

# LIFE Füzyon Reaktöründe Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretimi

Adem ACIR<sup>\*,a</sup>, Samet AKTI<sup>b</sup>

<sup>a,\*</sup> Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, ANKARA 06500, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD, ANKARA 06500, TÜRKİYE

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 18.11.2018  
Kabul: 07.03.2019

### **Anahtar Kelimeler:**

LIFE füzyon reaktör,  
Hidrojen üretimi,  
Yüksek sıcaklıkta  
elektroliz.

<sup>\*</sup>Sorumlu Yazar:

e-posta:  
[adema@gazi.edu.tr](mailto:adema@gazi.edu.tr)

## ÖZET

Bu çalışmada, lazer sürüclü füzyon reaktörünün (LIFE) zamana bağlı nötronik performansı ve bu performansa bağlı olarak hidrojen üretim potansiyeli yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Zamana bağlı nötronik hesaplamalarda nötron transport kodu MCNP kullanılmıştır. Nükleer yakıt olarak minör nükleer atıklar ve soğutucu olarak doğal lityum kullanılmıştır. Nötronik hesaplamalarda trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri hesaplanmıştır. Nötronik hesaplamalardan elde edilen M yardımı ile HTE yöntemiyle hidrojen üretimi için gerekli toplam güç hesaplanmıştır. Elde edilen toplam güce bağlı olarak zamana bağlı LIFE füzyon reaktöründeki hidrojen üretimi incelenmiştir. Hesaplamalar sonucunda ele alınan bu reaktörün nötronik performansının iyi olduğu ve HTE yöntemi ile hidrojen üretebildiği belirlenmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.01.01>

# Hydrogen Production By Using High Temperature Electrolysis Method in a LIFE Fusion Reactor

## ARTICLE INFO

Received: 18.11.2018  
Accepted: 07.03.2019

### **Keywords:**

LIFE fusion reactor,  
Hydrogen production,  
High temperature  
electrolysis

<sup>\*</sup>Corresponding

**Authors**  
e-mail:  
[adema@gazi.edu.tr](mailto:adema@gazi.edu.tr)

## ABSTRACT

In this study, the time-dependent neutronic performance and hydrogen production potential by using high temperature electrolysis (HTE) method was investigated for laser driver fusion reactor (LIFE). During the calculation of time dependent neutron parameters, MCNP neutron transport code is used. While minor nuclear wastes are used as nuclear fuel, natural lithium coolant is used as coolant. As a result of the neutronic calculations, time dependent TBR and M values of LIFE reactor were obtained. The total power required for HTE method was calculated by using the time dependent M value which is obtained as a result of the neutronic calculations. Time dependent hydrogen production was investigated depending on the total power obtained from the LIFE fusion reactor. As a result of the calculations, it was found that this reactor has a good neutronic performance and can produce hydrogen by HTE method.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.01.01>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Canlıların yaşamsal ihtiyacının karşılanabilmesi için gereken kaynakların başında enerji yer almaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanması adına dünyada bir takım politikalar benimsenmiştir. Bu politikalar benimsenirken aşağıda belirtilmiş olan kriterler

dikkate alınmıştır. Bu kriterler enerji politikalarının sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

- Enerji kaynaklarının seçimi
- Enerji kaynaklarının formu
- Enerji kaynaklarının sürekliliği

- Enerji üretim ve dönüştürme yöntemleri
- Enerji verimliliği
- Çevre ve Güvenlik

Dünya enerji ihtiyacının büyük bölümü fosil yakıtlardan sağlandığı ve fosil yakıtların zaman içinde tükeneceği bilinmektedir. Bu sebepten dolayı alternatif enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının en başında hem yenilenebilir olması hem dünyadaki bolluğu hem de çevre dostu olması açısından hidrojen bulunmaktadır [1].

Hidrojen kömür ve gaz gibi birincil bir enerji kaynağı değildir. Bir enerji taşıyıcısıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, hidrojen üretimi için en önemli kaynaklardan biridir [2]. Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılmasının en büyük avantajı, fosil yakıtlardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgar, hidro, jeotermik, biyokütle) ve nükleer enerji gibi tüm birincil enerji kaynaklarından faydalanarak üretilebilir olmasıdır. Özellikle, hidrokarbonlar, su ve hatta bazı organik maddeler gibi hidrojen atomları içeren herhangi bir maddeden üretilebilmektedirler. Tablo 1'de, farklı kaynakların dünyadaki mevcut hidrojen üretimine katkısı, her bir ham madde için kullanılan mevcut teknolojilerle birlikte özetlenmektedir [3].

Tablo 1. Dünyadaki Hidrojen Üretim Kaynakları ve Teknoloji Kullanımı (*Hydrogen Production Sources and Technology in the World*)

Ham Malzeme	Teknoloji	Yüzd e
Doğal Gaz	Katalitik buhar reformu	48
Rafineri yağı	Kısmi Oksidasyon	30
Kömür	Gazlaştırma	18
Su	Elektroliz	4

Hidrojen üretimi için yüksek sıcaklıklar gereklidir. Yüksek sıcaklıktaki ısı gereksinimi karşılamak için kullanılacak en verimli enerji kaynakları yüksek sıcaklık reaktörleri (HTR) ve nükleer füzyon reaktörleridir. Açığa çıkan enerji, farklı hidrojen üretim prosesleri ile hidrojen üretimine katkı sağlayacaktır. Füzyon reaksiyonu, iki çekirdeğin bir araya getirildiği ve daha sonra tek bir çekirdek oluşturulduğu bir süreçtir. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için iki çekirdek arasındaki elektromanyetik itmeden kaynaklı Coulomb bariyerini aşmak gerekmektedir [4].

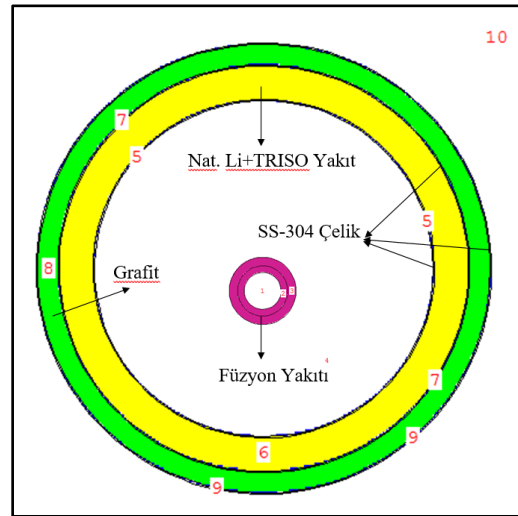
Nükleer enerjiden hidrojen üretimi için çok farklı hidrojen üretim prosesleri bulunmaktadır. En sık

kullanılanlardan bazıları, Buhar-Metan Reformu (SMR), Termokimyasal Su Ayrıştırma ve Yüksek Sıcaklık Elektrolizi (HTE) yöntemleridir. Belirtilen bu yöntemler çok yüksek sıcaklıklarda ısıya ihtiyaç duyduğu için nükleer enerjiden hidrojen üretimine oldukça uygun olduğu literatürde belirtilmiştir [5-11].

Bu çalışmada, LIFE füzyon reaktöründe minör nükleer atıkların yakılması sonucu açığa çıkan zamana bağlı enerji değişimi yardımıyla HTE yöntemi kullanılarak hidrojen üretimi incelenmiştir.

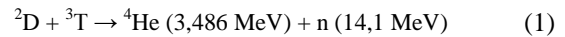
## 2. LIFE FÜZYON REAKTÖRÜ (LIFE FUSION REACTOR)

LIFE füzyon reaktörü tasarımı Lawrence Livermore National Laboratuvarı tarafından tasarlanmıştır. Bu tasarımda lazer sürücülü bir füzyon reaktörü göz önüne alınmıştır [12-15]. Bu tasarım daha sonra Şekil 1'de görüldüğü gibi nükleer atıkların yanma performansını arttırmaya yönelik modifiye edilmiş tasarım geliştirilmiştir [16-17].



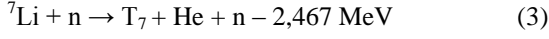
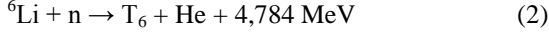
Şekil 1. Hidrojen üretimde kullanılan modifiye edilmiş LIFE füzyon reaktörü geometrisi (*Modified LIFE fusion reactor geometry used in hydrogen production*)

Birinci bölge, reaktörün merkezidir ve (D,T) füzyon nötron kaynağını içermektedir ve yüksek enerjili nötron üreten bir plazmadır. Bu üretim aşağıda verilen denkleme göre gerçekleşir;



İkinci bölge, füzyon nötron kaynağının etrafı SS-304 çeliği ile çevreleyen bir yapıdır. Modifiye edilmiş reaktörün içeriği sırasıyla yakıt bölgesi, SS-304, grafit ve SS-304 çelik zırh malzemeden

oluşturmuştur. Yakıt bölgesindeki reaktörün çalışması için gerekli trityum üretimi düşük enerjili nötronlar  ${}^6\text{Li}$  ve yüksek enerji nötronlar  ${}^7\text{Li}$  reaksiyonları ile elde edilmektedir [18-19].



Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan kullanılmış yakıtın bileşimi (*Composition of used fuel used in calculations*)

İzotop	<sup>b</sup> Minör aktinitler (birim PWR başına kg kütle / yıl)
Np-237	15,1
Pu-238	16,1
Pu-239	205
Pu-240	120
Pu-241	72,7
Pu-242	41,6
Am-241	6
Am-243	21,8
Cm-244	15,6
Cm-245	1,74

<sup>b</sup>Basınçlı su reaktörü, plütonyum geri kazanımlı yakıt, 1000-MWe reaktör, % 80 kapasite faktörü, 33 MWd / kg, % 32,5 termal verim.

Minör nükleer atık izotop değişimi Tablo 2’de verilmiştir. Yapılan nötronik hesaplamalarda nükleer kod olarak MCNP [20] kullanılmıştır. Hesaplamalarda zamana bağlı tritium üretim oranı ve enerji çoğaltım faktörü değerleri elde edilmiştir. Yakıt bölgesinde % 90 natural lityum soğutucu ve % 10 TRISO kaplamalı minor nükleer atıklar bulunmaktadır. Ayrıca elde edilen nötronik sonuçlara bağlı olarak yüksek sıcaklık elektroliz yöntemi kullanılarak hidrojen üretimi incelenmiştir.

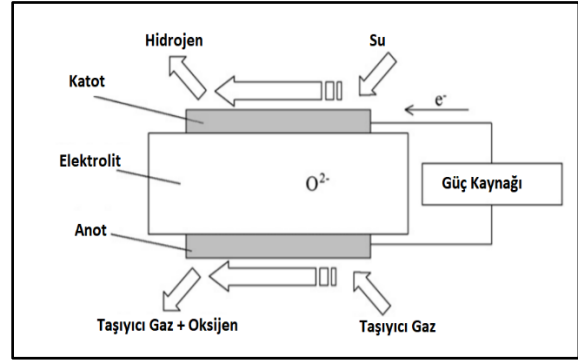
### 3. NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMİ (NUCLEAR HYDROGEN PRODUCTION METHOD)

#### 3.1. Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz Yöntemi (*High Temperature Electrolysis Method*)

Nükleer enerjiden hidrojen üretmek için kullanılan yöntemlerden birisi de HTE yöntemidir. Bu yöntemde karbonmonoksit salınımı

gerçekleşmediği için çevre dostudur ve bu sebepten ötürü ümit vaat eden bir yöntemdir.

Şekil 2’de yüksek sıcaklıkta elektroliz reaksiyonunun mekanizması gösterilmiştir (22). Bu mekanizma elektrolit, katot (hidrojen elektrodu) ve anotta (oksijen elektrodu) oluşan elektroliz hücresine sahiptir. Elektrodun bir tarafına katod bağlı iken diğer tarafına da anot bağlıdır. HTE reaksiyonunda, su elektroliz hücresine buhar olarak girmeden önce dış ısı ile ısıtılır. Elektroliz hücresinin katoduna buhar girer ve denklem 4’de gösterildiği gibi buhar hidrojen ve oksijen iyonuna ayrışır. Hidrojen, hidrojen ürünü olarak uzaklaştırılır ve oksijen iyonu, oksijen iyonu iletkenliğine sahip elektrolit ile anotta hareket ettirilir. Oksijen iyonu Denklem 5’de tarif edildiği gibi anotta oksijen ürünü olarak geri kazanılır [22]. Denklem 4 ve 5’de açıklanan HTE reaksiyonu denklem 6’da özetlenmiştir.



Şekil 2. HTE mekanizması (*Mechanism of HTE*)



HTE yönteminde buharın hidrojene ve oksijene ayrışması için termal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Bu iki enerjinin enerji girdi oranı denklem 7’de verilmiştir.

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (7)$$

Burada  $\Delta H$  entalpi değişimini,  $\Delta G$  Gibbs serbet enerji değişimini,  $\Delta S$  entropi değişimini ve  $T$  ise denklem 6’nın reaksiyon sıcaklığıdır. Elektroliz reaksiyonunda  $T\Delta S$  sağlanan termal enerji girdisi iken,  $\Delta G$  elektrik enerjisi girdisidir.  $\Delta G$  reaksiyon sıcaklığının artması ile azalırken,  $T\Delta S$  artar. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi daha düşük sıcaklıktaki

diğer elektroliz yöntemlerine göre daha az enerji girişine ihtiyaç duyar [22].

#### 4. HESAPLAMA YÖNTEMİ (CALCULATION METHOD)

Ele alınan reaktörün yüksek sıcaklık elektroliz (HTE) yöntemini kullanarak hidrojen üretim potansiyelini araştırmak için hesaplamalar iki adımda gerçekleştirilmiştir.

İlk adımda LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansı MCNP [20] nükleer kod yardımıyla hesaplanmıştır. ENDF-V nötron kütüphanesi kullanılmıştır. Nötronik hesaplamalarda TBR ve hidrojen üretim hesabında da kullanılacak olan M zamana bağlı olarak hesaplanmıştır.

İkinci adımda hidrojen üretim sisteminin güç akış diyagramı çıkartılarak, HTE yöntemi ile enerji çoğaltım faktörüne bağlı olarak nükleer enerjiden hidrojen üretimi için gereken toplam gücün ( $P_{h-tot}$ ) ve termal güç fraksiyonunun ( $1 - \psi$ ) zamana bağlı değişimi, üretilen hidrojen miktarı ve hidrojen üretim sisteminin verimi incelenmiştir.

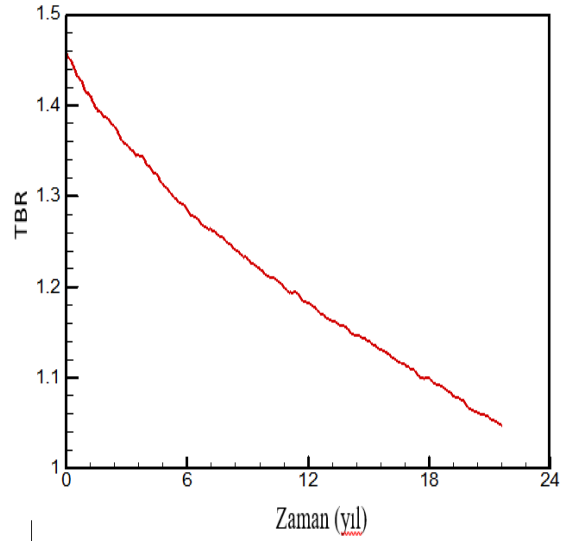
#### 5. SAYISAL SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

##### 5.1. Nötronik Analiz (Neutronic Analysis)

Bir füzyon reaktöründe, reaktörün çalışabilmesi için trityum üretim oranı (TBR)  $> 1.05$  olmak zorundadır [20-21]. Trityum üretimi denklem 2 ve 3'te verilen  ${}^6\text{Li}$  ve  ${}^7\text{Li}$  reaksiyonları sonucu gerçekleşir. 14,1 MeV nötron kaynağıyla trityum üretimi  $TBR = T_6 + T_7$  ile elde edilmektedir. Bu çalışmada %90 doğal lityum ve % 10 minor nükleer atıklar kullanılmıştır. Doğal lityum reaktörün çalışması için gerekli trityum üretimini sağlamaktadır.

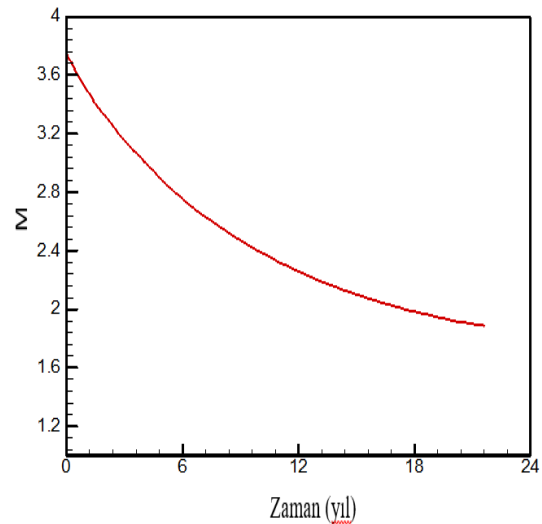
Şekil 3'de görüldüğü gibi, yapılan nötronik hesaplamalarda başlangıçta 1,46 trityum üretim oranı elde edilmiş ve zamana bağlı değişimle yaklaşık 21. yılın sonunda 1,05'e kadar bir azalış göstermiştir. Öte yandan füzyon reaktörleri için bir diğer önemli parametre enerji çoğaltım faktörüdür (M). M enerji çoğaltım faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır [23-24]:

$$M = \frac{200 * \langle \Phi * \Sigma_f \rangle + 4,7484 * T_6 - 2,467 * T_7}{14,1} + 1 \quad (8)$$



Şekil 3. Zamana bağlı trityum üretim değışimi (Time dependent tritium production change)

Denklem-8' de yer alan  $\langle \Phi * \Sigma_f \rangle$  parametresi toplam fisyon miktarını temsil etmektedir. Şekil 4'te zamana bağlı enerji çoğaltım faktörü değışimi verilmiştir. Başlangıçta M değeri 3,75 değeri ile başlamaktadır. M zamana bağlı bir azalma göstermiştir.  $TBR > 1,05$  reaktör çalışması için sınır değeri dikkate alındığında, M değeri 1,88'e kadar azalmıştır. Bu durum yakıt bölgesinde minör nükleer atıkların zaman bağlı olarak kütleli olarak tüketimine ve bunun sonucunda fisyon reaksiyonlarının azalmasına bağlıdır.



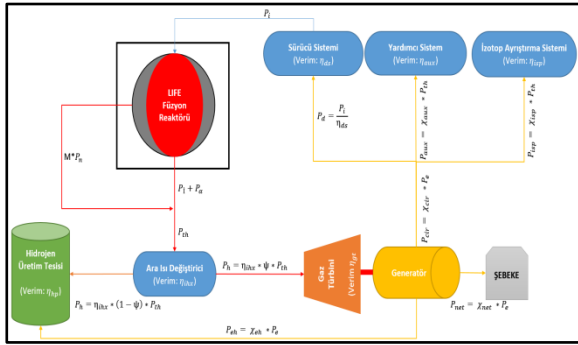
Şekil 4. Zamana bağlı enerji çoğaltım faktörü değışimi (Time-dependent energy multiplication factor change)

## 5.2. Hidrojen Üretimi (Hydrogen Production)

### 5.2.1. Sistemin güç akışı (Power flow of the system)

Şekil 5’da verilen güç akış diyagramından yararlanarak, hidrojen üretimi için gereken toplam gücü aşağıda verilen denklemden hesaplanmaktadır [25-27],

$$P_{h-tot} = (1 - \psi) * (1 + \lambda) * n_{ihx} * \frac{P_f}{Q} * [1 + (f_\alpha + f_n * M) * Q] \quad (9)$$



Şekil 5. Güç akış diyagramı (Power flow diagram)

Burada,  $(1-\psi)$  hidrojen üretim için gereken termal güç ( $P_h$ ) fraksiyonu olup,  $\psi$  ise brüt gücün ( $P_e$ ) elektriksel güç fraksiyonuna oranıdır ve denklem 10’da verilen formülden hesaplanmaktadır [25-27].

$$\psi = \frac{1}{n_{ihx} * n_{th} * n_{ds} * \epsilon_{ds} * [1 + (f_\alpha + f_n * M) * Q] * \left[1 + \frac{\lambda}{n_{th}}\right] + \frac{\lambda}{n_{th} * \left[1 + \frac{\lambda}{n_{th}}\right]}} \quad (10)$$

Denklem 9 ve denklem 10 da yer alan parametreler, açıklamaları ve bu çalışmada kullanılan değerler tablo 3’de verilmiştir.

Füzyon enerji kazancı, reaktör termal güç çıktısının [ $P_f$ ] füzyon güç girdisine [ $P_i$ ] oranıdır ve aşağıdaki denklemden hesaplanır [25-27].

$$Q = \frac{P_f}{P_i} \quad (11)$$

Ele alınan LİFE füzyon reaktöründe,  $P_f = 2000$  MW ve  $P_i = 500$  MW olarak alınmıştır [14]. Denklem 11’den reaktörün enerji kazancı  $Q = 4$  olarak elde edilmiştir.

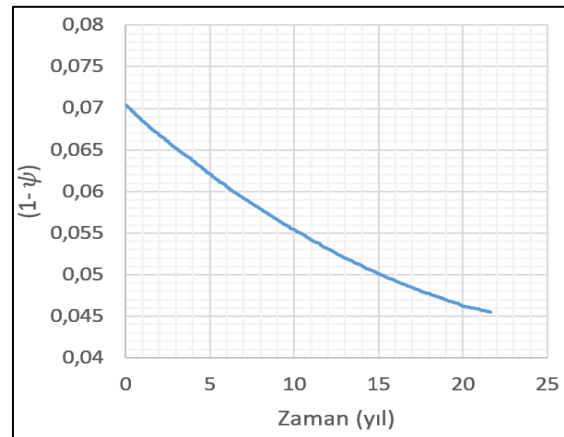
Şekil 6’ da denklem 10 kullanılarak elde edilen, hidrojen üretimi için gereken termal güç fraksiyonun  $(1 - \psi)$  zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil

6’da verilen grafik incelendiğinde HTE yöntemi ile hidrojen üretim prosesi için gereken termal güç fraksiyonunun enerji çoğaltma oranına bağlı olarak zamanla azaldığı görülmektedir. Başlangıçta 0,0704 olan termal güç fraksiyonu reaktör çalışma süresinin sonunda 0,045 değerine düşmüştür. Bu azalmanın sebebi enerji çoğaltma oranının zamanla azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu azalma, HTE prosesinin zamanla daha az termal güç kullanacağı ve hidrojen üretiminde azalmaya sebebiyet vereceği değerlendirilmektedir.

Tablo 3. Hidrojen üretimi için gereken toplam güç ve elektriksel güç fraksiyonunda kullanılan parametreler (Used parameters in total power required for hydrogen production and electrical power fraction)

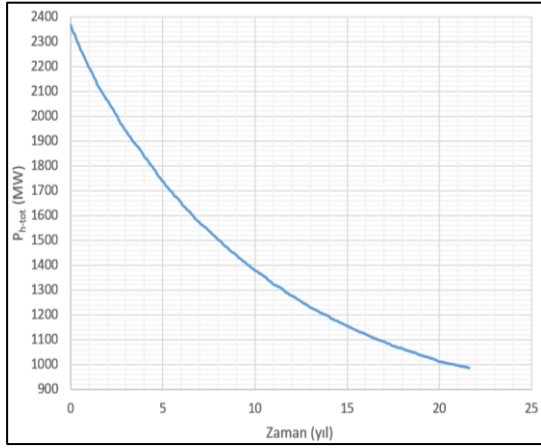
Parametre	Açıklama	Kullanılan Değerler
$n_{ihx}$	Ara ısı değiştirici verimi	0,80
$n_{th}$	Gaz türbinin termal verimi	0,60
$n_{ds}$	Sürücü sistemin verimi	0,60
$\epsilon_{ds}$	Sürücü sistemin elektriksel güç fraksiyonu	0,60
$f_\alpha$	Alfa parçacıklarının enerji fraksiyonları	0,20
$f_n$	Nötron parçacıklarının enerji fraksiyonları	0,80
$M$	Enerji çoğaltım faktörüdür	(***)
$\lambda$	Termal enerji ile elektrik enerjisi arasındaki orantı sabiti	4 (*)
$Q$	Füzyon enerji kazancı	4 (**)

(\*) = 900 °C’lik bir HTE prosesi için  $\lambda$  yaklaşık olarak 4’tür. [22]  
(\*\*) = Denklem 12’den hesaplanır  
(\*\*\*) = Reaktörün zamana bağlı nötronik parametresidir ve MCNP programı ile hesaplanmıştır



Şekil 6. Termal güç fraksiyonunun  $(1 - \psi)$  zamana bağlı değişimi (Time-dependent variation of thermal power fraction  $(1 - \psi)$ )

Şekil 7’de ise hidrojen üretimi için gereken toplam gücün ( $P_{h-tot}$ ) zamana karşı değişimi verilmiştir. Hidrojen üretimi için gereken toplam gücün zamanla azaldığı görülmektedir. Başlangıçta 2364,95 MW olan toplam gücün reaktör çalışma süresinin sonunda 986,86 MW değerine düşmüştür. Bu nedeni  $P_{h-tot}$  ile M arasında doğrusal bir oran olmasıdır. M oranının zamanla azalması hidrojen üretimi için gereken toplam gücün azalmasına sebep olmaktadır. Bu azalma ayrıca sistemin hidrojen üretim potansiyelini de etkileyeceği aşikardır.



Şekil 7. Hidrojen üretimi için gereken toplam gücün zamana bağlı değişimi (*Time dependent variation of total power required for hydrogen production*)

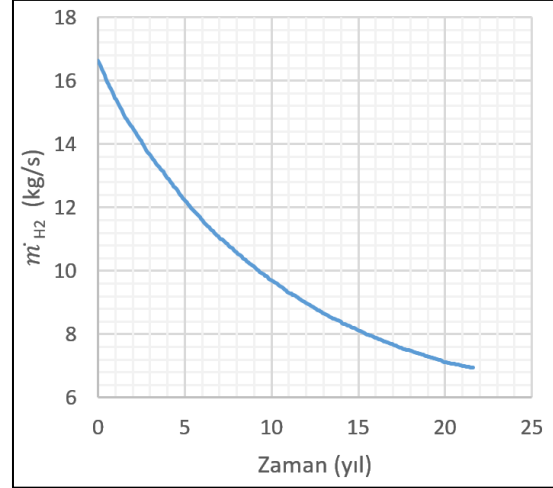
### 5.2.2. Hidrojen üretimi (*Hydrogen production*)

HTE prosesi sonucunda üretilen hidrojenin miktarı denklem 12’den hesaplanır. Denklem 12’de yer alan  $HHV_{H_2}$  parametresi hidrojen üretim tesisinin yüksek ısıtma değeridir ve değeri 284,36 kJ/mol (142,18 MJ/kg)’dür [28].

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{P_{h-tot}}{HHV_{H_2}} \quad (12)$$

Şekil 8’de modifiye edilmiş LIFE füzyon reaktöründe HTE yöntemi ile üretilen hidrojen miktarının zamana bağlı değişimi verilmiştir.

Şekil 8’de verilen grafik incelendiğinde saniyede üretilen hidrojen miktarının reaktör ömrü boyunca azaldığı görülmektedir. Sistem başlangıçta saniyede 16,63 kg hidrojen üretme yeteneğine sahip iken reaktör ömrünün sonunda saniyede 6,94 kg hidrojen üretme potansiyeline sahiptir. Bu dramatik düşüşün asıl sebebi  $P_{h-tot}$  değerinin zamanla azalmasıdır. HTE prosesi için gereken toplam güç zamanla azaldığından dolayı, prosesin hidrojen üretim kapasitesi de doğrusal olarak düşüş göstermektedir.



Şekil 8. Sistemde üretilen hidrojen miktarının zamana bağlı değişimi (*Time dependent change in the amount of hydrogen produced*)

## 6. SONUÇLAR (*RESULTS*)

Bu çalışmada, LIFE füzyon reaktöründe HTE yöntemi kullanılarak zamana bağlı nötronik performans ve hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Nötronik analizde başlangıç TBR ve M değerleri sırasıyla, 1,46 ve 3,75 olarak elde edilmiştir. Enerji çoğaltım faktörü yardımı ile yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemiyle (HTE) hidrojen üretimi için gerekli toplam güç hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklıklı elektroliz yöntemi kullanılarak LIFE füzyon reaktöründeki hidrojen üretimini (HTE) zamana bağlı olarak incelenmiştir. HTE prosesinin gerçekleşmesi için gereken toplam güç ( $P_{h-tot}$ ) ve hidrojen üretim miktarı kütsel olarak hesaplanmıştır. LIFE füzyon reaktörünün çalışma başlangıcında  $\dot{m}_{H_2}=16,63$  kg/s hidrojen üretilirken, reaktör çalışma sonu TBR>1.05 referans değer için  $\dot{m}_{H_2}= 6,94$  kg/s hidrojen elde edilmiştir. Sonuç olarak, LIFE füzyon reaktörünün HTE yöntemi ile hidrojen üretimine uygun olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR (*REFERENCES*)

- [1] A. Barın, “Dünyada Ve Türkiyede Hidrojen Enerjisi Önemi Ve Uygulamaları,” *Transist 2011, Ulusal Toplu Ulaşım Sempozyumu ve Sergisi, Aralık 01-02, 2011*, İstanbul.
- [2] Europea C., *Hydrogen Energy and fuel cells: a vision of our future*. High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells, 2003.
- [3] Corbo P., Migliardini F., Veneri, O., *Hydrogen fuel cells for road vehicles*. Springer Science and Business Media, 2011.

- [4] Axel M., *Nuclear and Particle Physics: Chapter 2 Nuclear Physics*. KFU Graz University, 2016.
- [5] L. Brown, et al., *High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power*. General Atomics (US), 2003.
- [6] A. Z. Ozbilen, "Development, analysis and life cycle assessment of integrated systems for hydrogen production based on the copper-chlorine (Cu-Cl) cycle," Ph.D. dissertation, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Ontario, Canada, 2013.
- [7] Y. Chikazawa, M. Konomura, S. Uchida and H. Sato, "A feasibility study of a steam methane reforming hydrogen production plant with a sodium-cooled fast reactor" *Nuclear technology*, vol. 152(3), pp. 266-272, December 2005. Doi: 10.13182/NT05-A3675.
- [8] C. W. Forsberg, "Hydrogen production using the advanced high-temperature reactor," *14th Annual U.S. Hydrogen Meeting, March 4-6, 2003*, Washington, D.C.
- [9] B. Yildiz and M. S. Kazimi, *Nuclear energy options for hydrogen and hydrogen-based liquid fuels production*. Massachusetts Institute of Technology. Center for Advanced Nuclear Energy Systems. Nuclear Energy and Sustainability Program, 2003.
- [10] G. Cerri, C. Salvani, C. Corgnale, A. Giovannelli, D. D. L. Manzano, A. O. Martinez and C. Mansilla, "Sulfur-Iodine plant for large scale hydrogen production by nuclear power" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35 (9), pp. 4002-4014, May 2010.
- [11] A. E. Lutz, R. W. Bradshaw, J. O. Keller and D. E. Witmer, "Thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28(2), pp.159-167, February 2003.
- [12] K. J. Kramer, W. R. Meier, J. F. Latkowski and R. P. Abbott, "Parameter study of the LIFE engine nuclear design" *Energy Conversion and Management*, vol. 51(9), pp.1744-1750, September 2010.
- [13] J. C. Farmer, E. Moses, and T. Diaz de la Rubia, *The Complete Burning of Weapons Grade Plutonium and Highly Enriched Uranium with (Laser Inertial Fusion-Fission Energy) LIFE Engine*. Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), 2008.
- [14] R. W. Moir, H. F. Shaw, A. Caro, L. Kaufman, J. F. Latkowski, J. Powers and P. E. A. Turchi, "Molten Salt Fuel Version of Laser Inertial fusion fission energy (LIFE)," *Fusion Science and Technology*, vol. 56(2), pp. 632-640, August 2009. Doi: 10.13182/FST18-8166.
- [15] K. J. Kramer, J. F. Latkowski, R. P. Abbott, J. K. Boyd, J. J. Powers and J. E. Seifried, "Neutron transport and nuclear burnup analysis for the laser inertial confinement fusion-fission energy (LIFE) engine", *Fusion Science and Technology*, vol. 56(2), pp. 634-641. 2009. Doi: 10.13182/FST18-8132
- [16] A. Acir, "Neutronic Analysis of the Laser Inertial Confinement Fusion-Fission Energy (LIFE) Engine Using Various Thorium Molten Salts," *Journal of Fusion Energy*, vol.32(6), pp. 634-641. December 2013. Doi:10.1007/s10894-013-9628-7
- [17] A. Acir and E. Baysal "Monte Carlo calculations of the incineration of plutonium and minor actinides of laser fusion inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine", *Plasma Science and Technology*, vol.20(7), 075601. May 2018. Doi: 10.1088/2058-6272/aab3c4
- [18] H. Taşkolcu and A. Acir, "Bir Hibrit Reaktörde Triso Kaplamalı Candu Nükleer Yakıt Atıklarının Nötronik Analizi", *Politeknik Dergisi*, cilt 16(4), s.129-133. 2013.
- [19] A. Acir, "ThO<sub>2</sub> Yakıtlı Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Reflektör Malzemelerin Nötronik Performansa Etkisi", *Politeknik Dergisi*, cilt 10(3), s.263-270. 2007.
- [20] J. F. Briesmeister, "MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code", Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2.
- [21] M. Benedict, T. H. Pigford and H. W. Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, McGraw-Hill series in nuclear engineering, p. 370, Table 8.5
- [22] S. Fujiwara, S. Kasai, H. Yamauchi, K. Yamada, S. Makino, K. Matsunaga and E. Hoashi, "Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor", *Progress in Nuclear Energy*, vol.50(2-6), pp.422-426. March-August 2008.

- [23] S. Şahin, M. J. Khan and R. Ahmed, "Fissile fuel breeding and minor actinide transmutation in the life engine", *Fusion Engineering and Design*, vol.86(2-3), pp.227-237. March 2011
- [24] S. Şahin, H. M. Şahin and A. Acır, "LIFE hybrid reactor as reactor grade plutonium burner", *Energy conversion and management*, vol.63, pp.44-50. November 2012
- [25] G. Özişik, N. Demir, M. Übeyli and H. Yapıcı, "Hydrogen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder", *International journal of hydrogen energy*, vol.35(14), pp.7357-7368. July 2010.
- [26] G. Genç, "Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted fueled minor actinide fluoride", *International journal of hydrogen energy*, vol.35(19), pp.10190-10201. October 2010.
- [27] N. Demir, "Hydrogen production via steam-methane reforming in a SOMBRERO fusion breeder with ceramic fuel particles", *International journal of hydrogen energy*, vol.38(2), pp.853-860. January 2013
- [28] M. Wang, *The greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation (GREET) model: Version 1.5*, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. August 1999.

## **ÖZGEÇMİŞ**

### **Adem ACIR**

Adem ACIR Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği öğretim üyesidir. Profesör olarak görevine devam etmektedir. Uzmanlık alanları nükleer enerji, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve termodinamik'dir.

### **Samet AKTI**

Samet Aktı 1985 yılında Çorum'da doğmuştur. Lise eğitimini Çankırı Süleyman Demirel Fen Lisesi'nde tamamladıktan sonra Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Sırasıyla Park Termik A.Ş. Çayırhan Termik Santralinde Türbin Bakım Mühendisi, TURKSAT A.Ş.'de Uydu Kontrolör'ü olarak görev aldıktan sonra mesleki hayatına TUSAŞ'da Uydu Platform Mühendisi olarak devam etmektedir. Aynı zamanda Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans eğitime de devam etmektedir.