızı ve yörüngesi her

iki salındıricıda da en çok x-yönünde değişmektedir. Parçacığın hızının değişim oranı yani parçacığın hızının z-eksenine göre x ve y yönündeki artış miktarı değeri U25 için x-yönünde  $\pm 0.002$  m/s ve y-yönünde  $\pm 0.0016$  m/s arasında değişirken U90 için x-yönünde  $\pm 0.019$  m/s ve y-yönünde  $\pm 0.008$  m/s arasında değişmektedir. U25 için parçacığın yörüngesi x yönünde  $\pm 8 \times 10^{-5}$  m ve y-yönünde  $\pm 6 \times 10^{-5}$  m arasında değerler alırken U90 için x-yönünde  $\pm 0.0003$  m ve y-yönünde  $\pm 0.0002$  m arasında değerler almaktadır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada öncelikle 15-40 MeV elektron demet enerjisinde 2.5-250  $\mu$ m dalga boyu aralığında bir lazer elde etmek için kullanılacak olan salındıricının özellikleri belirtilmiş, kullanılacak olan U25 ve U90 salındıricıları için uygun "salındırma aralığı" belirlenmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda her iki salındıricı içinde manyetik alanın x ve y yönündeki değişimi, manyetizasyonun magnet materyaline ve kutup materyaline göre değişimi, salındıricı içinde elektronun hızının ve yörüngesinin değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir.

U25 salındıricısı için Şekil 3a'daki manyetik alanın y-yönündeki değişim değeri olan -0.004-0.0188 T aralığındaki değer Şekil 6a'daki y yönündeki değişim değeri olan  $\pm 0.02$  T değer ile uyum içindedir. U90 salındıricısı için Şekil 5a'daki manyetik alanın y-yönündeki değişim değeri olan  $\pm 0.125$  T arasındaki değer Şekil 7a'daki manyetik alanın y yönündeki değişim değeri olan  $\pm 0.16$  T arasındaki değer de birbiriyle uyum içindedir. U25 salındıricısı için Şekil 3b'deki manyetik alanın x-yönünde değişim değeri olan 0.0015-0.0043 T aralığındaki değer Şekil 6b'deki x yönündeki değişim değeri olan  $\pm 0.002$  T değeri ile uyum içindedir. U90 salındıricısı için Şekil 5b'deki manyetik alanın y-yönündeki değişim değeri olan 0.074-0.0124 T arasındaki değer Şekil 7b'deki manyetik alanın y yönündeki değişim değeri olan  $\pm 0.06$  T arasındaki değer de birbiriyle uyum içindedir.

Parçacığın hızının değişim oranının değeri U25 için x-yönünde  $\pm 0.002$  m/s, y-yönünde  $\pm 0.0016$  m/s ve U90 için x yönünde  $\pm 0.019$  m/s, y-yönünde  $\pm 0.008$  m/s arasındadır. U25 için parçacığın yörüngesi x yönünde  $\pm 8 \times 10^{-5}$  m, y-yönünde  $\pm 6 \times 10^{-5}$  m ve U90 için x-yönünde  $\pm 0.0003$  m, y-yönünde  $\pm 0.0002$  m, arasında değerler almaktadır. Salındıricıların Vanadium Permendür kutup materyalinde her iki salındıricıda da  $\pm 0.01$  T arasında değişen manyetik alan şiddeti için manyetizasyon U25 için  $\pm 2.272$  T arasında ve U90 için  $\pm 2.29$  T arasında değerler almaktadır.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnet materyalinde ise manyetik alan şiddeti her iki salındıricıda da  $H \pm 1.0$  T arasında değerler alırken manyetizasyon U25 için  $\pm 0.038$  T ve U90 için  $\pm 0.04$  T arasında değerler almaktadır.

#### Teşekkür

Bu çalışmada hesaplamalar Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Türk Hızlandırıcı Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar esnasında hem benzetim çalışmaları hem de analitik hesaplamalar konusunda her zaman yardımcı olan Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Avni Aksoy'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, Türkiye açısından büyük öneme sahip

YUUP projesinin başkanlığını yaparak bizlere yol gösteren ve destek olan Ankara Üniversitesi Öğretim üyesi ve Proje Yürütücüsü Sayın Prof. Dr. Ömer Yavaş'a teşekkür ederiz.

Bu çalışma, "Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarı (DPT2006K-120470)" konulu DPT projesi ve Süleyman Demirel Üniversitesi 3154-D-12 No'lu BAP projesi tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Madey, J. M. J., 1971, Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field, *Journal of Applied Physics*, 42(5): 1906-1913.
- [2] Colson, W. B., Pellegrini, B., Renieri, A., 1990, Laser Handbook Volume 6: Free Electron Lasers, *North-Holland Publications*, Amsterdam, p. 528.
- [3] Aksoy, A., Çiftçi, A.K., Karşlı, Ö., Kasap, E., Ketenoğlu, B., Nergiz, Z., Yavaş, Ö., 2008, The Status of TAC Infrared Free Electron Laser (IR-FEL) Facility, 11th, European Particle Accelerator Conference, Vol.02, Genoa, Italy, pp. 61-63.
- [4] Özkorucuklu, S., Aksoy, A., 2011, The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA-TDR), Report No: A-BP-5685-0, Version 02, p. 148.
- [5] <http://www.tarla-fel.org> (Erişim Tarihi: 01/01/2014)
- [6] Chubar O., Elleaume P., Chavanne J., 1998, a Three-Dimensional Magnetostatics Computer Code for Insertion Devices, *Journal of Synchrotron Radiation*, 5(3):481-484.
- [7] Tanaka T., Kitamura H., 2001, SPECTRA: a Synchrotron Radiation Calculation Code, *Journal of Synchrotron Radiation*, 8(6):1221-1228.

Suat Özkorucuklu e-mail: [suat.ozkorucuklu@gmail.com](mailto:suat.ozkorucuklu@gmail.com)