

## Lazer ile Hızlandırılan Döteronlarla Füzyon-Fisyon Hedef Sisteminin İncelenmesi

Mehmet Emin KORKMAZ\*<sup>1</sup>, Özgür CULFA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Karaman, Türkiye

(Alınış / Received: 05.02.2018, Kabul / Accepted: 29.05.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 11.06.2018)

### Anahtar Kelimeler

Lazer,  
Parçacık hızlandırma,  
Monte Carlo Yöntemi,  
PIC kodu,  
Füzyon-Fisyon

**Özet:** Yoğunluğu  $>10^{20}$  Wcm<sup>-2</sup> seviyesinde olan yüksek güç ve yoğunluktaki lazerler yüksek enerjili x ışınları,  $\gamma$ -ışınları ve nötronlar üretebilmektedir. Ayrıca yüklü parçacıkları yüksek enerjilere hızlandırabilirler ve her türlü nükleer reaksiyonları tetikleyebilmektedirler. Füzyon-Fisyon reaksiyonu senaryosunun temel konsepti, lazer ile hızlandırılmış parçacıkların veya iyon demetlerinin yoğunluğuna dayanır. Füzyon-Fisyon reaksiyon sistemi üretim hedefi ve reaksiyon hedefinden meydana gelmektedir. Bu çalışmada, katı hedefte hızlandırılmış döteron için 2D EPOCH PIC simülasyonları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Üretim hedefinde döteronların hızlandırılması için lazer sisteminin 200TW'lık güç, 5J enerji ve 25fs atma süresine sahip olduğu kabul edildi. Bu tarz lazerler hedef üzerinde 10  $\mu$ m'ye odaklandığı zaman  $10^{20}$  W cm<sup>-2</sup> yoğunluğa çıkabilmektedir. Çalışmamızda gösterilmiştir ki bu tarz masaüstü terawatt lazerler Füzyon-Fisyon reaksiyonları için döteronları 10 MeV enerjiye kadar çıkarılabildiğinden kullanılabilir. Füzyon-Fisyon hedef sisteminin simülasyonu için Monte Carlo kodu MCNPX2.7.0 kullanılmıştır. Üretim hedefinden çıkan hızlandırılmış döteryumlar, reaksiyon hedefinin toryum tabakasında nükleer fisyon reaksiyonlarına neden olmaktadır. Reaksiyon hedefindeki toryum tabakası, füzyon tabakası ve CH<sub>2</sub> tabakası yaklaşık 5  $\mu$ m'lik bir kalınlığa sahiptir.

## Investigation of Fusion-Fission Target System Using Laser-Induced Deuteron

### Keywords

Laser,  
Particle acceleration,  
Monte Carlo Method,  
PIC code,  
Fusion-Fission

**Abstract:** High-power lasers with irradiances of  $>10^{20}$  Wcm<sup>-2</sup> are able to produce high-energy x-rays,  $\gamma$ -rays and neutrons, also can accelerate charged particles, and trigger all kind of nuclear reactions. The basic concept of the fusion-fission reaction scenario based on high dense laser accelerated particles or ion bunches. The fusion-fission reaction systems consist of production and reaction target. In this study, we calculated deuterium acceleration in solid targets by using 2D EPOCH PIC codes. It was assumed that the laser system had a power of 200TW, 5J energy and 25fs to accelerate the deuterons at the production target. 200 TW laser systems can reach the irradiances up to  $10^{20}$  Wcm<sup>-2</sup> by focusing around 10  $\mu$ m focal spot on target. It was found that table top Terawatt lasers can be used to for fusion-fission studies by accelerating deuterons up to 10 MeV. Monte Carlo code MCNPX2.7.0 was used for the simulations of fusion-fission target systems. The accelerated deuterons from the production target induce nuclear fission reactions in the thorium layer of the reaction target. The thorium layer, the fusion layer and the CH<sub>2</sub> layer in the reaction target have a thickness of around 5  $\mu$ m.

### 1. Giriş

Günümüzde medikal uygulamalarda kullanılan geleneksel hızlandırıcılar, X-ray radyoterapi için 6 MeV in üstündeki elektron enerjilerinde kullanılır. Proton siklotronları ile pozitron emisyon tomografisi (PET) izotopu üretimi için 10-30 MeV aralığındaki sabit enerji protonları kullanılmaktadır. Proton

onkolojisinde ise  $\sim 250$ MeV enerjili protonlar kullanılmaktadır. Dünya çapında kanser terapisi için 8000'den fazla elektron hızlandırıcısı ve 30'dan fazla proton ve ağır iyon hızlandırma tesisi kullanılmaktadır [1-4].

Gelişen teknoloji ile çok yüksek enerji ve yoğunluklara çıkabilen ( $>10^{20}$  Wcm<sup>-2</sup>) lazerlerle

plazma ortamı oluşturulabilir. Lazer ile hızlandırma ve geleneksel hızlandırıcılar karşılaştırıldığında, iki teknoloji arasındaki ana farklılıklardan bazıları lazer teknolojilerinin hızlı gelişmesi, boyutlarının küçük olması, düşük maliyetli ve daha az radyasyon zırlaması gerektirmesi sayılabilir. 1960'da lazerin icadından sonra, lazerlerin gücü, yıllar içinde çarpıcı bir şekilde arttı ve aslında lazer teknolojisindeki son gelişmeler, dünya çapında birçok laboratuvarında kompakt terawatt (TW) ve petawatt (PW) gücündeki lazer sistemlerinin geliştirilmesine neden oldu [5-8]. Günümüzde yüksek güçlü lazerler yardımıyla yüklü parçacıklar, yüksek enerjili  $\gamma$ -ışınları ve nötron üretebildikleri ayrıca birçok nükleer reaksiyonu tetikleyebildikleri ispatlanmıştır. Lazer yardımıyla parçacık ivmelendirme işlemi, göreceli lazer-plazma etkileşimi süreçlerine bağlıdır. Çünkü yüksek yoğunluklu lazer atmaları hedef materyali hemen iyonize edip bir plazma haline getirecektir. Yüksek yoğunluklu lazerler ile oluşturulan plazmalarda hızlandırılan parçacıkların pek çok uygulama alanı bulunmaktadır. Bu uygulamalar; proton görüntüleme, PET için tıbbi izotop üretimi, kanserli dokuların proton tedavisi, nükleer parçalanma (sapallasyon), yüksek seviyeli radyoaktif atıkların dönüşümü, çeşitli uygulamalar için pulslu nötron kaynağı ve lazer ile füzyon dahil olmak üzere sıralanabilir [9].

Son 10 yılda yüksek güçlü lazer teknolojisinde petawatt değerlerine ulaşan lazer güçleri ile göze çarpan ilerleme kaydedilmiştir. Lazer pulsundaki güç, bir atma içindeki enerjinin zaman süresine bölünmesi şeklinde tanımlanır. Petawatt lazerleri, toplam atma enerjisinin büyük bir bölümüyle  $10^{12}$  V.m<sup>-1</sup> elektrik alanlar oluşturur ve enerjisi 1 GeV'in üstünde olan rölativistik elektronlar üretirler. Lazer ışınımı,  $10^{18}$  W.cm<sup>-2</sup> üstündeki yoğunluklarında katı ve gaz hedeflere odaklandığında rölativistik plazmalar yaratır. Bu elektronlar, proton, ağır iyon, nötron ve yüksek enerjili foton demetlerinin oluşumuna neden olur. Yapılan çalışmalara göre lazerle etkileşime giren hedefler gaz olarak kullanıldığında elektronların enerjileri GeV seviyesine, katı için ise 150 MeV seviyesine ulaşmaktadır [10]. Ayrıca içinde hızlandırılan elektronların oluşturduğu elektrik alan plazma içindeki iyonların da hızlanmasına neden olmaktadır. Yoğun bir lazer ışını bir gaz veya katı hedefle etkileşime girdiğinde, elektron ışınları, protonlar ve ağır iyonlar hem hedefin önünde hem de arkasında oluşturulur ve esas olarak protonlar yüzeydeki saf olmayan tabakalardan üretilir [11]. Elektronlar aynı zamanda bremsstrahlung süreçleri yoluyla daha fazla nükleer reaksiyonlara neden olabilecek yüksek enerjili fotonlar üretirler [12-15].

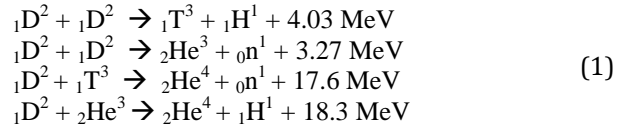
Yüksek güçlü lazerlerin gelişimi lazerler yardımıyla füzyon araştırmalarına bir ivme kazandırmıştır. Optimum koşullar altında D-T füzyon reaksiyonları için bir hedefte  $10^{14}$ - $10^{15}$  nötron.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> aralığında bir nötron akısı, lazer pulsunun enerjisi 100 Hz'de çalışan 100 J lük bir lazer sistemi ile elde edilebilir. Bu nedenle, bu nötronlar tarafından reaktör duvarlarına

neden olunan hasar, gerçekçi koşullar altında lazerle indüklenen D-T füzyon nötronları kullanılarak incelenebilir. Bu tür çalışmalar, nükleer atıkları depolamak için kullanılan kapları, füzyon reaktörlerinde hasar sürecini daha iyi anlamak ve daha sağlam malzemelerin geliştirilmesi ve test edilmesini sağlayacaktır. Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı hâlihazırda LIFE adı verilen ve enerji üretmek ve nükleer atık yakmak için hibrit bir füzyon-fisyon enerji sistemi geliştirmektedir [16, 17].

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Füzyon-Fisyon hedef sistemi

Füzyon-Fisyon reaksiyon senaryosunun temel kavramı, lazer ile hızlandırılmış iyon demetlerinin çok yüksek yoğunlukta olmasına bağlıdır. Füzyon-Fisyon reaksiyonunu oluşturmak için iki hedef sistemi oluşturulur. Birinci hedef sisteminde hedefe çarpan yüksek yoğunluklu lazer ile plazma oluşturularak elektronlar, protonlar ve iyon demetleri hızlandırılır. İkinci hedef sisteminde ise hızlanan parçacıklar veya iyon demetleri füzyon yapabilecek bir malzeme ve fisil bir izotopun bulunduğu hedef ile reaksiyona girer. Burada füzyon malzemesi olarak döteryum, trityum, He-3 gibi izotoplar olabilirken fisil hedef materyali olarak da Th-232, U-238 veya Np-237 gibi izotoplar seçilebilir. Denklem 1'de görülen reaksiyonlar temel bazı füzyon reaksiyonlarını göstermektedir.



Fisil hedef materyali olarak Th-232 seçilmesinin nedenlerinden biri hazırlanması ve kullanılması esnasında uzun yarı ömürlü ( $1.4 \times 10^{10}$  yıl) olmasından dolayı radyasyondan korunmak için geniş güvenlik önlemleri gerektirmemesidir. Ayrıca metalik toryum hedefleri  $10^{-6}$  mbar'lık tipik bir lazer vakumunda kimyasal olarak oldukça kararlıdır. Bununla birlikte, daha egzotik füzyon ürünlerinin üretilmelerini araştırabilmek için U-238, Np-237 gibi daha ağır aktinit türlerinin kullanılması da avantajlı olabilir [12].

Yapılan deneysel çalışmaların pek çoğunda ince ve ultra ince katı hedefler kullanılmaktadır. Son yıllarda, katı (folyo) hedeflerin kullanıldığı, lazerle çalışan iyon ivmesine de önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bazı deneyler, hızlanmayı kontrol etmek ve verimi optimize etmek için yapılandırılmış katı hedeflerden (silindirler, koniler, hedeflere bağlı bobinler gibi) oluşabilir. İkincil katı hedeflerin ayrıca istenilen nükleer reaksiyonları veya nükleer uyarılmış durumları üretmeleri istenir. Ayrıca katı hedeflerin dışında gaz hedeflerden oluşan bir sistemde de reaksiyonlar gerçekleşebilir.

Hedef boyutlara ve lazer özelliklerine bağlı olarak farklı ivmelenme mekanizmaları tanımlanmış ve kullanılmıştır. Tasarlanmış olduğumuz hedef sistemi, üretim hedefi ve reaksiyon hedefi olarak adlandırılan iki hedefi kapsamaktadır. Birincisi, yüksek yoğunluklu (200 TW) lazerin çarptırıldığı ve plazmanın oluşturularak döteryum iyonlarının hızlandırıldığı hedeftir. Daha güçlü lazerler mevcutken 200 TW'lık lazer sistemini seçmemizdeki ana neden daha ucuz ve basit bir sistem olmasıdır. İkincisi, sandviç yapısında üç katmandan oluşan, her birinin kalınlığı 5 mikron ve kenarları 15 mikron olan dikdörtgenler prizması şeklindeki katı ince hedeflerdir. İkinci hedefin ilk bölümünde plastik hedef (CH<sub>2</sub>) malzemesi, ikinci kısmında füzyon materyali (döteryum, He-3), üçüncü kısımda ise fisil malzeme (Th-232) bulunmaktadır. Hızlandırılmış döteryumlar bu son kısımdaki toryum çekirdeğinin fisyonuna neden olur.

### 3. Bulgular

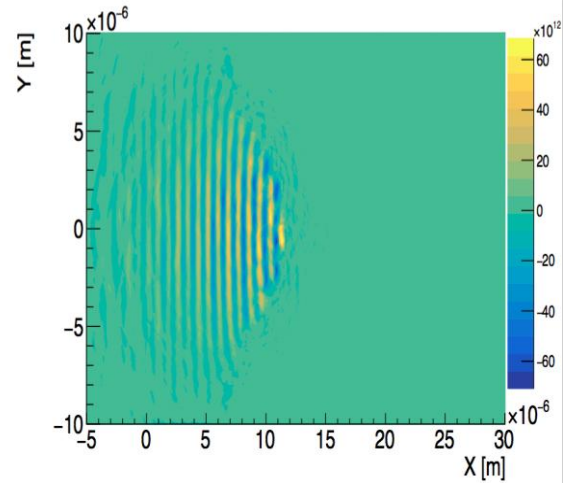
#### 3.1. 2D EPOCH PIC hesaplamaları

Hücre içindeki parçacık (PIC) metodu plazmanın kinetik simülasyonları için kullanılan en yaygın yöntemdir [18, 19]. PIC metodu, Langarian yaklaşımı kullanılarak Maxwell-Vlasov denklemlerinin çözümüyle elektrik ve manyetik alanlarının ve akımlarının sabitlenmiş hücreler içinde bir faz uzayında gösterilmesiyle oluşturulan bilgisayar ortamındaki plazmayı oluşturan parçacıklar için bir çözüm sağlar. Bu nedenden dolayı çarpışmasız ortamlardaki lazer plazma etkileşimlerinin incelenmesinde PIC metodunun kullanılması daha elverişlidir.

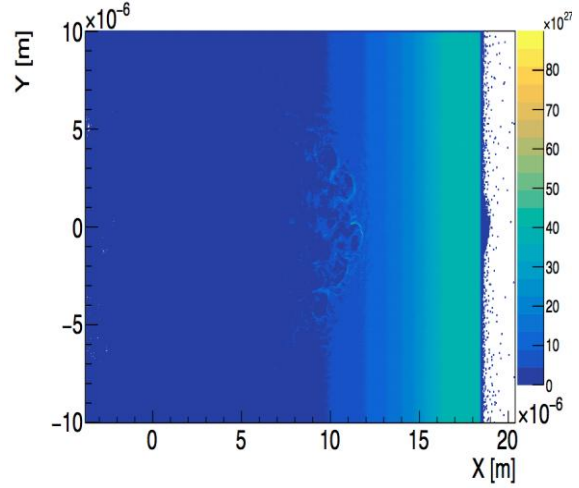
Çalışmamızda 2 boyutlu EPOCH PIC simülasyonları kullanılmış ve 200 TW lazer plazma etkileşimleri ile döteryum ve elektron hızlandırma mekanizmaları incelenmiştir [20]. Lazer plazma etkileşimleri sonucu döteryum hızlandırılması ve enerji spektrumları EPOCH 2D PIC (particle-in-cell) simülasyonları sonucu elde edilmiştir. Simülasyonda 200 TW lazer sistemi (5 J, 25 fs, 0.8  $\mu\text{m}$ ) hedef üzerinde 10  $\mu\text{m}$ 'lik bir alana odaklanarak  $2.5 \times 10^{20} \text{ W.cm}^{-2}$  lik bir yoğunluğa çıkarılmış ve tamamen iyonlaşmış olarak kabul edilen döteryum hedefe çarptırılmıştır. Lazer 150 fs boyunca etkileşime girmiş ve 300 fs sonunda lazer tüm enerjisini hedefe gönderdikten sonra döteryum enerji spektrumu simülasyondan elde edilmiştir.

Simülasyon 35x20  $\mu\text{m}$ 'lik bir simülasyon kutusu içinde 3000x1000 hücre ile tanımlanmıştır. Her bir hücreye 100 elektron, 100 proton ve 100 döteron yerleştirilmiştir. Hedef kalınlığı 2  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Hedef önünde oluşturulan plazmayı  $n_s = n_e \exp(-x/L)$  denklemi ile tanımlarsak ( $n_s$ , katı yoğunluğu,  $n_e$ , elektron yoğunluğu,  $x$ , plazma boyutu ve  $L$ , ölçüm uzunluğu (scale length)) katı önünde  $L=3$

$\mu\text{m}$ 'lik bir plazma yerleştirilmiştir ki bu durum lazer katı etkileşimlerinde lazer kontrastının tamamen saf olamayacağından beklenen ve gerçekçi bir durumdur. Şekil 1'de lazer plazma ile etkileşime başladıktan 100 fs sonra lazer elektrik alanı (a) ve elektron yoğunluğu (b) gösterilmektedir.



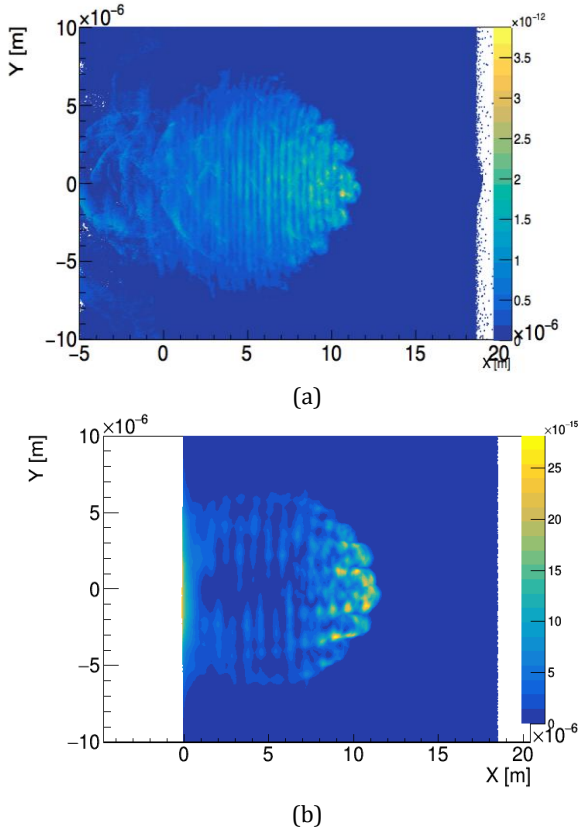
(a)



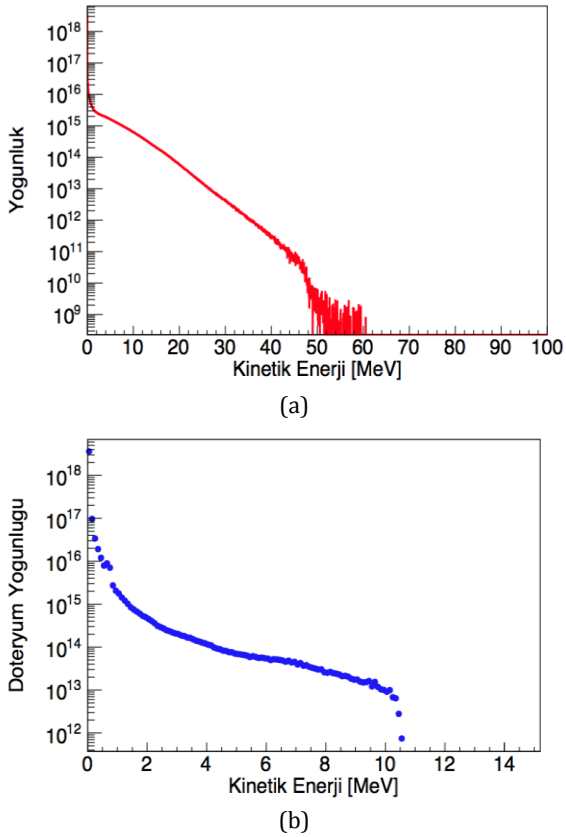
(b)

**Şekil 1.** Lazer plazma ile etkileşime başladıktan 100 fs sonra (a) lazer elektrik alanı ve (b) elektron yoğunluğu gösterilmektedir.

Şekil 2'de lazer plazma ile etkileşime başladıktan 100 fs sonra (a) elektron ve (b) döteron momentimleri gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi elektronlar ve döteronlar plazma içinde lazer tarafından hızlandırılmaya başlamıştır. Elektronların daha hafif olması lazer elektrik alanı ile beraber hareket etmelerini sağlamıştır ama daha ağır olan döteronlar lazer basıncı ile beraber ileriye doğru itilmektedirler. Simülasyondan elde edilen sonuçlara göre 200 TW lazer yardımı ile plazma içinde döteryumlar 10 MeV'e kadar hızlandırılabilirler ve ayrıca bu özellikteki lazerlerle elektronlarda 60 MeV'e kadar hızlandırılmıştır. Şekil 3 (a) ve (b) de lazer plazma etkileşimleri sonucu hızlandırılan elektron ve döteron enerji spektrumları gösterilmiştir.

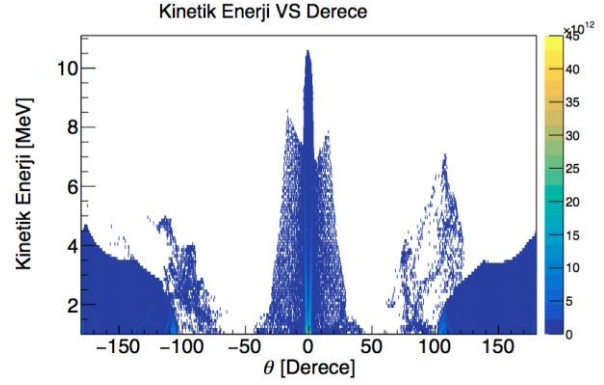


**Şekil 2.** Lazer plazma ile etkileşime başladıktan 100 fs sonra (a) elektron ve (b) döteron momentumları gösterilmektedir.



**Şekil 3.** Lazer plazma ile etkileşime başladıktan 300 fs sonra (a) elektron ve (b) döteron enerji spektrumları gösterilmektedir.

Döteronun ve diğer ağır iyonların kullanıldığı uygulama alanlarının hassas noktalarından bir tanesi iyonların hedef üzerine odaklanmasıdır. Simülasyon sonucunda elde ettiğimiz değerler göstermiştir ki y yönünde (lazer x yönünde gelmektedir) çok az bir açısal dağılım gözlemlenmiştir. Şekil 4, döteryumların bu şekilde odaklanmış olması bu tarz reaksiyonların yapılabilirliğinin daha gerçekçi olduğunu söylemektedir.

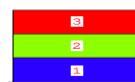


**Şekil 4.** Döteryum açısal dağılımının enerji ile değişiminin gösterilmesi (0° lazer yönünü göstermektedir)

### 3.2. Monte Carlo kodu hesaplamaları

EPOCH kodu ile kaynak parçacığı olan döteronları üretmek için öncelikle hedef tasarımı yapıldı. Döteronların 1-10 MeV enerji aralığında bir dağılıma sahip olduğu hesaplama sonucu elde edildi. Elde edilen döteronlar üç boyutlu Monte Carlo kodunda kaynak olarak kabul edildi ve reaksiyon hedef tasarımı yapıldı.

Hesaplamalar Monte Carlo metodunu kullanan MCNPX kodunda yapıldı. MCNPX (Monte Carlo N-Particle Transport Code-eXtended) geniş aralıktaki farklı fiziksel etkileşimlerinin simülasyonu için tasarlanmış bir bilgisayar kodudur. Bu kod, tamamen üç boyutlu olup genişletilmiş nükleer tesir kesiti kütüphaneleri ve parçacık türleri için fizik modelleri kullanmaktadır [21]. MCNPX yardımıyla iki farklı hedef tasarımı yapılmıştır. Hedef üç bölgeye ayrılmıştır. Birinci hedef sistemi plastik (CH<sub>2</sub>), He-3 ve <sup>232</sup>Th katmanından, ikinci hedef sistemi ise plastik (CH<sub>2</sub>), D(<sup>2</sup>H) ve <sup>232</sup>Th katmanından oluşmaktadır. Hedef ve kaynaktan oluşan füzyon-fisyon hedef tasarımı Şekil 5'de görülmektedir. Şekil 5'de alt kısımda görülen düz çizgi döteronların hızlandırıldığı kaynağı göstermektedir.



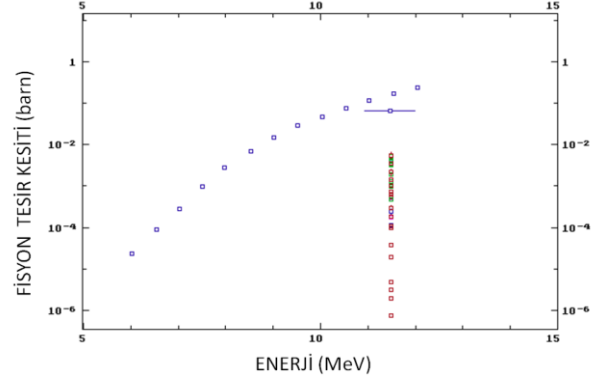
Hedef 1	Hedef 2
Th-232	Th-232
He-3	H-2
CH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub>

**Şekil 5.** Füzyon-Fisyon hedef tasarımı

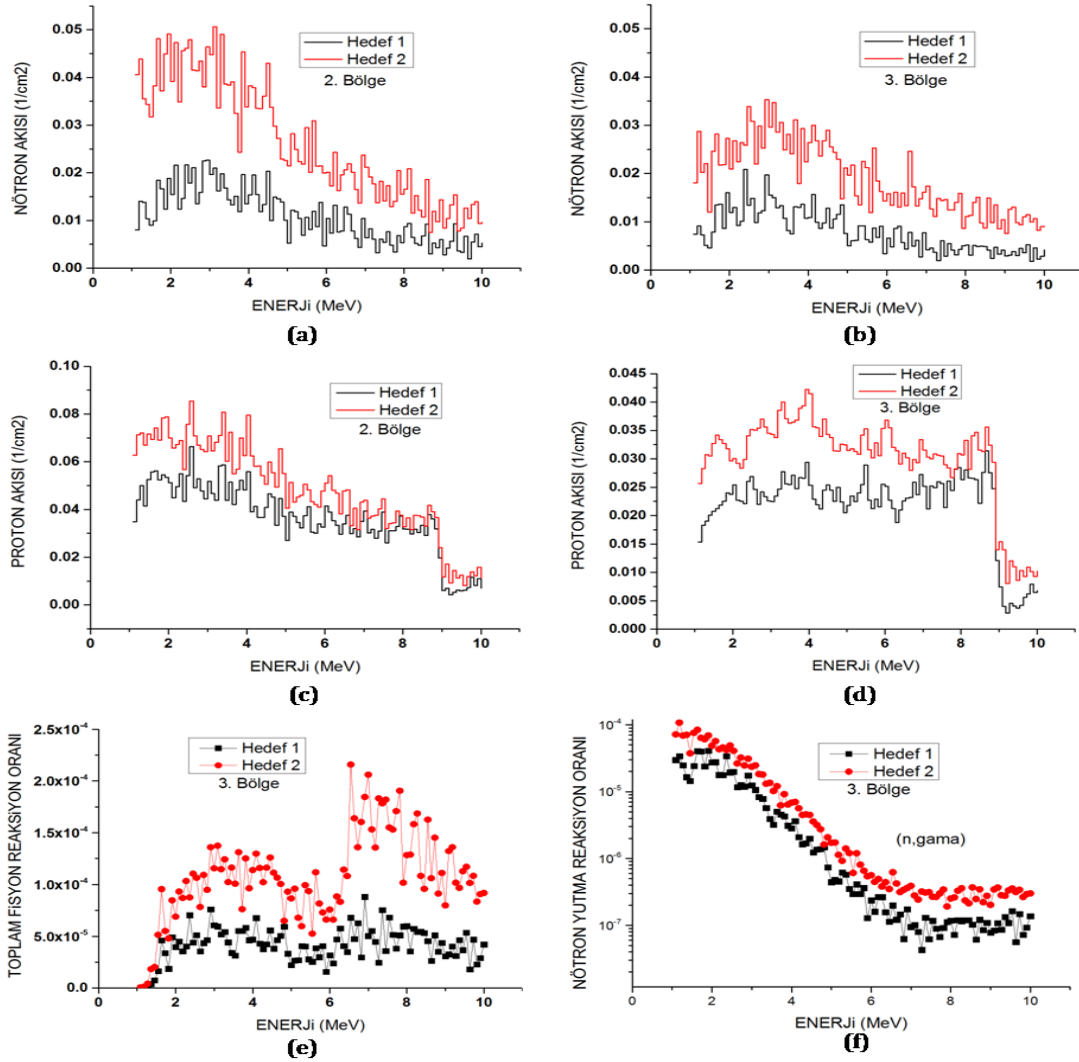
Füzyon-Fisyon hedef sistemlerinin döteron demetiyle ışınlanması MCNPX 2.7.0 Monte Carlo kodu kullanılarak simüle edildi [21]. Her iki hedef sisteminde 10 MeV enerjili döteron demetleri kullanılarak füzyon ve fisyon reaksiyonları Şekil 5'de gösterilen 2. ve 3. bölgelerde incelendi.

Şekil 6'da  $^{232}\text{Th}$ 'nin döteryum fisyon reaksiyonunun EXFOR veri tabanından elde edilen deneysel tesir kesiti sonuçları 0-15 MeV enerji aralığında gösterilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi 5 MeV'de fisyon tesir kesiti yaklaşık  $10^{-6}$  barn olduğu ve artan enerji ile 1 barn'a kadar ulaşmaktadır [22]. Şekil 7'de görüldüğü gibi, bu bölgelerde nötron (Şekil 7a ve b) ve proton akısı (Şekil 7c ve d), toplam fisyon reaksiyon oranı (Şekil 7e) ve  $^{232}\text{Th}$  nötron yakalama oranı (Şekil 7f) hesaplandı. 2. ve 3. bölgede DD reaksiyonları  $\text{D}^3\text{He}$  reaksiyonlarına kıyasla proton ve nötron akısını daha fazla arttırmıştır. DD reaksiyonlarında %50 olasılıkla nötron %50 olasılıkla proton üretilir,  $\text{D}^3\text{He}$  reaksiyonlarında ise sadece proton üretilir. Elde edilen sonuçlara göre 3. bölgede,

DD reaksiyonlarında üretilen uygun enerjili parçacıklarla toplam fisyon reaksiyon oranı ve nötron yakalama oranı,  $\text{D}^3\text{He}$  reaksiyonları sonucu meydana gelen reaksiyonlara kıyasla yüksek çıkmıştır.  $^{232}\text{Th}$ , üçüncü bölgede  $^{232}\text{Th}(n,g)^{233}\text{Th}(\beta^-)$  ve  $^{233}\text{Pa}(\beta^-)^{233}\text{U}$  reaksiyon süreçleriyle  $^{233}\text{U}$ 'a dönüşür. Bu süreçler gerçekleşirken  $^{232}\text{Th}(n,f)$  reaksiyonları sonucu üretilen gecikmiş nötronlar da  $^{233}\text{U}$  üretimine katkı sağlar.



Şekil 6.  $^{232}\text{Th}(d,f)$  reaksiyonu tesir kesiti [22]



Şekil 7. Füzyon fisyon hedef sisteminde; (a) 2. bölgede nötron akısı, (b) 3. bölgede nötron akısı, (c) 2. bölgede proton akısı, (d) 3. bölgede proton akısı, (e) toplam fisyon oranı, (f) (n,gama) reaksiyon oranı hesaplamaları

#### 4. Tartışma ve Sonuç

$^{232}\text{Th}$ 'nin döteryum fisyon reaksiyonunun deneysel tesir kesiti sonuçları 0-15 MeV enerji aralığında incelendiğinde 5 MeV'de fisyon tesir kesiti yaklaşık  $10^{-6}$  barn olduğu ve artan enerji ile 1 barn'a kadar ulaştığı deneysel olarak EXFOR veri tabanından elde edilen sonuçlarda görülmektedir [22]. Hedefin döteronlarla ışınlamaları sırasında, fisyon olayını meydana getiren en önemli parçacık nötronlardan sonra protonlardır. Bu çalışmada DD veya  $\text{D}^3\text{He}$  reaksiyonlarıyla üretilen protonlarında  $^{232}\text{Th}$  ile fisyonu neden olabileceği görülmüştür. Deneysel sonuçlara bakıldığında 0-15 MeV enerji aralığında  $^{232}\text{Th}$ 'nin protonlarla fisyon reaksiyon tesir kesiti de döteryuma benzer olarak  $10^{-6} - 1$  barn aralığında bulunmaktadır [22].

Mevcut enerji krizini çözümlen geleceğe vadeden yollarından birisi de manyetik sınırlayıcı ve kritik olmayan yakıt bölgesi içeren bir battaniden oluşan Füzyon-Fisyon hibrit enerji reaktörleridir. Özellikle toryum ile çalışabilecek böyle bir sistemin yapılmasında nötron kaynağı olarak füzyon reaksiyonlarının lazer-plazma etkileşmeleriyle elde edilmesi yeni ve gelişen bir teknolojidir. Geleneksel hızlandırıcılardan daha hızlı gelişim süreci gösteren yüksek yoğunluklu lazerler ile plazma etkileşme araştırmaları füzyon-fisyon reaktörleri için son derece umut vericidir.

#### Kaynakça

- [1] Yasuki, N., Kazuyuki, H., Yuichi, H., Hideya, S., Shoji, M., Nozomi, S., Masako, K., Hideo, H., Tadaihiro, K., Kazuaki, T., Tetsuya, K. S., Futoshi, M., Osamu, I., Nobuyuki, I., Yohji, S., Kenji, Y., Takehiko, S., Akio, O., Nobuhiro, T., Yukimasa, K., Norihito, S., Hisamichi, Y., Yoshitsugu, A., Yuji, K., Toshinori, M., ve Takashi, I., 2013. Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons, *Journal of the Physical Society of Japan*, 82(6), 064201.
- [2] Ledingham, K. W. D., Galster, W., 2010. Laser-driven particle and photon beams and some applications, *New J. Phys.*, 12, 045005.
- [3] Dosanjh, M., Cirilli, M., Myers, S., ve Navin, S., 2016. Medical Applications at CeRN and the eNLiGHT Network, *Frontiers in Oncology*, 6(9).
- [4] U. Amaldi, (2005). Nuclear physics applications in diagnostics and cancer therapy, *Nuclear Physics A*, Vol. 751, pp. 409C-428C.
- [5] Jirka, M., Klimo, O., Vranic, M., Weber, S., Korn, G., 2017. QED cascade with 10 PW-class lasers, *Scientific Reports*, 7(15302).
- [6] Perry, M. D., Pennington, D., Stuart, B. C., Tietbohl, G., Britten, J. A., Brown, C., Herman, S., Golick, B., Kartz, M., Miller, J., Powell, H. T., Vergino, M., Yanovsky, V., 1999. Petawatt laser pulses, *Optics Letters* Vol. 24, Issue 3, pp. 160-162.
- [7] Rao, B. S., Moorti, A., Chakera, J. A., Naik P. A., ve Gupta, P. D., 2017. Quasi-monoenergetic electron beams from a few-terawatt laser driven plasma acceleration using a nitrogen gas jet, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 59(6).
- [8] Wang, F., Xie, G., Yuan P. ve Qian, L., 2015. Theoretical design of 100-terawatt-level mid-infrared laser, *Laser Physics Letters*, 12(7).
- [9] Izawa, Y., Miyanaga, N., Kawanaka, J., ve Yamakawa, K., 2008. High Power Lasers and Their New Applications, *Journal of the Optical Society of Korea*, 12(3), pp. 178-185.
- [10] Culfa, O., Tallents, G. J., Rossall, A. K., Wagenaars, E., Ridgers, C. P., Murphy, C. D., Dance, R. J., Gray, R. J., McKenna, P., Brown, C. D. R., James, S. F., Hoarty, D. J., Booth, N., Robinson, A. P. L., Lancaster, K. L., Pikuz, S. A., Faenov, A. Ya., Kampfer, T., Schulze, K. S., Uschmann, I., ve Woolsey, N. C., 2016, Plasma Scale Length Effects on Electron Energy Spectra in High Irradiance Laser Plasmas, *Physical Review E*, 93:043201.
- [11] Culfa, O., 2017, Measurements of Proton Energy Spectra Generated by Ultra Intense Laser Solid Interactions, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences* Vol. 21(2), pp. 338-344.
- [12] Negoita, F., Roth, M., Thirlof, P. G., Tudisco, S., Mirfayzi, S., Kar, S., Hannachi, F., Moustazis, S., Pomerantz, I., McKenna, P., Fuchs, J., Sphor, K., Acbas, G., Anzalone, A., Audebert, P., Balascuta, S., 2016. Laser driven nuclear physics at ELI-NP, *Romanian Reports in Physics*, Vol. 68, Supplement, P. S37-S144.
- [13] Li, R. F., Gao, S. C., Xiao, C. F., Xu Z. Y., Xue X. T., Liu J. B., Zhao, Y. Y., Chen J. E., Lu H. Y., Yan X. Q., 2017. Generation of ultrafast broadband small angle hundreds MeV electron bunches from laser wakefield acceleration, *Acta Physica Sinica* 66(15), 154101.
- [14] Hyung Taek, K., Pathak, V. B., Ki Hong P., Lifschitz, A., Sylla, F., Jung Hun S., Hojbota, C., Seong Ku L., Jae Hee S., Hwang Woon L., Guillaume, E., Thauray, C., Kazuhisa, N., Vieira, J., Silva, L. O., Malka, V., ve Chang Hee N., 2017. Stable multi-GeV electron accelerator driven by waveform-controlled PW laser pulses, *Scientific Reports* Vol. 7, 10203.
- [15] Guénot, D., Gustas, D., Vernier, A., Beaufort, B., Böhle, F., Bocoum, M., Lozano, M., Jullien, A., Lopez-Martens, R., Lifschitz A., Faure, J., 2017. Relativistic electron beams driven by kHz single-

- cycle light pulses, *Nature Photonics*, 11(5) pp. 293-296.
- [16] Kramer, K. J., Latkowski, J. F., Abbott, R. P., Boyd, J. K., Powers, J. J., ve Seifried, J. E., 2009. Neutron transport and nuclear burnup analysis for the laser inertial confinement fusion-fission energy (life) engine, *fusion science and technology*, 56(2), pp. 625-631.
- [17] Kramer, K. J., Meier, W. R., Latkowski, J. F., Abbott, R. P., 2010. Parameter study of the LIFE engine nuclear design, *Energy Conversion and Management*, 51(9), pp. 1744-1750.
- [18] Dawson, J. M., 1983. Particle simulation of plasmas, *Rev. Mod. Phys.* 55(2), 403-447.
- [19] Birdsall, C. K. and Langdon, A. B., 1991. *Plasma Physics via Computer Simulation*, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.
- [20] Arber, T. D., Bennett, K., Brady, C. S., Douglas, A. L., Ramsay, M. G., Sircombe, N. J., Gillies, P., Evans, R. G., Schmitz, H., Bell A. R., ve Ridgers, C. P., 2015. Contemporary particle-in-cell approach to laser-plasma modelling. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1-26, 57(2015).
- [21] Pelowitz, D. B., 2011. *MCNPX User'S Manual, Version 2.7.0*, April 2011, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-11-00438.
- [22] *Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)*, 2018. [www.nndc.bnl.gov/exfor/](http://www.nndc.bnl.gov/exfor/) (Erişim Tarihi: 04.05.2018).