



## Erl-Halka Tipli $e^-e^+$ Çarpıştırıcılarında Lineer Olmayan Süreçlerin ve Dinamik Odaklamanın Luminosity (Işıklık) Üzerine Etkisi

İlhami ERKOYUNCU<sup>\*1</sup>, Hüsnü AKSAKAL<sup>2</sup>, Halil İbrahim DURSUN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, 68000, Aksaray, Türkiye

<sup>2</sup>Sütçü İmam Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>3</sup>Aksaray Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 68000, Aksaray, Türkiye

\*yazışılan yazar e-posta: ierkoyuncu@bingol.edu.tr

(Alınış: 06.11.2017, Kabul: 16.07.2018, Yayımlanma: 30.11.2018)

**Özet:** Bir çarpıştırıcının performansını belirleyen önemli parametrelerden biri, çarpıştırıcının 1 saniyede 1 cm<sup>2</sup> alanda etkileşen parçacık sayısını veren ve çarpıştırıcının performansını belirleyen ışıklık değeridir. Işıklık üzerine belirleyici olan birçok etken vardır. Bunlardan bir tanesi lineer olmayan (incoherent) süreçlerdir. Bu çalışmada, ERL-halka tipli kütle merkezi enerjisi 3.77 GeV olan elektron-pozitron çarpıştırıcısı olan Türk hızlandırıcı merkezi parçacık fabrikasında Breit-Wheeler, Breit-Heitler ve Landau-Lifshitz lineer olmayan süreçlerin ışıklık üzerine etkisi incelenmiştir. Bunun yanında dinamik odaklamanın (travelling focus) ışıklık üzerine etkisi ile beraber yengeç geçişi (crab waist) etkisinde yüksek ışıklık elde etmek üzere tartışılmıştır. Çalışmada CAIN 2.42 simülasyon programından yararlanılmıştır. Simülasyon programı kullanılarak elektron-pozitron parametre setlerinde lineer olmayan süreçlerin, dinamik odaklamanın ve yengeç geçişinin (crab waistin) dahil edildiği enerji geri kazanımlı linak (erl)-halka tipli çarpıştırıcılarda ışıklık değerleri hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Işıklık, Lineer olmayan süreçler, Dinamik odaklama.

## The Influence of Nonlinear Processes and Travelling Focus on Luminosity in $e^-e^+$ Erl-Ring Type Colliders

**Abstract:** One of the most important parameter that determines the performance of an accelerator is the Luminosity that gives the number of particles interacting in a second in the one square centimeter area of the collider and determines the performance of the collider. There are many factors that determine the Luminosity. One of them is incoherent processes. In this study, the effect of nonlinear-processes on luminosity of electron-positron colliders with ERL-ring type collider with center of mass energy 3.77 GeV is investigated in Breit-Wheeler, Breit-Heitler and Landau-Lifshitz processes. Furthermore the crab waist effect and travelling focus (dynamic focus) of colliding beams effects on the Luminosity has been discussed. In this study, CAIN 2.42 computer simulation program was used for Luminosity. Using the simulation program, nonlinear-processes in electron-positron parameter sets were calculated for energy recovery linac (erl)-ring type colliders including travelling focus and crab waist.

**Key words:** Luminosity, Nonlinear-processes, Travelling focus.

## 1. Giriş

Türk Hızlandırıcı Kompleksi (TAC) projesinin 5 alt konu başlığı bulunmaktadır. Bunlardan biri charm fabrikası olarak çalışması düşünülen yüksek ışınlıklı, enerji geri kazanımlı linak (ERL-energy recovery linac) ile halka tipli elektron-pozitron çarpıştırıcı önerisidir. Bu çarpıştırıcı önerisinde kütle merkezi enerjisi  $\sqrt{s}=3.77$  GeV olarak düşünülmektedir. Işınlık değeri ise  $L=10^{35}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  olarak ön görülmüştür [1]. Günümüzde hepsi Serbest Elektron Lazeri (FEL-Free Electron Laser) olarak kullanılan üç adet ERL hızlandırıcısı bulunmaktadır. Bunlar JLab IR FEL, Japonya Atom Enerjisi Ajansı (JAEA) FEL ve Novosibirsk yüksek güç THz FEL'dir. ERL tabanlı olan FEL'in en gelişmiş JLab IR FEL'dir [2]. TAC projesinde de düşünülen benzeri bir ERL hızlandırıcısı olacaktır.

Işınlık değerini kısıtlayan esas sınırlamalardan biri demet gücünden gelen sınırlamadır. Bu sınırlama ERL-enerji geri kazandırmalı linak kullanımı seçilerek çözülmeye çalışılmıştır. ERL kullanımı prensip olarak  $L = 10^{35}$   $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  ışınlık değerini aşan süper charm fabrikasını kurmaya imkan verecektir [3,4]. Bu çalışmada güncel ERL-halka tipli elektron-pozitron çarpıştırıcısının parametreleri temel alınarak lineer olmayan süreçlerin ve dinamik odaklamanın ışınlığa etkisi araştırılmıştır.

**Tablo 1.** Erl-Halka tipli elektron-pozitron çarpıştırıcısı parametreleri

Parametreler	Pozitron (Halkası)
Pozitron demet enerjisi $E_{e^+}$ (GeV)	3.56
Paketçikteki parçacık sayısı ( $10^{11}$ )	2
Beta fonksiyonları (IP) $\beta_x / \beta_y$ (mm)	80/5
Normalize emitans $\epsilon_x^N / \epsilon_y^N$ ( $\mu\text{m}$ )	110/0.36
$\sigma_x/\sigma_y$ (mm)	36/0.5
$\sigma_z$ (mm)	5
Paketçik sayısı n	300
Çevre, C(m)	553.846
RF Frekansı (MHz)	650
Elektron	
Elektron demet enerjisi $E_{e^-}$ (GeV)	1
Paketçikteki parçacık sayısı $10^{10}$	2
Beta fonksiyonları (IP) $\beta_x / \beta_y$ (mm)	80/5
Normalizeemitanslar $\epsilon_x^N / \epsilon_y^N$ ( $\mu\text{m}$ )	31/0.1
$\sigma_x/\sigma_y$ ( $\mu\text{m}$ )	36/0.5
$\sigma_z$ (mm)	5
RF Frekansı	1300
Çarpışma açısı $\theta$ (mrad)	34
Çarpışma frekansı (MHz)	162.5
Crabwaist (mrad)	34
$d\alpha/dt$	0
Geometrik Işınlık ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$10^{35}$
Işınlık ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$1.4*10^{35}$

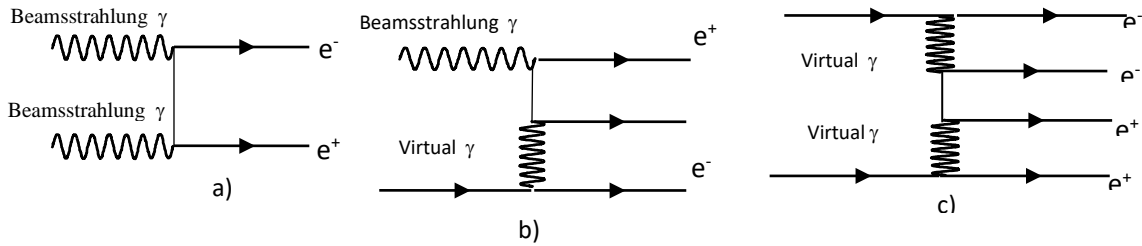
Bu çalışmanın ilk kısmında ışınlık üzerine etkin olan lineer olmayan süreçler ve dinamik odaklama açıklanmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ışınlık üzerine etkin olan bu durumlar göz önüne alınarak Türk Hızlandırıcı Merkezinin ERL-Halka tipli çarpıştırıcısı için tasarlanan ve Tablo 1'de verilen parametrelerden halka için betatron  $\beta_y=0.3$  mm ve emittans  $\epsilon_y^N=0.06$   $\mu\text{m}$ , linak için emittans  $\epsilon_y^N=0.02$   $\mu\text{m}$  değerleri [1]'den alınmış ve CAIN 2.42 simülasyon programı kullanılarak ışınlık hesaplanmıştır. Çalışmanın son kısmında lineer olmayan süreçler ile dinamik odaklamanın ışınlık üzerine etkisi, elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak tartışılmıştır.

## 1.1 Lineer olmayan süreçler

Lineer süreçte demetle sarılmış fotonların karşı demetin elektromanyetik alanı ile etkileşiminden kaynaklanan etki söz konusu iken, lineer olmayan süreç ise hem gerçek hem de sanal fotonların etkileşiminden ve diğer demetin bireysel parçacıkları ile etkileşmelerinden ortaya çıkmaktadır [5,6]. Bu durumda etkileşimde olan parçacık sayısını artırmaktadır. Parçacık sayısının artması da ışınlığı etkilemektedir. Işınlığa etki eden lineer olmayan bu süreçlerden üç farklı durumu göz önünde bulunduracağız. Bunlar;

- Breit-Wheeler  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$
- Bethe-Heitler  $e\gamma \rightarrow ee^+e^-$
- Landau-Lifshits  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$

Bu 3 sürecinde temelde yapısı aynıdır. Breit-Wheeler(BW) sürecinde her ikisi de gerçek beamstrahlung fotonları etkileşime girer. Bethe-Heitler (BH) süreci içinse bir gerçek beamstrahlung fotonu ve bir sanal foton (virtual) etkileşimdedir. Landau-Lifshits(LL) süreci ise iki sanal foton kullanılır. Gerçek fotonlar beamstrahlungdur. Sanal fotonlar ise yüksek enerjili elektron veya pozitron demetine eşlik eden kabuksuz bir bulut olarak resmedilebilir [7]. Aşağıda bahsedilen 3 lineer olmayan sürecin Feynman diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1. Lineer olmayan süreçlerin Feynman diyagramı a) Breit-Wheeler b) Bethe-Hietler c) Landau-Lifshitz

## 1.2 Dinamik odaklama

Işınlığı artırmanın bir diğer yolu dinamik odaklamadır (travelling focus). Biraz karmaşık bir parametre olan dinamik odaklamayı yapmanın CAIN 2.42 kodu ile iki yolu vardır. Bunlardan ilki alfa twiss parametresini enerji bağımlı olarak almak ( $d\alpha/d\varepsilon \neq 0$ ) ikincisi ise alfa twiss parametresini zamana göre değişken almaktır ( $d\alpha/dt \neq 0$ ).

Bu çalışmada ikinci opsiyon kullanılmıştır. Bu durumda  $\alpha_{x(y)}$  (1/m) demetin konumuna bağımlı olup paketçik odak noktasının demet konumuna bağımlılığını gösterir. Parçacıkların  $x(y)$  düzlemindeki odak noktası parçacıkların paketçik içindeki konumu  $t$  ( $t > 0$  paketçik kuyruğundaki değer) olmak üzere  $t \cdot \beta_{x(y)} \times d\alpha/dt$  ile belirlenir. Burada ( $d\alpha/dt$ ) değeri normal odak noktasının ilerisinde ise pozitif gerisinde ise negatif olarak alınır. Bu opsiyon yengeç geçiş (crab cavity) çarpışmasının bir sextupol magnet ile beraber kullanılmasıyla elde edilir.

Yengeç kavitesi demeti kafadan kuyruğa doğru demetin ilerleme yönünden farklı bir yönde saptırır. Örneğin demetin kafası  $+x$  kuyruğu ise  $-x$  yönünde saptırır. Belli bir mesafe sonrasında bu saptırma demetin yatay doğrultusunda  $\pm a$  kadar bir yer değiştirme oluşturur. Ardından bir sextupole (altı-kutuplu) magnet yerleştirilir. Bu magnetin manyetik alanı  $x^3 - 3xy^2$  ile orantılıdır. Bu ifadede  $x$  yerine  $x \pm a$  yazılacak olursa

$\mp a(x^2 - y^2)$  elde edilir. Bu ise bir kuadropol magnetin alanına eşdeğerdir (demet kafasını odaklar kuyruğunu ise dağıtır) [8-9].

Dinamik odaklama ışınlığı azaltan hourglass etkisini azaltıcı etkiye sahiptir. Odaklama durumu, odak noktasının karşı demetin baş kısmı ile aynı hizada olmasını sağlayan dinamik bir kaydırma ile sağlanır. Dinamik odaklamanın demetler çarpıştıktan sonraki dağılımı (distruption) değerini artırması beklenir. Dinamik odaklama yaparken dağılımı değeri ve demet-demet ayar kayması değerinin pozitron için istenilen limitler içinde kalması tekrar kullanılması için önemlidir. Ancak ERL elektron demeti ya enerjisini tekrar kullanım için yavaşlatılır ya da hızlandırıcıdan çıkartılarak durdurulur. Her iki durumda da elektron demeti için dağılım çok önem arz etmemektedir [10].

## 2. Materyal ve metot

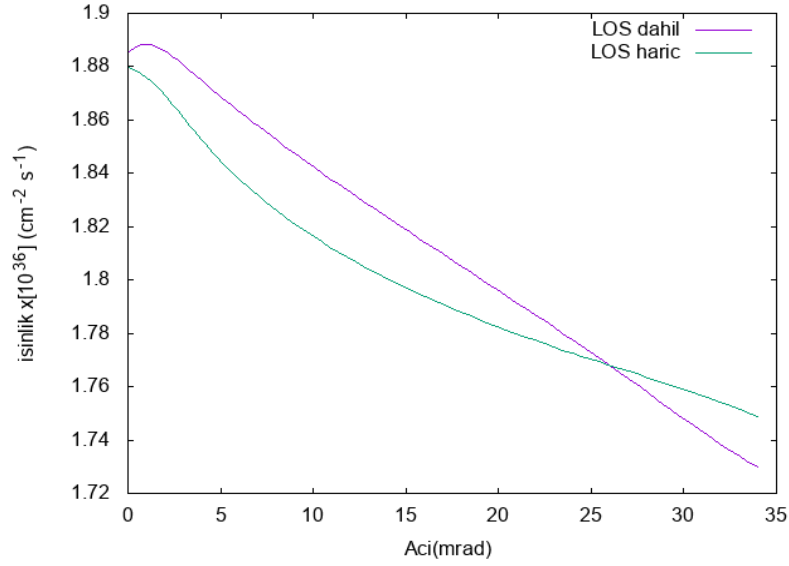
$\sqrt{s} = 3.77$  GeV kütle merkezi enerjisi olan Türk Hızlandırıcı Merkezinin ERL-Halka tipli çarpıştırıcısı için tasarlanan ve Tablo 1'de verilen parametrelerden betatron ve emittans değerleri [1] isimli makalesinden alınmış ve CAIN 2.42 simülasyon programı kullanılarak yengeç geçişinin etkin olduğu lineer olmayan süreçlerde ve dinamik odaklamanın dahil olduğu durumlarda ışınlık değerleri hesaplanmıştır.

*CAIN kodunda hesaplama yaparken kullandığımız parametreler:*  $(d\sigma/dt)$  değeri CAIN kodu içerisinde DALPHADT ile tanımlı olup  $=-0.50/\text{betax}$  gibi bir sayısal değer kullanılabilir. Bu değer ışınlık değerini artıracak şekilde pozitif veya negatif olarak ya x ya da y ekseninde hem elektron hem pozitron demetleri için ayrı ayrı yüksek ışınlık değerlerine ulaşmak için uygun değeri optimize edilebilir. Ayrıca demet konum bilgilerini veren TXYS komutunda crap cavite kullanılacak ise demetin t sürede bulunacağı konum XYs değeri crap açısı ve geometrisi kullanılarak girilmelidir. Örneğin crap x yönünde ise  $\text{TXYS} = (-s_0/\text{Cos}(coll/2), s_0*\text{Tan}(coll/2), 0, -s_0/\text{Cos}(coll/2))$  değeri girilmelidir. Burada  $s_0$  paketçik uzunluğunun birkaç katı olan bir değer ve  $coll$  değeri ise çarpışma açısı olup slope ve crab açıları bu değer yarısıdır. Kafa-kafaya çarpışmalarda bu değer  $(0,0,0,0)$  olarak alınır. Demetlerin etkileşim süreleri de yengeç geçişi çarpışmasında TXYS ile uyumlu alınmalıdır.

## 3. Bulgular

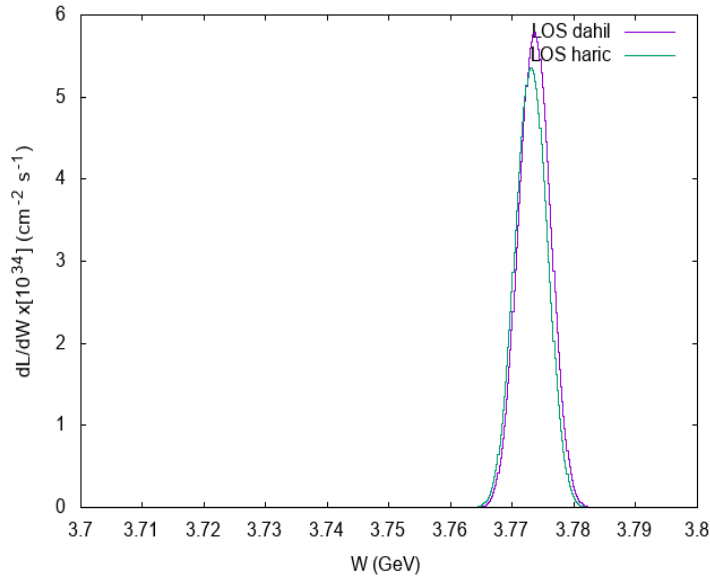
Lineer olmayan süreçlerin oluşan yeni parçacıklar sebebi ile ışınlığı artırması beklenir. Tasarlanan çarpıştırıcıda kütle merkezi enerjisinin düşük olması sebebi ile beklenen artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Lineer süreçlerin dahil olduğu ve dahil edilmediği çarpıştırıcıda çarpışma açısı değerlerine göre elde edilen ışınlık değerleri şekil 2'de verilmiştir. Her iki süreçte de yengeç geçişi değeri çarpışma açısının yarısı olarak alınmış ve dinamik odaklama dahil edilmemiştir. Burada çarpışma x ekseninde alınmıştır.

Lineer olmayan süreçler (LOS) dahil ve hariç olduğu durumlarda ışınıktaki değişimin % 1 seviyesinde olduğu görülmektedir.



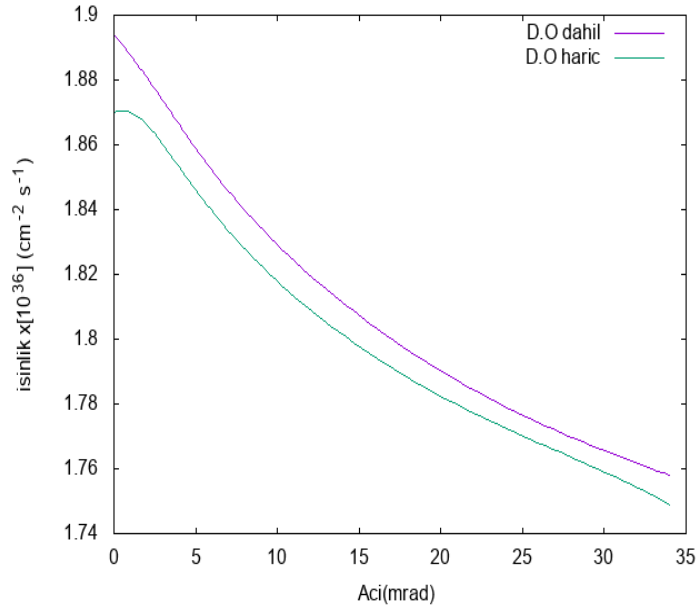
Şekil 2. Lineer olmayan süreçlerde çarpışma açısının toplam ışınlık üzerine etkisi

Şekil 3'te ise lineer olmayan süreçlerin dahil olduğu ve olmadığı durumların 3 mrad çarpışma açısındaki diferansiyel ışınlık değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Şeklin altında kalan alan toplam ışınlığı ifade etmektedir.



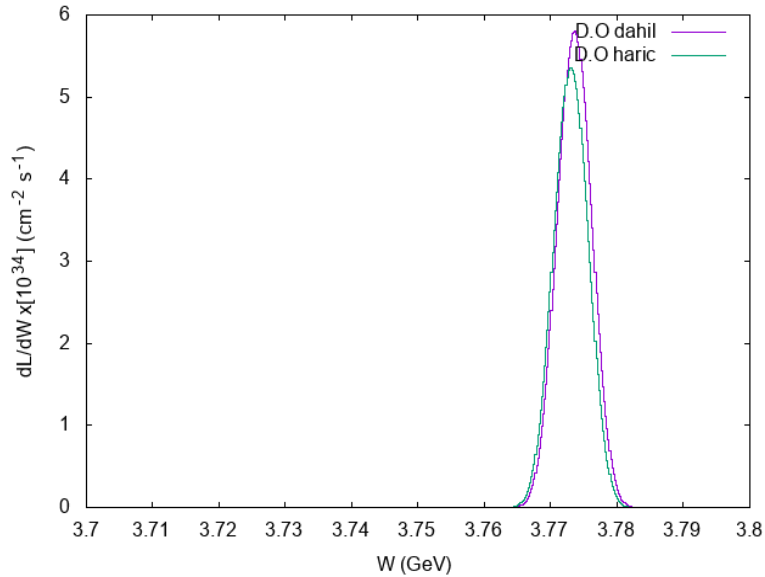
Şekil 3. Lineer olmayan süreçlerin diferansiyel ışınlık üzerine etkisi

Şekil 4'te grafikte bulunan farklı çarpışma açılarında dinamik odaklamanın ışınlık üzerine etkisi incelenmiştir. Lineer olmayan süreçler dahil edilmemiştir. Yengeç geçişi ise dahil edilmiştir.



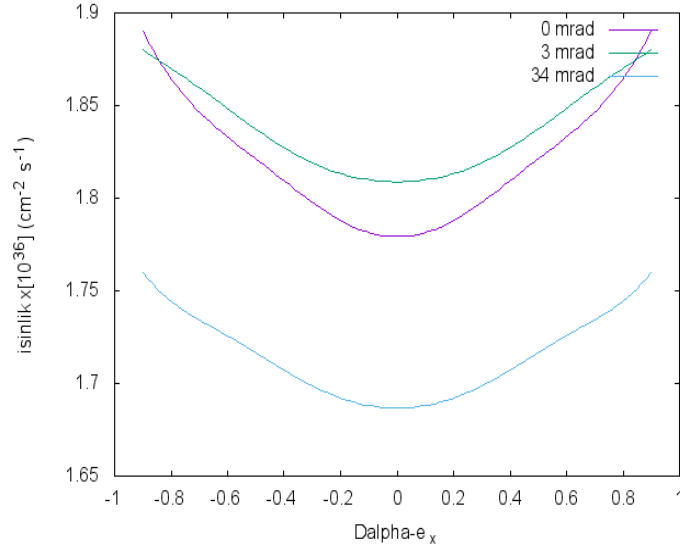
Şekil 4. Dinamik odaklamada çarpışma açısının toplam ışınlık üzerine etkisi

Şekil 5'te dinamik odaklamanın 3 mrad çarpışma açısında ışınlığı nasıl etkilediği diferansiyel ışınlık değerleri verilerek gösterilmiştir. Uygun DALPHADT parametresi seçilebilirse, dinamik odaklama yapıldığında ışınlık değerinde % 30'a kadar bir artış sağlanabilmektedir [11,12]. Ancak bu çalışmada artış miktarı sınırlı kalmış ve maksimum % 5 civarında bulunmuştur. Lineer olmayan süreçlerle karşılaştırıldığında dinamik odaklamanın ışınlığa daha fazla katkı verdiği görülmüştür.



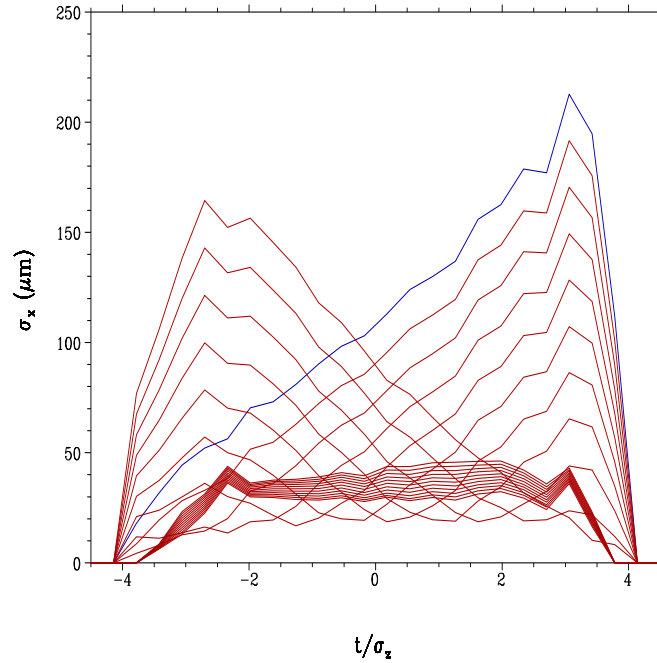
Şekil 5. Dinamik odaklamanın diferansiyel ışınlık üzerine etkisi

Şekil 6'da ise dinamik odaklama parametre değerinin ışınlığa etkisi gösterilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere bu parametrenin aynı pozitif ve negatif değerinde benzer ışınlık değerleri elde edilmiştir.

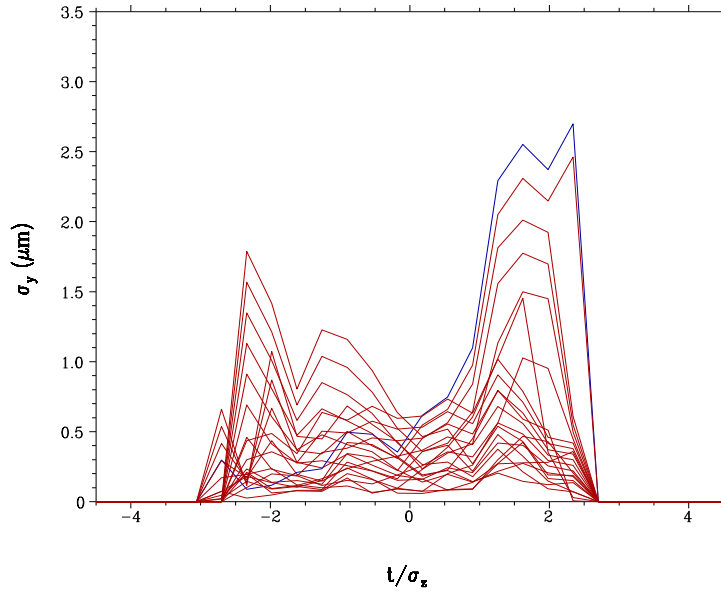


Şekil 6.  $d\alpha/dt$  dinamik odaklama parametresinin toplam ışınlığa etkisi

Dinamik odaklama yapıldığında, çarpışma bölgesi  $s_0$  dışında bir yer olarak seçilirse, demetler bu bölgeyi geçtikten seçile DALPHADT parametresinin değerine göre  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  büyümeye başlar. Çarpışma bölgesinde ise olabildiğince küçük ebatlara düşürülmeye çalışılır. Bu çalışmada dinamik odaklama elektronun x eksenini için yapılmış ve dinamik odaklama parametresi  $dalphadte\_x = -0.50$  ve  $dalphadtp\_x = -0.32$  olarak seçilmiştir. Aşağıda elektronun  $\sigma_x$ 'nin ve  $\sigma_y$ 'nin zamana göre değişimi sırasıyla şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. Şekilde mavi renkteki eğri elektronu, kırmızı renkte olanı ise pozitronun demet ebatının zamana göre değişimini göstermektedir.



Şekil 7. Dinamik odaklamada elektronun  $\sigma_x$  ölçüsünün değişimi



Şekil 8. Dinamik odaklamada elektronun  $\sigma_y$  ölçüsünün değişimi

#### 4. Sonuç ve Yorum

Tasarlanan çarpıştırıcıda lineer olmayan süreçler, dinamik odaklama ve yengeç geçişi dahil edilerek  $1.90 \cdot 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  yüksek ışınlık değeri elde edilmiştir. Bu değer ERL-halka tipli elektron-pozitron çarpıştırıcısından yüksek bir değerdir. Bahsedilen çarpıştırıcıda dinamik odaklama ve lineer süreçlerin etkisi dahil edilmemiştir. Bu çalışmada yüksek ışınlık değerine ulaşırken disruption yani bozma parametresinin maksimum değerini aşmamaya özen gösterilmelidir. Bozma değeri parametresini etkileyen sebeplerin en önemlileri olarak halkadaki paketçik boyu ve halka demetinin enine büyüklükleridir. Bozma değerinin sınırları dikkate alındığında tasarlanan çarpıştırıcıda en büyük sorun olarak bozma değeri parametresinin sınırları aşacak şekilde değer almasıdır. Bunun üstesinden gelebilmenin en olası yolu halkadaki demetlerin enine büyüklüğünü mümkün mertebe küçültebilmektir. Bunu yapabilmek ise dinamik odaklamayı yapabilmektir. Kullanılan kütle merkezi enerjisi 3.77 GeV, lineer olmayan süreçlerde meydana gelen ışınıktaki artış açısından önemsizdir. Ancak olaya dinamik odaklama dahil edildiğinde ışınıktaki maksimum % 5'e yakın bir artış görülmüştür. Buna neden olarak tasarlanan çarpıştırıcının kütle merkezi enerjisinin düşük olması gösterilebilir. Bir diğer etki olan yengeç geçişi ise her değerde ışınlığın artmasına neden olmuş ve asıl etkiyi yengeç geçişinin yaptığı görülmüştür. Olaya yengeç geçişi dahil olduğunda  $10^2$  mertebesinde bir artış gerçekleşmiştir. Son zamanlarda  $L = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ışınlık değerli yengeç geçişi çarpışmasına dayalı halka-halka tipli tau-charm fabrikası Novosibirsk Budker Institute of Nuclear Physics'de önerilmiştir. Bu çalışmada daha yüksek ışınlı çarpıştırıcı hedeflenerek charm fiziği açısından az görülen bozunumların incelenmesi mümkün olacaktır. Çalışılan çarpıştırıcının  $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ışınlıkla bile birçok sürecin incelendiği süper-B ile karşılaştırıldığında,  $L = 1.90 \cdot 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ışınlık değeri ile süper-B'den daha ileride charm fiziği uygulamaları yapılabileceği görülmüştür.

#### Teşekkür

Yazar İ. Erkoyuncu, CAIN yazarı K.Yokoya'ya dinamik odaklama hakkındaki açıklamaları için teşekkürü bir borç bilir.



## Kaynakça

- [1] E. Receptoğlu and S. Sultansoy, "A high luminosity on ring electron-positron collider for super charm factory," *Turk. J. Phys.*, vol. 35, pp. 257–263, 2011.
- [2] S. Benson et al. "High Power Operation of the JLab IR FEL Driver Accelerator," Proc. PAC07, 2007.
- [3] A. K. Çiftçi, O. Gürkan, T. Olgar, E. Receptoğlu, S. Sultansoy, Ö. Yavaş, and M. Yılmaz, "Linac-ring type phi factory of basic and applied research," *Turk. J. Phys.*, vol. 24, pp. 747-758, 2000.
- [4] S. Sultansoy, "Regional project for elementary particle physics: linac-ring type c- $\tau$ -factory," *Turk. J. Phys.*, 17, p. 591, 1991; "Linac-ring type c- $\tau$ -factory: luminosity and physics," *Turk. J. Phys.* 19, p. 787, 1995.
- [5] D. Schulte, "Beam-beam interactions at ILC", EU contract number RII3-CT-2003-506395, CARE/ELAN Document-2006-010, 2003.
- [6] C. Rimbault, P. Bamede, K. Mönig, and D. Schulte, "Study of incoherent pair generation in Guinea-Pig", EUROTeV Report-2, 2005.
- [7] P. Chen, T. Tauchi, and D.V. Schroeder, "Pair Creation at Large Inherent Angles," Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, CA 94309, SLAC-PUB 12486, 1990.
- [8] K. Yokoya, "User's Manuel of CAIN", 2011.
- [9] K. Yokoya, özel iletişim, 15.03.2018
- [10] V. Balakin, "Travelling focus", LC-91, 1991.
- [11] L. Malysheva, O. S. Adeyemi, V. Kovalenko, G. A. Moortgat-Pick, and A. Ushakov "The luminosity for the ILC travelling focus regime with offsets and angular scans," Proc. Of IPAC 2011, San Sebastian, Spain, 2011.
- [12] A. Seryi. Power Saving Optimization for Linear Collider Inretaction Region Parameters, Slac-Pub-13767.
- [13] H. Aksakal, E. Receptoğlu ve A. K. Çiftçi, "TAC Phi fabrikasının pozitron halkası için empedans hesabı", TFD-21. Fizik Kongresi, *S.D.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 8, sayı 2, s. 272-275, 2004.

İlhami ERKOYUNCU, ierkoyuncu@bingol.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1639-5062>  
Hüsni AKSAKAL, haksakal@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9470-8728>  
Halil İbrahim DURSUN, hidursun@aksaray.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8198-4931>