

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MONTE CARLO TEKNİĞİ KULLANILARAK BİR FÜZYON-FİSYON
HİBRİT REAKTÖRÜNDE TASARLANAN BLANKET OPTİMİZASYONU
İÇİN ÜÇ BOYUTLU NÖTRONİK HESAPLAMALAR

HIZIR KASAP

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

MALATYA
TEMMUZ – 2014

Tezin Başlığı : Monte Carlo Tekniği Kullanılarak Bir Füzyon-Fisyon Hibrit Reaktöründe Tasarlanan Blanket Optimizasyonu İçin Üç Boyutlu Nötronik Hesaplamalar

Tezi Hazırlayan : **Hızır KASAP**

Sınav Tarihi : **11/07/2014**

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerdendirilerek Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri;

Tez Danışmanı: **Yrd.Doç. Dr. Mehtap GÜNAY**
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ADIGÜZEL
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin GENCER
İnönü Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı:

.....

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Monte Carlo Tekniğı Kullanılarak Bir Füzyon-Fisyon Hibrit Reaktöründe Tasarlanan Blanket Optimizasyonu için üç boyutlu nötronik hesaplamalar**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, Bunu onurumla doğrularım.

Hızır KASAP

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MONTE CARLO TEKNİĞİ KULLANILARAK BİR FÜZYON-FİSYON HİBRİT REAKTÖRÜNDE TASARLANAN BLANKET OPTİMİZASYONU İÇİN ÜÇ BOYUTLU NÖTRONİK HESAPLAMALAR

Hızır KASAP

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

86+ x sayfa

2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehtap GÜNAY

Bu çalışmada, APEX füzyon teknolojisinden yararlanılarak bir APEX hibrit reaktörü tasarlanmıştır. Tasarlanan APEX hibrit reaktöründe Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanılmıştır. Reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %100 Flibe (Li_2BeF_4), %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Flibe'deki Li'un izotoplarından ^6Li 'nin oranları %15-20 arasında değiştirilmiştir. Reaktörün ilk sıvı duvardaki nötron duvar yükü 10 MW/m^2 , ikinci sıvı duvar kalınlığı 50 cm ve füzyon gücünün 4 GW değeri için tasarım yapılmıştır. Reaktörün üç boyutlu tasarımında ve ilgili bölgelerdeki nötronik hesaplamalarda MCNPX-2.7.0 Monte Carlo kodu ve ENDF/B-VII.0, JENDL-4.0 nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphaneleri kullanılmıştır.

Reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgeleri için trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltma faktörü (M), ısı enerjisi, fisyon reaksiyon sayısı ve bir yıldaki fisil yakıt üretimi hesaplandı. Reaktörün yapısal malzemesi olan çelik bölgesinde 30 tam güç yılında (FPY) radyasyon hasar parametreleri olan proton üretimi, döteryum üretimi, trityum üretimi, ^3He üretimi ve He üretimi hesaplandı.

Kullanılan her iki kütüphane için nötronik hesaplamaların birbirlerine yakın değerler aldığı gözlemlendi. Kullanılan her iki kütüphane için $\text{TBR} > 1,1$ ve $M > 1,2$ şartlarının sağlandığı, ^6Li oranı arttıkça TBR'nin azaldığı, ayrıca M ve ısı enerjisinin arttığı tespit edildi. Reaktörde (n, γ) reaksiyonunun fisil yakıt üretimi üzerinde etkili olduğu, ^{238}U ve ^{232}Th fertil malzemesinden ^{239}Pu ve ^{233}U fisil yakıtının üretildiği belirlendi. Yapısal malzemede nötronların (n,p), (n,d), (n,t), (n, ^3He), (n,He) reaksiyonları yaptığı ve radyasyon hasarına neden olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: APEX, Sıvı Duvar, Hibrit Reaktör, Tesir Kesiti, MCNPX- 2.7.0

ABSTRACT

Master Thesis

THREE-DIMENSIONAL NEUTRONIC CALCULATIONS FOR THE DESIGNED BLANKET OPTIMIZATION IN A FUSION-FISSION HYBRID REACTOR BY USING MONTE CARLO METHOD

Hızır KASAP

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

86+ x pages

2014

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Mehtap GÜNAY

In this study, an APEX hybrid reactor was designed by using APEX fusion technology. Ferritic Steel and Vanadium (V-4Cr-4Ti) alloys were used two different structural materials in the designed APEX hybrid reactor. %100 Flibe (Li_2BeF_4), %10 UF_4 and %10 ThF_4 heavy metals with 90% of Flibe (Li_2BeF_4) salt solution mixtures were used in the liquid first wall, the liquid second wall and shield zones of the reactor. In this study, the ratio of ^6Li to Lithium used in the Flibe was varied between 15% and 20%. The design was made by taking the neutron wall load on the liquid first wall of the reactor as 10 MW/m^2 , the thickness of the liquid second wall as 50 cm and fusion power as 4 GW. In three-dimensional design of the reactor and in the neutronic calculations of the relevant regions were utilized MCNPX-2.7.0 Monte Carlo Code and ENDF/B-VII.0, JENDL-4.0 libraries of nuclear reaction cross section.

Tritium breeding rate (TBR), energy multiplication factor (M), heating, number of fusion reactions and fissile fuel production in a year were calculated for the liquid first wall, the liquid second wall and shield zones of reactor. The values of the radiation damage parameters of proton production, deuterium production, tritium production, ^3He production and He production were calculated for 30 full power years (FPY) in the reactor's structural material which steel zone.

Neutronic calculations for both libraries used were observed to yield to similar values. For both libraries used, $\text{TBR} > 1.1$ and $M > 1.2$ conditions were achieved, as the level of ^6Li increases TBR decreased, also M and heating were determined to increase. In the reactor of (n, γ) reaction was effective on fissile fuel production, ^{239}Pu and ^{233}U fissile fuel were determined to be produced from ^{238}U ve ^{232}Th fertile materials. In structural material of neutrons were detected to result in (n,p), (n,d), (n,t), (n, ^3He), (n,He) reactions and radiation damages.

KEYWORDS: APEX, Liquid Wall, Hybrid Reactor, Cross Sections,
MCNPX-2.7.0

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 2012 / 183 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiş olup bu projenin maddi olanakları kullanılmıştır.

Yüksek lisans eğitiminin ders aşamasından başlayarak tez çalışmasının bitimine kadar her aşamada bana rehberlik ve yardım eden, danışman hocam Sayın **Yrd. Doç. Dr. Mehtap GÜNAY**'a

Başta bölüm başkanımız **Sayın Prof. Dr. Ali BAYRİ** ve bölümdeki bütün hocalarıma, fizik bölümünden arkadaşım **Gökhan KIRAT**'a

Ayrıca tez çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen **AİLEM**'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SEMBOLLER.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. HİBRİT (Füzyon-Fisyon) REAKTÖRLERİ.....	6
2.1. Fisyon.....	6
2.1.1. Temel Fisyon Reaksiyonu.....	7
2.1.2. Fisyon Enerjisinin Hesaplanması.....	7
2.1.3. Fisyon Reaktörleri.....	8
2.2. Füzyon.....	10
2.2.1. Temel Füzyon Reaksiyonları.....	11
2.2.1.1. Döteryum-Döteryum (D-D) Reaksiyonları.....	12
2.2.1.2. Döteryum-Trityum (D-T) Reaksiyonları.....	12
2.2.2. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması.....	12
2.2.3. Füzyon Reaksiyonlarının Gerçekleşebilme Koşulları.....	13
2.2.4. Füzyon Yakıtları.....	15
2.2.5. Füzyon Reaktörlerde Manyetik Alan Sınırlandırması.....	16
2.2.6. Füzyon Enerjisinde Karşılaşılan Sorunlar.....	18
2.3. Hibrit (Füzyon-Fisyon).....	19
2.3.1 APEX Hibrit Reaktörü.....	22
2.3.2 APEX Reaktörünün Bileşenleri.....	27
2.3.2.1 Yakıt.....	27
2.3.2.2 Soğutucu.....	28
2.3.2.3 Yapısal Malzeme.....	30
3. BİLGİSAYAR KODLARI ve TESİR KESİTİ KÜTÜPHANELERİ..	32
3.1. Monte Carlo Yöntemi.....	32
3.1.1. MCNP (Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu).....	32
3.1.2. MCNPX-2.7.0 (Monte Carlo N- Particle Extending Code)	33
3.2. Tesir Kesiti Kütüphaneleri.....	35
3.2.1. ENDF/B-VII.0 Kütüphanesi.....	35
3.2.2. JENDL-4.0 Kütüphanesi.....	36

4.	HESAPLAMALAR.....	37
4.1.	Tritiyum Üretim Oranı (Tritium Breeding Rate=TBR).....	39
4.2.	Enerji Çoğaltma Faktörü (Energy Multiplication Factor = M).....	41
4.3.	Isı Enerjisi (Heating).....	43
4.4.	Radyasyon Hasarı.....	44
4.4.1	Proton Üretimi.....	45
4.4.2.	Döteryum Üretimi.....	46
4.4.3.	Tritiyum Üretimi.....	47
4.4.4.	He-3 Üretimi.....	47
4.4.5.	He Üretimi.....	48
4.5.	Fisyon Reaksiyon Sayısı.....	49
4.6.	Fisil Yakıt Üretimi.....	50
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
6.	KAYNAKLAR.....	80
	Özgeçmiş.....	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Enerji kaynaklarının sera gazı emisyonları.....	2
Şekil 1.2.	Enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretimi.....	3
Şekil 2.1.	Fisyon olayının şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.2.	Bir nükleer fisyon reaktörünün çalışma sistemi.....	9
Şekil 2.3.	Füzyon reaksiyonun şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.4.	Toroidal alan ve poloidal alan ile manyetik alan sınırlamalı Tokamak Metodu gösterimi	17
Şekil 2.5.	Bir füzyon reaktörün çalışma sistemi	18
Şekil 2.6.	Hibrit reaktör şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.7.	APEX hibrit reaktörünün şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.8.	Yerçekimi momentum tahrikiyle (GMD) sıvı duvar teşkili.....	25
Şekil 2.9.	Elektromanyetik olarak tutma (EMR) sıvı duvar kavramı gösterimi.....	26
Şekil 2.10.	Lityum için sıcaklık akış şeması.....	29
Şekil 2.11.	Flibe için sıcaklık akış şeması.....	30
Şekil 4.1.	Hesaplamalarda kullanılan APEX hibrit reaktörünün gösterimi....	68
Şekil 4.2.	Hesaplama da kullanılan APEX hibrit reaktörün bölge yarıçap ve kalınlıkları.....	68
Şekil 4.3.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama proton üretimine etkisi.....	69
Şekil 4.4.	JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama proton üretimine etkisi.....	69
Şekil 4.5.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama döteryum üretimine etkisi.....	70
Şekil 4.6.	JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama döteryum üretimine etkisi.....	70
Şekil 4.7.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama trityum üretimine etkisi.....	71
Şekil 4.8.	JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama trityum üretimine etkisi.....	71
Şekil 4.9.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^3He üretimine etkisi.....	72
Şekil 4.10.	JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışım lı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^3He üretimine etkisi.....	72

Şekil 4.11.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^4He üretimine etkisi.....	73
Şekil 4.12.	JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^4He üretimine etkisi.....	73
Şekil 4.13.	JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^4He üretimine etkisi.....	74
Şekil 4.14.	Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 ThF_4 karışımı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fisyon reaksiyon sayısı.....	74
Şekil 4.15.	Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 UF_4 karışımı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fisil yakıt üretimi değeri.....	75
Şekil 4.16.	Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 ThF_4 karışımı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fisil yakıt üretimi değeri.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Çeşitli yakıtların enerji içerikleri.....	4
Çizelge 2.1.	Radyoaktif elementler, atık yüzdeleri, yarı ömürleri ve etkin doz katsayı miktarları	10
Çizelge 4.1.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶ Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütle ve atomik yoğunlukları.....	53
Çizelge 4.2.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶ Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütle ve atomik yoğunlukları	54
Çizelge 4.3.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶ Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, V ₄ Cr ₄ Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütle ve atomik yoğunlukları	55
Çizelge 4.4.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶ Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, V ₄ Cr ₄ Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütle ve atomik yoğunlukları.....	56
Çizelge 4.5.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶ Li oranına göre %10 UF ₄ +% 90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütle ve yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	57
Çizelge 4.6.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶ Li oranına göre %10 UF ₄ + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütle ve yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	58
Çizelge 4.7.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶ Li oranına göre %10 UF ₄ + %90 Flibe akışkanı, V ₄ Cr ₄ Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütle ve yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	59
Çizelge 4.8.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶ Li oranına göre %10 UF ₄ + %90 Flibe akışkanı, V ₄ Cr ₄ Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütle ve yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	60
Çizelge 4.9.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶ Li oranına göre %10 ThF ₄ + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütle ve yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	61
Çizelge 4.10.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶ Li oranına göre %10 ThF ₄ + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütle ve yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	62

Çizelge 4.11.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ^6Li oranına göre %10 ThF_4 + %90 Flibe akışkanı, $\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$ yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	63
Çizelge 4.12.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ^6Li oranına göre %10 ThF_4 + %90 Flibe akışkanı, $\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$ yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	64
Çizelge 4.13.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritiyum Üretim Oranı) değeri.....	65
Çizelge 4.14.	JENDL-4.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritiyum Üretim Oranı) değeri.....	65
Çizelge 4.15.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.....	66
Çizelge 4.16.	JENDL- 4.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.....	66
Çizelge 4.17.	ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi (W/cm^3) değeri.....	67
Çizelge 4.18.	JENDL- 4.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi(W/cm^3) değeri.....	67

SEMBOLLER

kWs	Kilowattsaat
GWe	Gigawattelektrik
S _v	Doz eşdeğeri birimi
B _q	Aktiflik birimi
T	Trityum
D	Döteryum
Q	Fisyon reaksiyon enerjisi
I	Akım şiddeti
B	Manyetik alan
TBR	Trityum üretim oranı
M	Enerji çoğaltma faktörü
°K	Kelvin
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu
FPY	Tam güç yıl

1. GİRİŞ

Ülkelerin kalkınma ve toplumların yaşam kalitesinin yükselmesi, büyüme ve gelişmenin sağlanması için vazgeçilmez unsur enerjidir. Kişi başına tüketilen enerji ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösterir. Dünyadaki hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojinin yaygın olarak kullanılması, istek ve ihtiyaçların artması enerjiye olan gereksinimi arttırmaktadır. Buna bağlı olarak dünyadaki artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerji kaynaklarının kullanım miktarı artmaktadır.

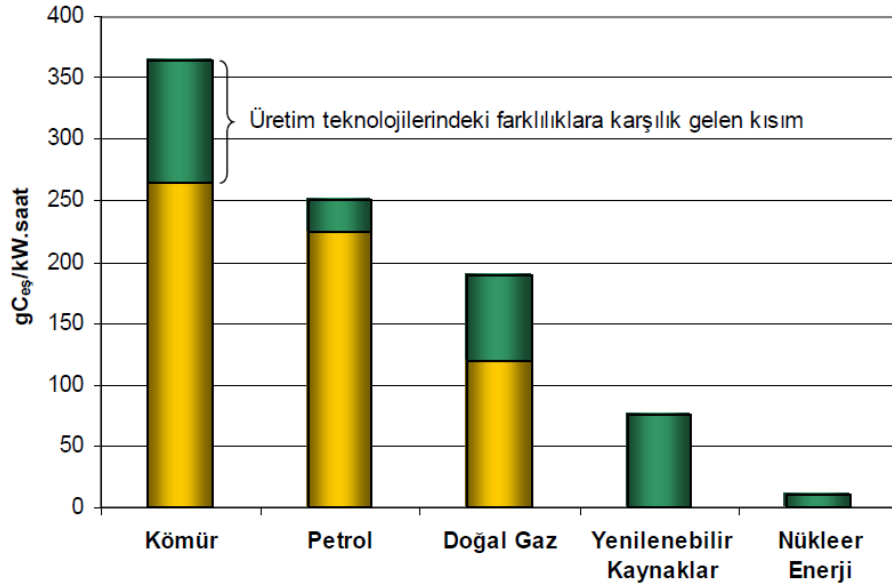
Enerji kaynakları temel olarak ikiye ayrılır. Bunlardan birincisi yenilenemez enerji kaynakları, ikincisi yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenemez enerji kaynakları oluşumundan çok daha kısa sürede tüketilen, yeri doldurulamayan petrol, kömür, doğalgaz gibi kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise tüketildikçe yeri doldurulabilen güneş, rüzgâr, akarsu, biokütle, jeotermal gibi kaynaklardır.

Enerji üretiminde en çok yenilenemez enerji kaynakları olan fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak fosil yakıtlar çevreye ve atmosfere zarar vermektedir. Atmosfere salınan karbondioksit (CO_2)'in sera etkisi “küresel ısınma” problemine, sülfüroksit (SO_2) ve azotoksit (NO_2) gazları ise “asit yağmurları” problemine neden olmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtların tüketimine sınırlamalar getirilmektedir [1]. Bununla birlikte en önemli enerji kaynağı olan fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. Dünya petrol rezervinin 2050, doğalgazın 2070 ve kömür rezervinin 2150 yılında tükenmesi beklenmektedir [2].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan barajlardan elde edilen hidroelektrik enerjisinin kısıtlı olması ve kurulan bölgelerde doğal dengeyi (habitat) olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında alternatif enerji kaynakları olarak güneş, rüzgâr, jeotermal gibi enerji kaynaklarından üretilen enerjinin az miktarda ve sürekli olmaması nükleer enerji ve alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasını öne çıkarmaktadır.

Günümüzde elektrik enerjisinin dönüşüm ve kullanımı kolay olması nedeniyle enerji çeşitleri içinde önemli yeri vardır. Elektrik ihtiyacı tüm enerji ihtiyaçlarından daha hızlı artmaktadır. Tüm dünya enerji ihtiyacının 2002'den 2030'a kadar %60 oranında artması beklenirken elektrik enerjisi ihtiyacının %100 oranında artması beklenmektedir. Dünya elektrik enerjisi ihtiyacı 2002'de 16 milyar kWh ile karşılanmıştır. Elektrik enerjisi ihtiyacının 2030'da yaklaşık 31.600 milyar kWh

olacağı beklenmektedir [3]. Artan bu enerji ihtiyacının alternatif temiz enerji kaynağı olan nükleer reaktörlerden karşılanacağı görülmektedir.

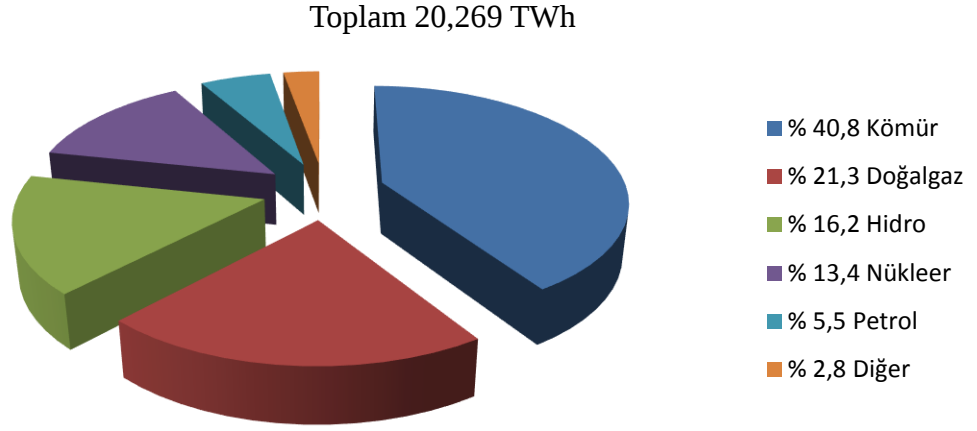


Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının sera gazı emisyonları

Dünyada enerji temininde ve elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılık sonucu olarak dünyada iklim değişimlerine neden olan sera gazları üretilmektedir. Dünya ekonomisinin büyümesinin, karbon emisyonuna bağlı gelişmesinin önüne geçilmelidir (Şekil 1.1) [4]. Bununla birlikte belirli sayıda üreticiye bağlı olan petrol ve doğal gaza bağımlılığın artması ve 21. Yüz yılın ilk yarısında rezervlerin azalması ile enerji üretimindeki maliyetin artacak olması ulusal enerji politikalarında enerji ihtiyacının güvenliği konusunda endişelere neden olmaktadır. Nükleer enerjide karbon emisyonunun olmaması ve nükleer yakıt kaynaklarının dünyada dengeli bir şekilde elde edilebilir olması enerji politikalarının nükleer enerji üzerine yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Nükleer santraller teknolojik olarak olgunlaşmış ve sürekli bir şekilde kullanımı artmaktadır. Dünyada pek çok ülkede elektrik enerjisi üretiminde nükleer enerji kullanılmaktadır. Dünya elektrik üretimi 2010 yılı itibariyle 20,269 TWh kapasiteye sahiptir. Üretilen elektrik enerjisinin %40,8'i kömür, %21,3'ü doğalgaz, %16,2'si hidro, %13,4'ü nükleer, %5,5'i petrol, %2,8'i diğer kaynaklar kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 1.2).

Nükleer reaktörler, içerisinde fisyon veya füzyon gibi nükleer reaksiyonların meydana geldiği ve nükleer reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan enerjiyi ısı enerjisine

dönüştüren sistemlere denir. Üretilen ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklere ise nükleer santral denir.



Şekil 1.2. Enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretimi

Nükleer enerjinin askeri amaçlı ortaya çıkış, silah yapımında kullanılabilir teknolojiye sahip olması, nükleer atıkların uzun süreli etkileri, geçmişte yaşanmış nükleer kazalar nedeniyle nükleer güç karşıtlarının oluşmasına neden olmuş fakat nükleer güç üretimi artarak devam etmiştir. Mayıs 2014 yılı itibariyle, 373 GWe kurulu üretim kapasiteli ve dünyadaki birincil enerjinin % 6 ve elektriğinde yaklaşık %14'ünü sağlayan toplam 30 ülkede kurulu olan 437 adet çalışan ticari reaktör vardır. Dünyada toplam 65 GWe kapasiteye sahip toplam 14 ülkede 68 nükleer santral inşaat aşamasındadır [5,6].

Dünyada pek çok ülkede elektrik enerjisi üretiminde nükleer enerjinin belirgin bir katkısı bulunmaktadır. 2012 yılı itibariyle elektrik enerjisinin Fransa 58 adet reaktörle %74,8'ini, Belçika 7 adet reaktörle %54'ünü, ABD'de 102 reaktörle %19'unu, İngiltere 16 reaktörle %18,1'ini ve Rusya 33 reaktörle %17,8'sini nükleer santrallerden sağlanmaktadır [5,6].

Nükleer enerji üretiminde, fosil yakıtlı santraller gibi CO₂ salınımı olmadığı için hava kirliliğine neden olmamasının yanında diğer santral türlerine göre daha güvenli, sürekli ve yoğun (Çizelge 1.1) enerji üretimi yapabilmesi, daha düşük birim maliyetlerle çalışması, işletme maliyetlerinin düşük olması, ısı ve elektrik üretiminin aynı anda gerçekleşmesi, yakıt maliyetlerinin üretim maliyetleri içindeki payının %10-12 gibi küçük oranda olması, nükleer santrallerde taze yakıtın kolay depolanabilmesi uzun süre yakıt üreticilerine bağlı olmadan enerji üretiminin

gerçekleştirilebilmesi, yakıt üretim kaynaklarının gelişmiş ve siyasi istikrarın fazla olduğu ülkelerde olması, nükleer alanda yapılan bilimsel çalışmaların ve araştırmaların artarak devam etmesi avantajları arasında sayılabilir.

Çizelge 1.1. Çeşitli yakıtların enerji içerikleri

Yakıt	1 kilogramının yaklaşık elektrik enerjisi içeriği (kWs)
Odun	1
Kömür	2
Petrol	4
Uranyum	50.000
Plutonyum	6.000.000

Nükleer enerji üretimi dezavantajları ise; jeolojik olarak deprem açısından stabil alanlarda kurulması, radyasyon nedeniyle tamamen güvenli ve kontrollü üretimi gerektirmesi, kuruluş maliyetlerinin yüksek olması, kullanılan yakıtların uzun süre korunması ve saklanması gerektiği sayılabilir.

Dünyada enerji üretiminde kullanılan reaktörlerin tamamı fisyon reaksiyonu sistemine göre çalışmaktadır. Bunun dışında araştırma ve laboratuvar aşamasında olan füzyon ve hibrit (füzyon-fisyon) reaktör çalışmaları vardır.

Kullanılan bu günün fisyon reaktörleri doğal uranyumun çok az bir yüzdesini (%1-2) kullanmakta ve kalan kısmı atık olarak kalmaktadır. Bu nedenle doğal uranyumdan karşılanmakta olan bölünebilir yakıt ihtiyacının 21. yüzyılın ilk yarısının sonunda karşılanamaz duruma geleceği belirtilmektedir. Gelecekte nükleer yakıt hammaddesi temini konusunda problem yaşanmaması için bugünden yeni bir kaynak arayışına yönelmek artık bir zorunluluk olmuştur. Bu nedenle, bölünebilir yakıtın elde edildiği hızlı ve üretken reaktör sisteminin, bölünebilir yakıttan başka yeni bir nötron kaynağı ile çalıştırılması gündeme gelmektedir. Bu durum termonükleer reaktörlerde döteryum – döteryum (D-D), döteryum- trityum (D-T) ve diğer muhtemel birleşme reaksiyonlarından elde edilebilecek nötronlarla ya da fisyon reaktörlerinde ağır çekirdeklerin yüksek enerjili yüklü taneciklerle parçalanması sonucu açığa çıkan nötronlarla gerçekleştirilebilir. Reaktör yakıtının trityum ve döteryum olması füzyon

reaktörlerini cazip hale getirmektedir. Çünkü döteryum suda bol miktarda bulunmaktadır. Bir ton su yaklaşık 30 gram döteryum içermektedir. Bir litre suda var olan döteryumdan bir litre benzin enerjisine eş değer enerji alınabilmektedir. Ayrıca trityum yapay olarak kolayca elde edilebilmektedir. Bu durum füzyon enerjisinin tükenmez bir enerji kaynağı olacağını göstermektedir.

Nükleer reaktörlerde nükleer enerji, fisyon ya da füzyon yoluyla üretilmektedir. Her iki reaksiyon sonucu açığa çıkan yüksek derecedeki enerji çeşitli yollarla reaktörler içinden dışarı alınarak gerekli enerji haline dönüştürülmektedir.

Nükleer yakıt temini konusunda yenilikçi yaklaşım olarak birçok araştırmacı hibrit reaktör sistemini teklif etmektedir. Hibrit reaktör sistemi birleşme ve bölünme (füzyon-fisyon) reaksiyonlarının birlikte gerçekleştiği sistemlerdir. Hibrit reaktörlerdeki temel amaç; enerji üretimi füzyon reaksiyonunun gerçekleştiği plazma ile fisyon ve dönüşüm reaksiyonlarının gerçekleştiği duvardan (blanket) sağlamaktır. Burada %1'i kullanılan, tesir kesiti az olmasından dolayı %99'luk kısmı kullanılmayan uranyumun hibrit reaktör sayesinde kullanılması amaçlanmaktadır. Hibrit reaktörlerde %100 kullanılması ile uranyumun uzun yıllar daha nükleer yakıt olarak kullanılmasına olanak sağlayacaktır [7].

Buna göre, kaynak sorunun olmaması yüksek enerji sağlaması, füzyon ve fisyon reaksiyonlarını bir arada gerçekleştirerek nükleer enerji ve fisil yakıt üretimi sağlaması, gerek duyulan sürekli, temiz ve ucuz enerji kaynağı olması nedeniyle gelecekte hibrit reaktörler en önemli enerji kaynağı olacaktır.

2. HİBRİT (Füzyon-Fisyon) REAKTÖRLERİ

Fisyon, füzyon ve hibrit (Füzyon- Fisyon) olmak üzere üç alt bölümde incelenmiştir.

2.1. Fisyon

Nötronun 1932’de Sir James Chadwick tarafından keşfinden sonra II. Dünya Savaşı’ nın da etkisiyle nükleer bilim çok hızlı gelişti. 1939’da atomun bölünmesi (fisyon) ile enerjinin açığa çıktığı görüldü. 1943’de ilk kontrol edilebilen zincirleme reaksiyon, 1945’te ilk atom bombası ve 1951’de ABD’de nükleer enerji kullanılarak ilk elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirildi. Nükleer enerji yaklaşık 20 yıl da temel prensiplerden pratik uygulama aşamasına gelindi. Nükleer enerjiyi 1953’te İngiltere, 1954’te Rusya, 1956’da Fransa, 1961’de Almanya elektrik enerjisi üretiminde kullanmaya başladı. 1970’lerin başında nükleer enerjiden elektrik elde eden ülke sayısı 20’ye çıktı. 1970’lerde petrol krizinin başlaması nükleer güç santrallerine talebi arttırdı. 1979’da ABD’ de “Tree Mile Island” ve 1986’da Rusya’ daki “Chernobyl” kazalarının etkisi ile nükleer santrallerin güvenliği hakkında kamuoyunda ciddi endişeler oluştu. Bu faktörler nükleer santrallerin gelişmesinde yavaşlamaya sebep oldu. Bununla birlikte bazı ülkeler reaktör yapımına devam ettiler. Fakat nükleer enerji üretiminde sınırlı artışa neden oldu [4]. 11 Mart 2011’de Japonya da meydana gelen deprem sonrası “Fukuşima” kazası benzer tartışmaları tekrar gündeme getirmiştir.

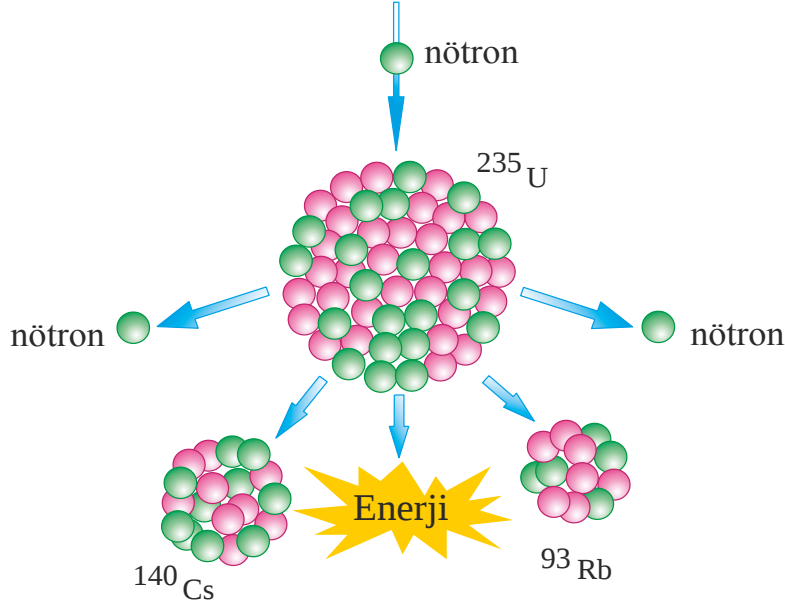
Fisyon, atom çekirdeğinin kendiliğinden doğal bozunma veya nötron ve foton gibi düşük enerjili bir parçacığı soğrulması sonucunda bölünmesi olayıdır. Ağır çekirdeklerdeki çekirdek kuvvetiyle Coulomb kuvvetinin yarışması sonucudur. Nötron veya foton gibi düşük enerjili bir parçacığın soğrulması sonucu engeli aşmak veya çok kolay olarak geçmeye yetecek kadar yüksek enerjili uyarılmış durumlar veya bileşik çekirdek durumları oluşturarak meydana gelebilir. Her ne kadar yeterli uyarılma enerjisi sağlandığında her çekirdek bölünebilirse de pratik olarak uygulamada yalnız ağır çekirdekler (toryum ve ötesi) için önemlidir. Nötron ile oluşan her bölünmede, iki ayrı fisyon ürününe ek olarak 2 veya 3 nötronun açığa çıkması ve bu nötronların yeni bölünmelere neden olması ve olayın kendiliğinden zincirleme devam etmesidir. Bu fisyon zincir reaksiyonu, bir fisyon bombasında olduğu gibi çok hızlı ve kontrolsüz veya bir fisyon reaktöründe olduğu gibi yavaş ve kontrollü olarak meydana gelebilir [8].

2.1.1. Temel Fisyon Reaksiyonu

Tipik bir nötron etkilemeli fisyon reaksiyonu Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



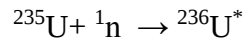
Bu reaksiyon sonucunda iki fisyon ürünü ile iki nötron elde edilmiştir.



Şekil 2.1. Fisyon olayının şematik gösterimi

2.1.2 Fisyon enerjisinin Hesaplanması

Fisyon reaksiyonunda, ^{235}U bir tane nötron yakaladığında $^{236}\text{U}^*$ uyarılmış duruma dönüşür.



Bu reaksiyonun uyarılma enerjisi;

$$E_{uy} = [m(^{236}\text{U}^*) - m(^{235}\text{U})] c^2$$

Nötron enerjisinin termal bölgede çok küçük olduğu kabul edilirse,

$$\begin{aligned} m(^{236}\text{U}^*) &= m(^{235}\text{U}) + m_n \\ &= 235,043924 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} \end{aligned}$$

$$=236,052589 \text{ u}$$

$$E_{uy} = (236,052589 \text{ u} - 236,045563 \text{ u}) \times 931,502 \text{ MeV / u}$$

$$=6,5 \text{ MeV}$$

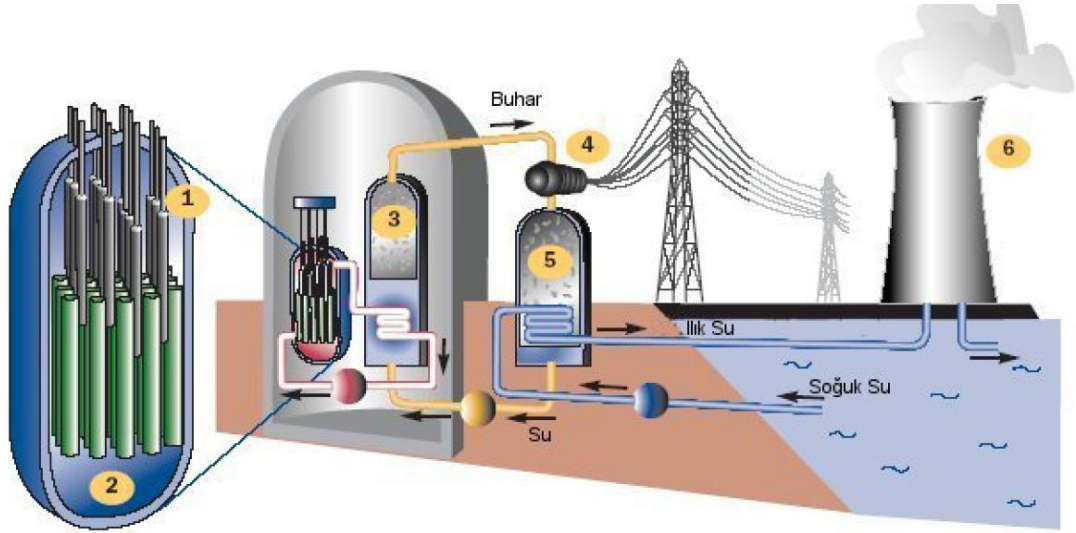
Fisyon engelini aşmak için gerekli enerji (aktivasyon enerjisi) ^{236}U için 6,2 MeV olarak hesaplanmıştır. Buna göre ^{236}U 'yı fisyon oluşturabilecek bir duruma yükseltmek için gerekli aktivasyon enerjisi ^{235}U 'e bir n ekleyerek sağlanan enerji ile aşılr. Bu termal bölgede gözlenen büyük tesir kesiti ile uyumlu olarak ^{235}U 'un sıfır enerjili nötronlarla fisyonla uğrayabileceği anlamına gelir [9,10].

2.1.3. Fisyon Reaktörleri

Dünyada bulunan tüm kurulu nükleer santraller fisyon reaksiyonu ile çalışrlar. Temel olarak tüm nükleer santraller elde edilen ısı enerjisini bir soğutucu yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürler. Soğutucu olarak su veya helyum ve karbondioksit gibi gazlar ya da sodyum gibi metaller kullanılarak yapılan santral çalışmaları vardır. Ayrıca hidrojenin yerine hidrojenin bir izotopu olan döteryum atomları içeren ağır su adı verilen soğutucuda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Soğutucuya aktarılan ısı ile ya soğutucunun doğrudan buharlaşması sağlanır veya buhar üretici ile ısı aktarımı yapılarak ayrı bir çevirimde dönen suyun buharlaşması sağlanır. Üretilen buhar türbini çevirir ve türbine bağlı jeneratörün dönmesi ile elektrik enerjisi üretilir (Şekil 2.2) [4].

Günümüzde kullanılan nükleer fisyon reaktörlerinden yüksek enerji sağlaması ve CO_2 gazı yayınlamaması gibi avantajlarına rağmen, reaktör içerisinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda oluşan kararsız, uzun yarı ömürlü radyoaktif atıklar ve bu atıkların taşınması, depolanması nükleer fisyon reaktörlerinin dezavantajlarını oluşturmaktadır. Bunun yanında mevcut fisyon reaktörlerinin yakıtı olarak kullanılan uranyumun %1 gibi az miktarını kullanarak geri kalan %99' luk kısmı kullanılmayan “yüksek seviyeli atık” adı verilen uranyum ötesi (^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{245}Cm) elementler ile uzun ömürlü radyoaktif ürünler (^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{129}I , ^{135}Cs) oluşmaktadır [11].



1. Reaktör: Yakıt (yeşil) basınçlı suyu ısıtır. Kontrol çubukları (gri) fisyon reaksiyonunu kontrol etmek veya sona erdirmek için nötronları tutar.
2. Soğutucu ve yavaşlatıcı: Soğutucu ve yavaşlatıcı olarak çalışmak üzere kontrol çubukları su ile çevrelenmiştir.
3. Buhar üretici: Reaktörde oluşan sıcak su yüksek basınçlı buhar üretmek için buhar üreticine pompalanır.
4. Türbin jeneratörü: Buhar elektrik üretmek üzere elektrik jeneratörüne yönlendirilir.
5. Kondansatör: Buharı suya dönüştürmek için ısıyı soğurur.
6. Soğutma kulesi: Dönen soğutma suyundaki ısıyı yakın çevre ısısına dönüştür.

Şekil 2.2. Bir nükleer fisyon reaktörünün çalışma sistemi

Fisyon reaktörlerinde 2012 yılı itibariyle elde edilen 372,643 MW enerji için yaklaşık 23 ton/MW radyoaktif atık meydana gelmektedir. Bu radyoaktif atıkların yaklaşık %94,6'sı uranyum, %4,2'si fisyon ürünleri, %1,2'sini de uranyum ötesi elementler oluşturmaktadır. Fisyon reaksiyonu sonucunda oluşan yüksek seviyeli atıklar ile radyoaktif ürünlerin atık yüzdeleri, yarıömürleri, etkin doz katsayıları Çizelge 2.1'de verilmiştir [7,11].

Radyoaktif atıkların kaynağı ne olursa olsun ortaya çıkan bu radyoaktif atıklar güvenli, ekonomik ve çevrenin ve insanların kabul edebileceği bir şekilde yönetilmesi gereklidir. Bu nedenle radyoaktif atıklar, insan sağlığını ve çevreyi etkilememesi için radyoaktif atıklar güvenli depolama bölgelerine gönderilerek depolanmaktadır. Ancak yarıömürleri oldukça uzun olan radyoaktif atıkların depolandığı alanların genişlemesi insan yaşamını ve çevreyi tehdit edeceği görülmektedir.

Çizelge 2.1. Radyoaktif elementler, atık yüzdeleri, yarıömürleri ve etkin doz katsayı miktarları

Radyoaktif Elementler	Atık yüzdesi (%)	Radyoaktif İzotoplar	Atık Miktarı (%)	Yarıömür (yıl)	Etkin Doz Katsayısı (10^{-8} Sv/Bq)
Uranyum	94,6	^{235}U	0,8	$7,04.10^8$	4,7
		^{236}U	0,6	$2,34.10^7$	4,7
		^{238}U	98,6	$4,47.10^9$	4,5
Neptünyum	0,06	^{237}Np	100	$2,14.10^6$	11
Plutonyum	1,1	^{238}Pu	2,5	87,7	23
		^{239}Pu	54,2	$2.41.10^4$	25
		^{240}Pu	23,8	$6,56.10^3$	25
		^{241}Pu	12,6	14,4	0,47
		^{242}Pu	6,8	$3,74.10^5$	24
Amerisyum	0,05	^{241}Am	63,8	432	20
		^{243}Am	36	$7,37.10^3$	19
Küriyum	0,01	^{243}Cm	1	29,1	15
		^{244}Cm	92,2	18,1	12
		^{245}Cm	5,7	$8,5.10^3$	21
		^{246}Cm	1,1	$4,76.10^3$	21
Fisyon Ürünleri	4,2	^{93}Zr	30,6	$1,53.10^6$	0,11
		^{99}Tc	35,2	$2,11.10^5$	0,078
		^{107}Pd	9,5	$6,5.10^6$	0,004
		^{129}Sn	1,1	1.10^5	0,47
		^{129}I	7,4	$1,57.10^7$	11
		^{135}Cs	16,2	$2,3.10^6$	0,2

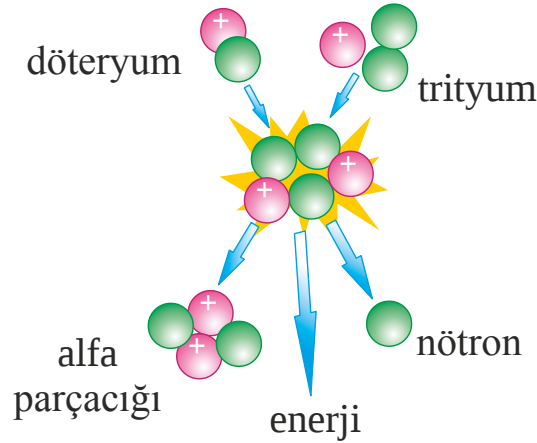
Bu sebepler göz önüne alındığında ileri görüş ve iyi uygulamalarla mevcut tesislerde üretilen atık miktarı azaltılmalıdır. Kullanılan yakıtların %100 verimle kullanılabileceği yeni teknolojiler ve tesis tasarımları, bakım gereksinimlerinin basitleştirilmesi gibi önlemlerle atık miktarlarının azaltılması ile taşıma, depolama gibi süreçler ortadan kalkarak zaman ve maliyetin azalması hedeflenmektedir.

2.2. Füzyon

Füzyon, iki hafif çekirdek birleşerek daha ağır bir çekirdek oluşturacak biçimde birleşmesi olayıdır. Enerji kaynağı olarak füzyon, güneş ve diğer yıldızlarda doğal olarak sürekli gerçekleşmektedir.

Füzyon enerjisi, enerji kaynağı olarak fisyon enerjisi ile kıyaslandığında; hafif çekirdeklerin bol miktarda bulunmaları, kolay ve ucuz olarak elde edilebilmeleri,

füzyon ürünlerinin genellikle hafif çekirdekler olmaları ve radyoaktif çekirdeklerden daha kararlı olmaları, saklama ve depolama maliyetlerinin olmamasıdır. Füzyonun en önemli dezavantajı çekirdeklerin birleşme reaksiyonu gerçekleştirebilmeleri için Coulomb engelini aşmaları gereklidir [12,13]. Fisyonda, nötronlar Coulomb engeli ile karşılaşmadıkları için çok düşük enerjili parçacıklar kullanılabilir [8].



Şekil 2.3. Füzyon reaksiyonun şematik gösterimi

Güneşte merkez sıcaklığının 15 milyon °C sıcaklığında olması atom çekirdeklerinin kinetik enerjilerinin Coulomb itmesini aşarak çarpışma yolu ile kaynaşmalarını sağlar. Hidrojen çekirdekleri birleşerek helyuma dönüşür. Dönüşüm esnasında enerji ortaya çıkar (Şekil 2.2). Güneşten gelen ısı ve ışık kaynağının temel nedeni bu reaksiyonlardır. Füzyon reaksiyonları çok yüksek sıcaklıklarda meydana gelmesi nedeniyle termonükleer reaksiyonlar olarak adlandırılır [9].

2.2.1. Temel Füzyon Reaksiyonları

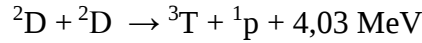
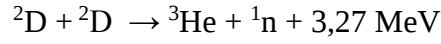
En temel füzyon reaksiyonu;



İle ifade edilir. Bu reaksiyonun ^2He 'nin kararsız olması nedeniyle gerçekleşmesi mümkün değildir. Füzyonda gerçekleşmesi mümkün reaksiyonlar döteryum – döteryum ve döteryum – trityum reaksiyonlarıdır [10].

2.2.1.1. Döteryum – Döteryum (D-D) Reaksiyonları

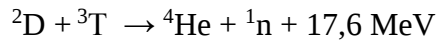
Döteryum, bir proton ve bir nötrondan oluşan ve ${}^2_1\text{H}$ sembolü ile gösterilen hidrojen çekirdeğinin izotopuna denir. Döteryum, ${}^2\text{D}$ ile gösterilir. İki döteryum çekirdeğinin reaksiyona girmesiyle meydana gelen füzyon reaksiyonları;



Bu reaksiyonlar döteryum- döteryum veya D-D reaksiyonları olarak bilinir. Her bir reaksiyonun oluşma ihtimali % 50'dir.

2.2.1.2. Döteryum – Tritiyum (D-T) Reaksiyonları

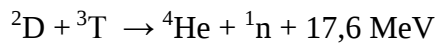
Tritiyum, bir proton ve iki nötrondan oluşan ve ${}^3_1\text{H}$ sembolü ile gösterilen hidrojen çekirdeğinin izotopuna denir. Tritiyum, ${}^3\text{T}$ ile gösterilir. Bir döteryum ve bir tritiyum çekirdeğinin reaksiyona girmesiyle meydana gelen füzyon reaksiyonu;



Bu reaksiyona döteryum-tritiyum veya D-T reaksiyonu denir. 17,6 MeV'lik toplam enerji, n ve ${}^4\text{He}$ arasında paylaşılır. Reaksiyon sonucunda yaklaşık 14,1 MeV'lik enerjiye sahip nötron açığa çıkar. Bu nedenle reaksiyon, füzyon reaktörlerinde hızlı nötron kaynağı olarak kullanılır. Geriye kalan enerjiyle yaklaşık 3,5 MeV' lik ${}^4\text{He}$ meydana gelir [10,14].

2.2.2. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması

Füzyon reaksiyonun da daha kararlı ürünler oluşması nedeniyle reaksiyon sonucunda büyük enerji açığa çıkar. Özellikle ${}^4\text{He}$ 'ün oluştuğu bir reaksiyonda büyük enerji çıkışı olur.



D-T reaksiyonunda açığa çıkan enerji;

$$Q = m \times c^2$$

$$Q = ([m({}^2\text{D}) + m({}^3\text{T})] - [m({}^4\text{He}) + m({}^1_0\text{n})]) \times c^2$$

$$Q = ([2,014102 \text{ u} + 3,014102 \text{ u}] - [4,002603 \text{ u} + 1,008665 \text{ u}]) \times 931,502 \text{ MeV/u}$$

$$Q = 17,589 \text{ MeV}$$

D-T reaksiyonu sonucunda açığa çıkan yaklaşık 17,6 MeV'lik füzyon enerjisi;

$$E_n = Q \times [m(n) / ((m(n) + m(He)))]$$

$$E_n = 17,589 \text{ MeV} \times [4,002603 \text{ u} / (4,002603 \text{ u} + 1,008665 \text{ u})]$$

$$E_n = 14,04 \text{ MeV}$$

ve

$$E_{He} = Q \times [m(He) / ((m(n) + m(He)))]$$

$$E_{He} = 17,589 \text{ MeV} \times [1,008665 \text{ u} / (4,002603 \text{ u} + 1,008665 \text{ u})]$$

$$E_{He} = 3,54 \text{ MeV}$$

bulunur.

D-T füzyon reaksiyonu sonucunda açığa enerjinin, yaklaşık %80'ine karşılık gelen 14,04 MeV'lik kısmı çok yüksek enerjiye sahip füzyon nötronlarına aittir. Bu enerji değeri fisyon reaksiyonunda elde edilen nötronların sahip olduğu 2 MeV'lik enerjinin yaklaşık 7 katına karşılık gelmektedir. Bu nedenle füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan yüksek enerjili füzyon nötronlarını manyetik bir alan içinde tutmak mümkün değildir. Yüksek enerjili bu nötronların tutulabilmesi için plazmanın nötron tutan madde ile sarılması gereklidir [10-14].

2.2.3. Füzyon Reaksiyonlarının Gerçekleşebilme Koşulları

Füzyon enerjisinin laboratuvar ortamında elde edilebilmesi için sıcaklık, yoğunluk ve zaman parametrelerinin yeterli düzeyde oluşturulması gerekir.

1. Sıcaklık: Füzyon reaksiyonunun ilk şartı sıcaklıktır. Yüksek sıcaklıkta, maddenin plazma halinde oluşabilen nükleer reaksiyonlardır. Bu nedenle Füzyon reaksiyonları, sıcaklığa bağlı nükleer reaksiyon oldukları için “ termonükleer reaksiyon” adı verilir.

Atomların pozitif elektrik yüklü çekirdekleri birbirlerine elektrostatik itme kuvveti uygularlar. İki çekirdeğin birleşip füzyon reaksiyonu verebilmesi için bu elektrostatik itme engelini aşmaları gerekir. Elektrostatik itme kuvvetini yenebilmenin tek yolu, atomların yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması ile gerçekleşir. Atomlar yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldığında gaz hale geçerler. Atomlar daha da ısıtılsa son yörüngelerindeki elektronları kaybederek iyonize hale geçerler. Oluşan pozitif iyonlar ile negatif iyonların karışımına maddenin **plazma hali** denir. Elektrostatik itme kuvveti engelini aşp, iki çekirdeğin birleşip füzyon reaksiyonun gerçekleşebilmesi

için plazma sıcaklığı çok yüksek olmalıdır. Plazmada sıcaklık çok yüksek olduğundan birim olarak elektron volt (eV) veya kiloelektron volt (keV) ile ifade edilir. Parçacıkların ortalama kinetik enerjileri 10 keV'dir. 1keV değeri $1,16 \cdot 10^7$ °K değerine eşittir. Buna göre D-T füzyon reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için plazma sıcaklığı yaklaşık olarak $4,5 \cdot 10^7$ °K ve D-D füzyon reaksiyonu için ise $4 \cdot 10^8$ °K'dir.

2. Yoğunluk: Füzyon reaksiyonun gerçekleşebilmesi için yoğunluk yüksek olmalıdır. Birim hacimde ne kadar çok iyon bulunursa çarpışmalar o kadar çok olur. Parçacıklar arasındaki çarpışma oranını arttırmak için etkileşen çekirdeklerin yüksek yoğunluğa sahip olmaları gerekir. Füzyon reaksiyonun gerçekleşebilmesi için birim hacimdeki tanecik yoğunluğunun en az 10^{20} tanecik/m³ olması gerekir.

3. Zaman: Plazma sınırlama zamanının uzun olması füzyon reaksiyonunun devam edebilmesi için gereklidir. Birim hacimde ne kadar çok iyon bulunursa iyonların çarpışmaları o kadar fazla olur ve plazmanın tutuşması daha çabuk sağlanır. Ancak birim hacimdeki iyon sayısı az olursa iyonların çarpışmaları daha az olacağından plazma tutuşması daha geç sağlanır. O halde plazmanın tutuşması için gerekli olan sıcak tutma süresi plazmanın yoğunluğu ile ters orantılıdır. Buna göre yoğunluk yükselirse plazma süresi kısalır, yoğunluk düşerse plazma süresi uzar. Ancak bunların çarpımı her zaman sabittir. Birim hacimdeki iyon sayısı “n” ve plazma sınırlama zamanı “t” ile gösterilip “saniye” cinsinden ifade edilirse, iyon yoğunluğu ile sınırlama süresinin çarpımının minimum değerine **Lawson Ölçütü** denir. Farklı çalışma sıcaklıkları ve farklı yakıtlar kullanılmasında bu ölçüt farklı değerler alır. Buna göre, D-T reaksiyonunda 10 keV'lik bir çalışma sıcaklığında $nt > 10^{14}$ s/cm³, D-D reaksiyonunda ise 100 keV'lik bir çalışma sıcaklığında $nt > 10^{16}$ s/cm³'tür [7,15].

Plazmanın tutuşması ve plazmanın sıcaklığını 10-100 keV mertebesine kadar yükseltmek için ek ısıtma yapılmalıdır. Ek ısıtma radyo frekansı (rf) ısıtması ve nötr ışın demeti enjeksiyonu (NBI) ile yapılır.

a. Radyo frekansı (rf) ısıtma yöntemi: Toroidal akımlar ile plazma ısıtması yapılır. Toroidal akım, radyo frekansı dalgalarının elektronları sürmesi ile meydana gelir ve bu akım sayesinde plazma ısıtılır.

b. Nötr ışın demeti enjeksiyonu (NBI) yöntemi: Plazmayı ısıtma, hidrojen veya döteryum iyonlarından oluşan ışın demeti 10-100 keV'lik enerjilere kadar hızlandırılır, sonra yük değiş-tokuşu ile ışın demeti nötr hale getirilir. Işın demetindeki parçacıklar

yüksüz olduklarında manyetik alanda sapmadan ilerleyebilirler. Yüksüz parçacıklar plazma içindeki pozitif iyonlar ve negatif elektronlarla Coulomb saçılması yaparak enerjilerini plazmaya aktararak kaybederler. Böylece plazma ısıtması NBI yöntemi ile sağlanmış olur.

Füzyon reaksiyonu için kullanılan ek ısıtma yöntemleri plazma tutuşması için gereklidir. D-T füzyon reaksiyonundan çıkan yaklaşık 3,5 MeV lik enerjili alfa parçacıkları reaksiyonları sürdürmek için gerekli ısıyı sağlamaktadır. Alfa parçacıkları manyetik alanlar yardımıyla plazma içine hapsedilir ve plazmada yaptığı çarpışmalarla sahip olduğu enerjiyi plazmaya aktararak plazmanın ısıtılmasını sağlamaktadır [7,15].

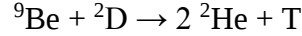
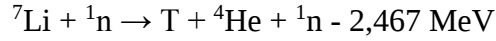
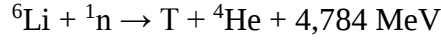
2.2.4. Füzyon Yakıtları

Araştırma aşamasında olan füzyon reaktörlerinde, nükleer enerji üretimi için yakıt olarak döteryum-döteryum ya da döteryum-trityum kullanılır.

Döteryum; Amerika'lı kimyacı Urey tarafından 1932'de bulunan gaz halinde bir element olan döteryum, çekirdeğinde bir proton ve bir nötron bulunduğu için hidrojenin kararlı izotopudur. Atom çekirdeği yalnız bir protondan meydana gelen hidrojene oranla iki kat daha ağırdır. Bu nedenle döteryum, ağır hidrojen adı verilir. Hidrojen nükleer mühendisliğin önemli bir elementidir. Tabiatta bulunan hidrojen elementi iki izotopun karışımı halindedir. Ancak bu karışım çok dengesizdir. Doğal hidrojen %99,985 ^1H ve %0,015 ^2H 'den oluşur. Bu orana göre bir ton su sadece yaklaşık olarak 30 gr döteryum içerir. Döteryum, kimyasal olarak hidrojen gibi davranırsa da, daha büyük atomik ağırlığa sahip olduğundan reaksiyonları daha yavaş yürür. ^1H ve ^2H izotopları, kütle spektroskopisi yöntemiyle birbirinden ayrılabilir. Döteryumun donma noktası 8 °C, kaynama noktası ise 101,4 °C'dir. Kırılma indisi suya göre daha küçüktür. Her ne kadar döteryum oranı az ise de dünyanın $\frac{3}{4}$ ' ünün sularla kaplı olduğu düşünülürse, döteryum rezervinin oldukça büyük miktarlarda olduğu görülebilir.

Trityum; Çok hızlı döteryum çekirdeği ile döteryum bileşiklerinin bombardıman edilmesi sırasında nükleer dönüşüm ürünü olarak 1934 yılında keşfedilmiştir. Hidrojenin ağır ve 12,3 yıl yarıömre sahip radyoaktif bir izotopudur. Trityum izotopu bir proton ve iki nötrondan meydana gelir. Trityum izotopu tabiatta bulunmaz yapay olarak üretilir. Trityumun erime noktası -252,5 °C, kaynama noktası ise -248,12 °C'dir. Yeryüzünün mevcut trityum miktarı yaklaşık 1 kg olarak tahmin edilmektedir. Bu

yüzden trityum izotopu genellikle lityumun nötronlarla reaksiyonu sonucunda üretilir. Ayrıca berilyumun hızlandırılmış döteryum ile bombardımanından da trityum elde edilir. Trityumun üretilme reaksiyonları şöyledir;



Fisyon reaktörlerinde olduğu gibi füzyon reaktörlerinde de nötron reaksiyonları ile yakıt üretimi sağlanmaktadır. Fisyon yakıtı olarak plutonyum, füzyon yakıtı olarak trityum yapay olarak üretilmektedir. Lityum, genellikle az bilinen bir alkali metaldir. Metallerin, hatta katıların en hafif olanıdır.

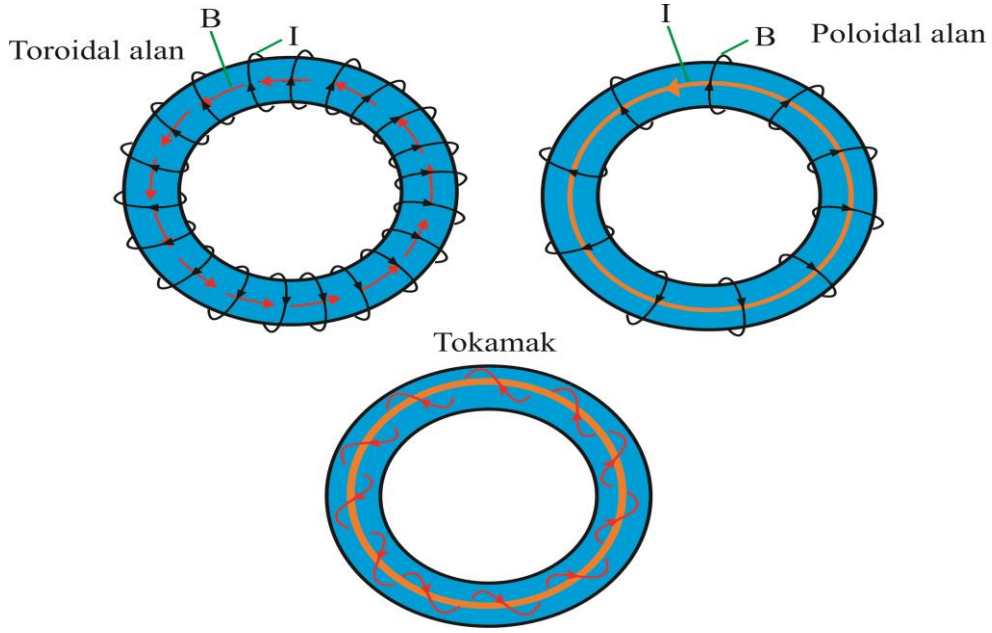
D-T reaksiyonunda açığa çıkan nötron, elde edilen enerjinin %80'ine sahiptir (14,1 MeV) ve plazmayı çevreleyen lityum örtüsü tarafından yakalanabilir. ${}^4\text{He}$ ve ${}^3\text{H}$ ise enerjilerini ısı olarak lityum içinde depo ederler. Daha sonra sıcak sıvı lityum, türbini çalıştırmak için kullanılan bir buhar jeneratörüne gönderilir. ${}^3\text{H}$ reaktöre yakıt temin etmek için ayrıştırılır.

2.2.5. Füzyon Reaktörlerinde Manyetik Alan Sınırlandırılması

Füzyon reaktörlerinde plazmanın sınırlandırılması için manyetik alan kullanılır. Manyetik alan kullanılarak planlı ve dikkatli bir şekilde plazmanın sınırlanması sağlanır. Bu yöntem üç şekilde yapılır (Şekil 2.4) [10,16].

1. Düzgün Eksenli Manyetik Alan Sınırlaması: Manyetik alan yüksek akım taşıyan bobinler tarafından sağlanır. Parçacıklar manyetik alan etrafında sarmal oluşturur. Bu yöntem en basit manyetik alan sınırlama yöntemidir.

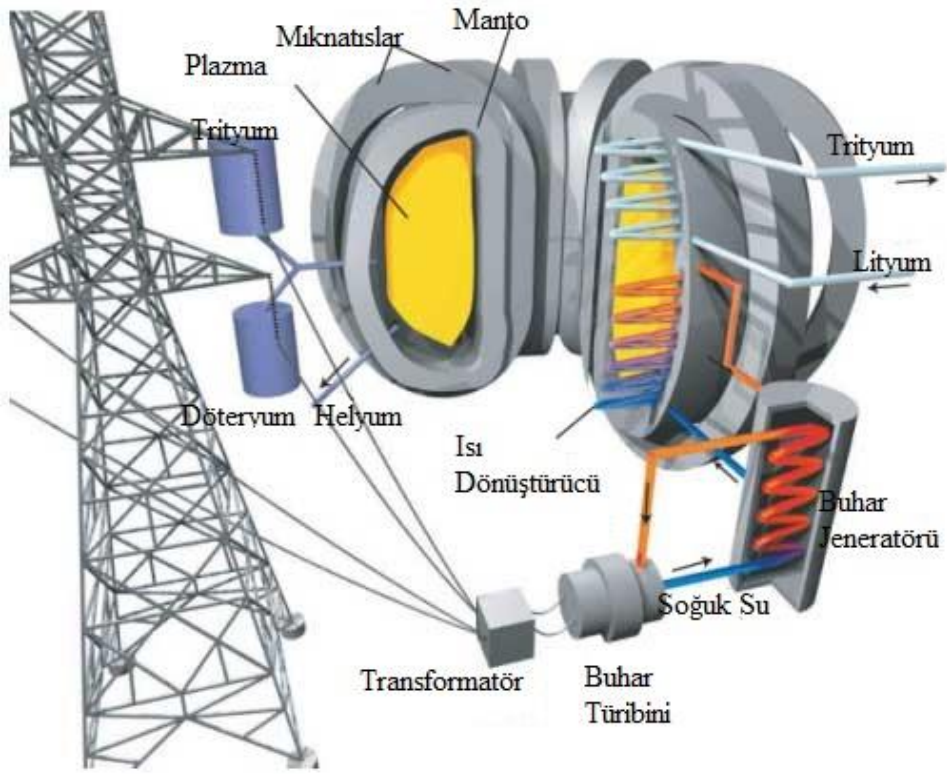
2. Toroidal Geometride Manyetik Alan Sınırlaması: Bu yöntemde parçacıklar manyetik alan çizgilerini sarmal olarak izlerler ancak, dış duvara doğru bir sürüklenme gerçekleşir. Bu durumun oluşabilmesi; eksen boyunca parçacık kayıpların önlenmesi için, spiral halka şeklinde kıvrılarak bir torus oluşturmaktır. Plazmanın sınırlanabilmesi için iki farklı manyetik alan birleşimi kullanılır. Bunlar poloidal alan ve toroidal alandır.



Şekil 2.4. Toroidal alan ve poloidal alan ile manyetik alan sınırlamalı Tokamak Metodu gösterimi

Bobindeki akımlar tarafından oluşturulan güçlü alana **toroidal alan** denir. Toroidal bobinde manyetik alan, toroidin yarıçapı ile ters orantılıdır. Bir parçacık spiral şeklindeki yörüngede hareket ederken spiralin yarıçapının daha büyük olmasına neden olur. Bunun sonucunda parçacığı dış duvara yaklaştıran daha düşük şiddette bir manyetik alan ile karşılaşır. Bu etkiyi azaltmak için toroidin yüzeyi boyunca oluşturulan manyetik alan bileşenine **poloidal alan** denir. Toroid akımı tarafından oluşturulan zayıf bir alandır. Bu iki alan kullanılarak oluşturulan bileşke alan parçacıkların kapalı yörüngede hareket edebildiği bir sarmal oluşturur. Bu yöntem **tokamak metodu** olarak da adlandırılır.

3. Manyetik Aynada Manyetik Alan Sınırlaması Metodu: Bu yöntem manyetik ayna olarak bilinen, parçacıkları düşük manyetik alan bölgesine yansıtabilen yüksek yoğunluklu manyetik alan çizgilerinin oluşturulduğu ve parçacıkların manyetik alan çizgilerini takip ederek yüksek alan bölgesinden geri yansıtıldıkları düzenektir.



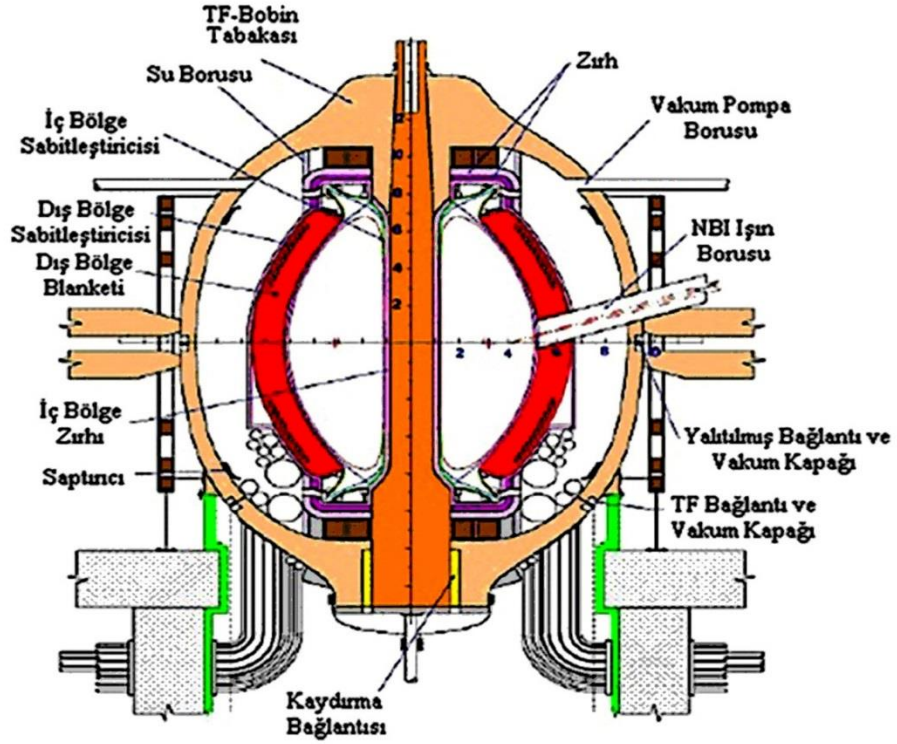
Şekil 2.5. Bir füzyon reaktörün çalışma sistemi

2.2.6. Füzyon Enerjisinde Karşılaşılan Sorunlar

Füzyon reaksiyonunu için gerekli olan hammaddelerin bol bulunması, kolay ve ucuz şekilde elde edilebilir olması, füzyon reaksiyonu sonunda çok yüksek enerjinin açığa çıkması ve füzyon reaksiyonu ile radyoaktif atıkların meydana gelmemesi füzyon enerjisinin araştırılmasını cazip hale getirmiştir. Yapılan laboratuvar çalışmaları füzyon enerjisini çok kısa süreler için elde edilebilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte füzyon reaksiyonunun en az 100 milyon °C gibi yüksek sıcaklıkta gerçekleşebilir olması ve füzyon reaksiyonu ile oluşan plazma yüksek sıcaklıkta olduğundan, füzyon reaktörlerinde kullanılan plazmanın reaktöre zarar vermemesi için hapsedilmesi, çözülmesi gerekli başka bir sorundur. Bu yüzden önümüzdeki yıllarda bilgi ve teknolojinin yeterli olgunluğa erişmesi ile füzyondaki bu sorunların giderileceği ve gerek duyulan temiz, ucuz, sürekli enerji kaynağı olarak füzyon enerjisinin kullanılacağı düşünülmektedir [7, 10,14].

2.3. Hibrit (Füzyon-Fisyon)

Hibrit reaktörler, füzyon ve fisyon reaktör özelliklerinin birlikte kullanıldığı sistemler olarak tanımlanır. Çekirdek birleşmesi (füzyon) ve bölünmesi (fisyon) reaksiyonlarının birlikte gerçekleştirilebildiği reaktörlerdir. Hibrit reaktör, yüksek oranda füzyon nötronlarının yakalanmasıyla fertil malzemelerin (^{238}U , ^{232}Th) fisyonu ve fisil malzemelere (^{239}Pu , ^{233}U) dönüşümü prensibine dayanır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Hibrit reaktör şematik gösterimi

Hibrit reaktörlerin günümüzde kullanılan fisyon reaktörlerine göre en önemli avantajı, fisyon reaktörlerinde kullanılmış doğal veya harcanmış uranyum ile toryum kullanılmasıdır. Harcanmış yakıt tekrar kullanılarak, yakıtın yeniden işlenmesi ve depolanması gibi süreçler ortadan kalkarak zaman ve maliyetin azalması mümkün olacaktır [17].

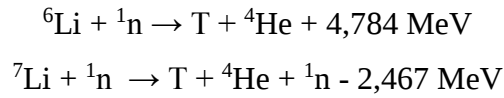
Fisyon ve füzyon reaktörlerinde olduğu gibi hibrit reaktörlerde de enerji üretebilmek için kullanılacak yakıtın belirlenmesi gereklidir. Yakıt olarak fisyon reaktörlerinde genellikle uranyum kullanılmakta, füzyon reaktörlerinde ise D-D veya

D-T yakıt olarak kullanılmaktadır. Füzyon reaktörlerinde Kullanılan D-T ve D-T yakıtlarının elektrostatik itme engelini aşarak birleşme reaksiyonu gerçekleştirebilmesi için yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak plazma hale gelmesi gerekir. Plazma, toroidal ve poloidal manyetik alanlar kullanılması ile sınırlandırılması sağlanır. Sınırlamadaki amaç plazmanın dengede kalması ve reaktör malzemeleri ile etkileşerek reaktöre vereceği zararı engellemektir.

Füzyon–fısyon hibrit reaktörlerde, D-T füzyon reaksiyonlarından elde edilen 14,1 MeV enerjili nötronlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte D-T füzyon reaksiyonundan çıkan 3,5 MeV enerjili alfa parçacığı, füzyon reaksiyonunun sürekliliğini sağlaması ve plazmanın soğumaması için enerjisini plazmaya aktarır. Füzyon nötronlarının 14,1 MeV’lik çok büyük enerjiye sahip olmaları nedeniyle bu nötronların kontrol altında tutulmaları oldukça zordur [10,16-18]. Burada hibrit reaktörlerin kullanım amacına uygun olarak termal nötronlarla fısyon reaksiyonu yapmayan ancak yüksek enerjili bu nötronlarla dönüşüm ve fısyon reaksiyonu yapabilen ^{238}U veya ^{232}Th fertil malzemeleri kullanılarak oluşturulmuş olan bir duvar ile sarılır. Burada amaç termal nötronlarla fısyon reaksiyonu yapamayan ve fısyon reaktörlerinden nükleer atık olarak ayrılan maddelerin 14,1 MeV’lik yüksek enerjili nötronlarla dönüşüm reaksiyonu yaparak ^{238}U fertilinin ^{239}Pu fisiline, ^{232}Th fertilinin ^{233}U fisiline dönüşümü sağlanır. Dönüşüm sonucunda enerji ve fısyon nötronları elde edilmiş olur. Dönüşüm sonunda hibrit reaktörlerde üretilen fisil yakıtın az bir kısmı reaktör içerisinde enerji üretimine katkıda bulunmak için kullanılırken, geriye kalan miktar uygun yöntemler kullanılarak reaktör dışına alınır Elde edilen fisil (^{233}U , ^{239}Pu) yakılar fısyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılmaktadır.

Hibrit reaktörlerde yakıt olarak kullanılan D-T yakıtında, döteryum suda bol bulunduğundan elde edilmesi kolaydır. Ancak trityum laboratuvar ortamında elde edilebilen radyoaktif bir elementtir. Hibrit reaktörlerin çalışmasının devam edebilmesi için D-T füzyon reaksiyonunun sürekli devam etmesine bağlıdır. Ancak trityum, döteryum ile reaksiyona girdiğinden reaksiyonun devam edebilmesi için trityum sürekli eklenerek reaksiyonun desteklenmesi gerekir. Bunun için birinci yöntem laboratuarda üretilen trityum reaktöre aktarılarak döteryum ile reaksiyon vermesi sağlanmalı veya ikinci yöntem olarak reaktörün kendi ihtiyacı olan trityumu kendisinin üretmesi ile gerçekleştirilebilir. Reaktörün ihtiyacı olan trityumu kendisinin üretmesi daha kullanışlı yöntemdir. Bunun için iyi bir trityum kaynağı olan lityumun kullanılması uygun olacaktır. Lityumun nötronlarla reaksiyonu sonunda trityum

üretildiğinden, hibrit reaktörlerin ihtiyacı olan trityumu üretebilmesi için reaktörde lityum içeren bir duvarın olması gereklidir. Buna göre, plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlardan açığa çıkan nötronlar, lityum içeren duvarla reaksiyona girerek, hibrit reaktörlerin çalışması dolayısıyla füzyon reaksiyonunun devam edebilmesi için gerekli trityum üretimi elde edilmiş olur. Doğal lityum %7,56 oranında ^6Li ve %92,44 oranında ^7Li izotopundan oluşur. $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ reaksiyonu termal nötronlarla, $^7\text{Li}(n,\alpha n')\text{T}$ reaksiyonu hızlı nötronlarla reaksiyon verir. Buna göre, plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlardan açığa çıkan nötronlar lityumlu bölgede önce ^7Li izotopu ile reaksiyon verir. ^7Li ile reaksiyon sonunda trityum, ^4He ve termal nötronlar üretilir. Açığa çıkan termal nötronlar ^6Li ile reaksiyon verip trityum ve ^4He üretimi sağlanır.



Plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlardan açığa çıkan nötronların lityumlu tabakada reaksiyonu ile hibrit reaktörlerin çalışması ve D-T füzyon reaksiyonunun devam edebilmesi için gerekli olan trityum üretimi ^6Li ve ^7Li ’ den elde edilmiş olur.

Hibrit reaktörlerinde enerji, fisil yakıt ve trityum üretimi için füzyon, fisyon ve üretim (dönüşüm) reaksiyonları olmak üzere 3 farklı nükleer reaksiyon meydana gelmektedir. Birinci olarak hibrit reaktörlerin füzyon reaksiyonu; yüksek enerji elde etmek için D-D veya D-T yakıtları ile yapılır. D-D füzyon reaksiyonu sonunda 2,45 MeV enerjili füzyon nötronu, D-T füzyon reaksiyonu sonunda 14,1 MeV enerjili füzyon nötronu elde edilir. İkinci olarak fisyon reaksiyonu; açığa çıkan yüksek enerjili nötronlarla fertil malzemelerin reaksiyonu sonunda enerji ve fisyon nötronu elde etmek için yapılır. Böylece, D-T füzyon yakıtı kullanıldığında açığa çıkan 14,1 MeV enerjili füzyon nötronları, radyoaktif ^{238}U veya ^{232}Th fertilleri ile fisyon reaksiyonu yaptırılarak enerji ve fisyon nötronları üretilmiş olur. Üçüncü olarak üretim (dönüşüm) reaksiyonu; termal nötronlarla reaksiyona girmeyen fertil malzemeler, açığa çıkan hızlı nötronlarla nötron soğurulması yaparak fisil yakıt üretimini ve reaktör için gereken trityum üretimini elde etmek için yapılır. D-T füzyon reaksiyonu ile açığa çıkan 14,1 MeV enerjili füzyon nötronları, radyoaktif ^{238}U veya ^{232}Th fertilleri ile nötron soğurulması yaparak dönüşüm yolu ile ^{239}Pu veya ^{233}U fisil yakıtları elde edilir. Termal nötronlarla reaksiyon verme ihtimali az olan ve fisyon reaktörlerinde atık olarak bırakılan ^{238}U fertilinin, hibrit reaktörlerde hızlı nötronlarla reaksiyon verip

^{239}Pu fisilinin elde edilmesi ile hibrit reaktörler doğal uranyumdan fisyon ve dönüşüm ile %100 kullanılmış olur. Böylece radyoaktif ^{238}U izotopundan fisyon reaktörlerinde yakıt hammaddesi olan ^{239}Pu fisili elde edilmiş olur. Hibrit reaktörlerde D-T yakıtı kullanıldığında, döteryum bol bulunurken, trityum laboratuarda üretilen radyoaktif bir element olduğundan, hibrit reaktörlerin çalışması ve D-T füzyon reaksiyonunun sürekli devam edebilmesi için gerekli olan trityumun üretilmesi gereklidir. Bunun için plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlardan açığa çıkan nötronların lityumlu tabaka ile reaksiyona girerek reaktör için gerekli olan trityum üretimi elde edilmiş olur [7, 10, 13, 16-18].

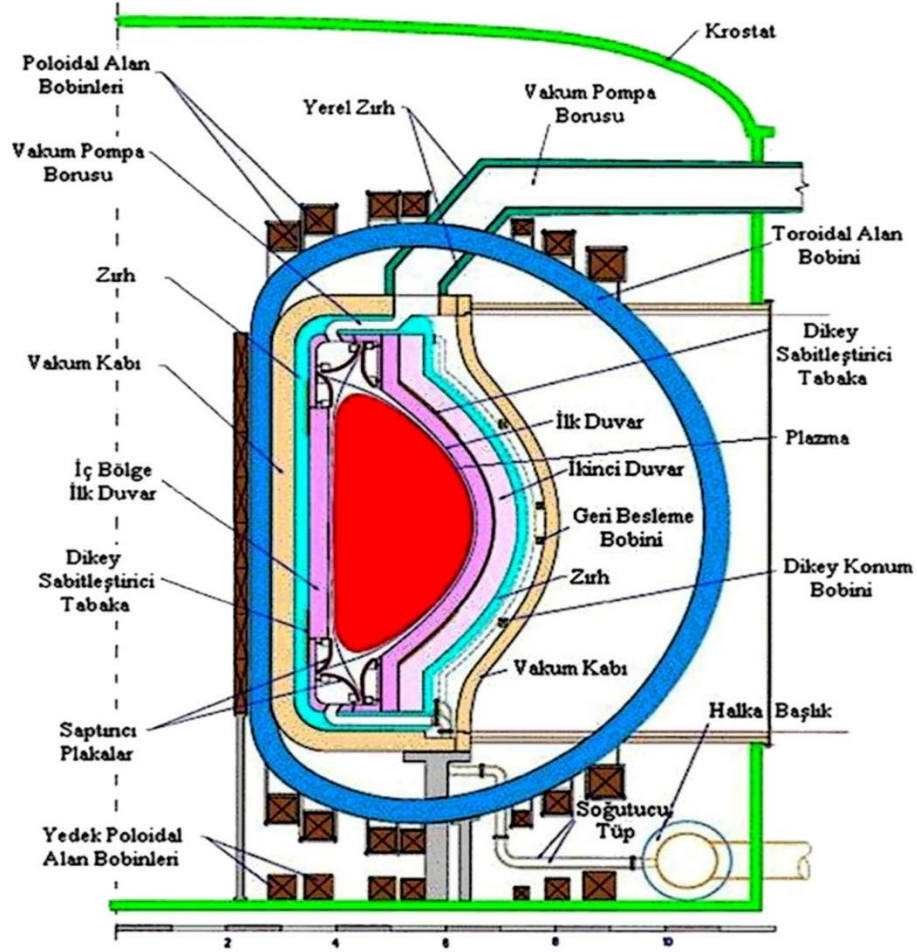
Hibrit reaktörlerde, reaktör korunun erimesine engel olmak için ve açığa çıkan ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için ısı iletimini sağlayan soğutucular kullanılır. Soğutucu olarak sıvı ve gaz soğutucular kullanılır. Hibrit reaktörlerde ısı enerjisi, sıvı ve gaz soğutucular ile alınıp elektrik enerjisi elde edilecek jeneratörlere aktarılır. Sıvı soğutucular ısı iletim ve nükleer özellikleri nedeni ile genellikle sıvı lityum, sıvı sodyum gibi sıvı metaller olmalıdır. Gaz soğutucu olarak Helyum kullanılır. Hibrit reaktörlerde, kaçan nötronların yakalanması ve nötron ekonomisinin sağlanabilmesi için reaktör çevresi reflektör (yansıtıcı) ile çevrelenir. Reflektör olarak genellikle grafit, Be, Fe malzemeleri kullanılır [7, 10, 13, 16-19].

2.3.1. APEX Hibrit Reaktörü

APEX (Advanced Power Extraction) hibrit reaktörü 1998 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde füzyon güç teknolojisinde yenilikçi kavramları incelemek için geliştirilmiş çalışmadır. Bu projenin amacı füzyonu cazip, güvenilir ve kullanılabilir hale getirebilmektir [20].

Füzyon güç reaktörlerinde, reaktörün kor bölgesinde yapılan füzyon reaksiyonu ile kullanılan yakıt, plazma haline dönüşüp plazmadan yüksek enerjili füzyon nötronları, gamma ışını ve yüklü parçacıklar elde edilmektedir. Füzyon reaktöründe; plazmayı çevreleyen ilk duvar yüksek enerjili füzyon nötronları, gamma ışını ve yüklü parçacıklar etkisiyle yapısal (katı) malzemedede radyasyon hasarı meydana gelir. Bu nedenle plazmayı çevreleyen ilk duvarın yapısal malzemeden olması reaktör ömrünün kısa olmasına neden olur. Bu problemin çözümü için 1971'de N. Christofilos tarafından ilk duvarın katı duvar olması yerine sıvı duvar olmasının uygun olacağı görüşünü ortaya koymuştur. Christofilos tarafından önerilen sıvı duvar kavramı APEX'te kullanılmıştır. Böylece APEX'te plazmayı çevreleyen geleneksel

ilk katı duvarın yerini akıcı sıvı duvar tabakası almıştır (Şekil 2.7). Akıcı sıvı duvar, APEX hibrit reaktörünün performansının düzenlenmesi, enerji transferi ve trityum üretimi için kullanılmıştır. APEX hibrit reaktöründe nötron duvar yükü ve yüzey ısı akısı problemleri için kullanılabilir çözümler geliştirilmiştir [20- 25]. İnce ve kalın olmak üzere iki farklı özellikte sıvı duvar kullanılmıştır.



Şekil 2.7. APEX hibrit reaktörünün şematik gösterimi

APEX hibrit reaktörü, fisyon ve füzyon reaksiyonu yaparak, füzyon reaksiyonu ile yüksek enerji elde etmek, enerji ihtiyacını karşılamak ve füzyon enerjisini cazip hale getirmektir. Hibrit reaktörlerde olduğu gibi APEX' te de fertil malzemelere dönüşüm ve fisyon yaptırarak radyoaktif ürünlerden fisyon reaktörlerinde yakıt ham maddesi olarak kullanılan fisil malzemeler üretmek ve fisyon nötronları ile de reaktör

için gerekli olan enerji üretimini sağlayarak rekabet edilen enerji kaynağı olmak genel amaçları arasında yer alır.

Diğer reaktörlerden farklı olarak APEX' te geleneksel ilk katı duvar yerine akıcı sıvı duvar kullanılmasının avantajları;

1. Plazmanın, denge ve sınırlamasında düzenliliğin sağlanması,
2. Yenilenebilen duvar özelliği ile yüksek güç yoğunluğuna sahip olması,
Nötron duvar yükü (yüzeye düşen nötron gücü) 10 MW/m²
Yüzey ısı akısı 2 MW/ m²
3. Yapısal malzemelerdeki radyasyon hasarı ve aktivasyonu önemli ölçüde azaltması ve yapısal malzemelerin ömrünün uzatılması,
4. Reaktör kabı içerisindeki malzemelerin bakımının kolaylaşması,
5. Yüksek termodinamik verim (% 40) sağlaması,
Termodinamik verim = (Yüksek sıcaklık – Düşük sıcaklık) / Yüksek sıcaklık
6. Trityum üretiminin daha iyi elde edilmesidir [7,21, 22, 26-29].

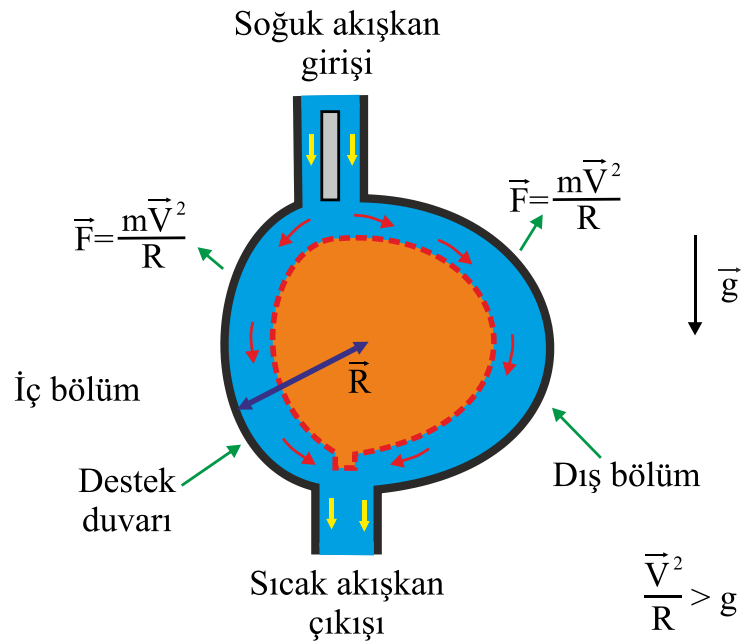
APEX' te ilk (ince) sıvı duvar 2 cm kalınlığında ve 20 m/s hızında olup yüklü parçacıkları hapseder. İlk sıvı duvar plazmadan sonra, ikinci (kalın) sıvı duvar ilk sıvı duvardan sonra yer alır. İkinci sıvı duvar 40 cm kalınlığında ve 8 m/s hızında olup biraz daha yavaş akar, yapısal malzemede radyasyon hasarını önemli ölçüde azaltır ve nötronlardan dolayı açığa çıkan radyasyon enerjisini hapsederek ısıya çevirir [7,22-24, 28-34]. Hem ince hem de kalın sıvı duvarlar, yüksek yüzey ısı akışını ortadan kaldırmak için kullanışlıdır.

APEX hibrit reaktöründe, diğer reaktörlerden farklı olarak ilk katı duvarın yerini yenilikçi yaklaşım olan sıvı duvar kavramı almıştır. Kullanılan sıvı duvar plazmadan sonra yer alıp, yüksek yüzey ısı akışını ortadan kaldırmak, yüklü parçacıkları hapsederek yapısal malzemede radyasyon hasarını önemli ölçüde azaltmak ve radyasyon enerjisini ısı enerjisine çevirmek için kullanışlıdır. Ancak sıvı duvarın plazmaya ve diğer tabakalara zarar vermemesi için reaktör içerisinde belli bir düzende ve sürekli akması gereklidir. Sıvı akışını sürdüren ve katı destek duvarına tutunmasını sağlayan çeşitli kuvvetler uygulanmasıyla farklı sıvı duvar kavramları elde edilmiştir [29, 30].

Geliştirilen sıvı duvar kavramları;

1. Yerçekimi-Momentum Tahrikli (GMD),
2. Girdap Akışı ile GMD,
3. Elektromanyetik Olarak Tutma (EMR),
4. Manyetik İtme sıvı duvar kavramlarıdır

Geliştirilen sıvı duvar kavramlarından birincisi, Yerçekimi-Momentum Tahrikli (Gravity-Momentum Driven (GMD)) sıvı duvar kavramında; sıvı duvarı oluşturan akışkan, tabakanın üstünden arka katı duvara doğru teğet bir açıyla enjekte edilir. Bu şekilde akışkan Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, merkezkaç kuvvetiyle arka katı duvara yapışarak tabakanın altına doğru akmaktadır.

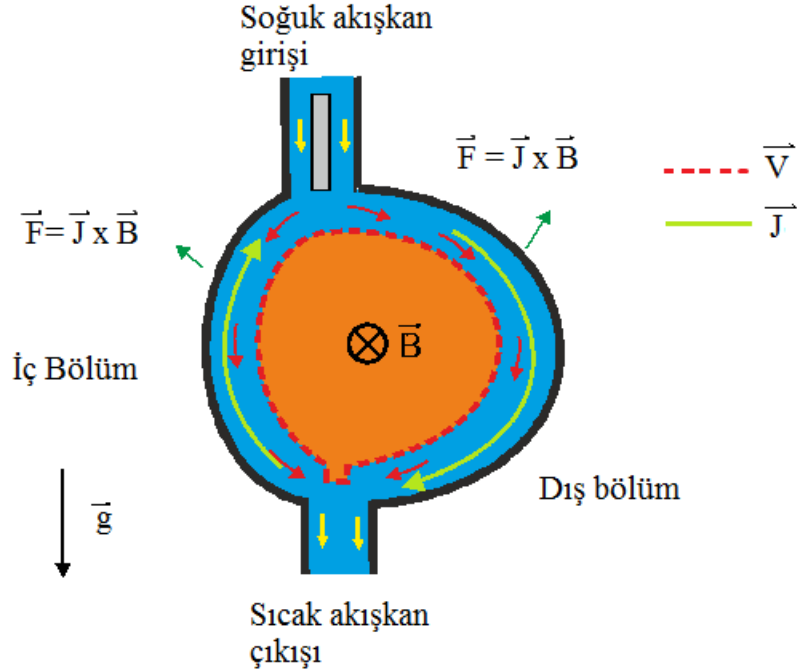


Şekil 2.8. Yerçekimi momentum tahrikiyle (GMD) sıvı duvar teşkili ($\vec{R}$ = Eğrinin yarıçapı, $\vec{V}$ = Akışkan hızı, $\vec{g}$ = Yerçekimi ivmesi, $\vec{F}$ = Merkezcil kuvvet)

APEX reaktöründe sıvı duvarın sürekli olması, reaktörün verimli çalışabilmesi için gereklidir. Akışkanı arka katı duvara iten merkezcil kuvvetin yerçekimi kuvvetinden büyük olması, sıvı duvarın sürekli ve kararlı olması için şarttır.

Sıvı duvar kavramlarından ikincisi; Girdap Akışı ile GMD sıvı duvar kavramında sıvı duvarı oluşturan akışkana dönme hareketi sağlamak için açılmal hız

verilir. Açısal hız ile dönme yapan akışkan, girdap akışı şeklinde arka katı duvara doğru tutunmaktadır. Girdap akışı merkezkaç ivmelendirilmesini artırıp, akışkanın duvara daha iyi tutunmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.9. Elektromanyetik olarak tutma (EMR) sıvı duvar kavramı gösterimi ($\vec{B}$ = Toroidal manyetik alan, $\vec{J}$ = Poloidal akım yoğunluğu, $\vec{V}$ = Akışkan hızı, $\vec{F}$ = Elektromanyetik kuvvet)

Sıvı duvar kavramlarından üçüncüsü; Elektromanyetiksel tutma (Electromagnetically Restrained (EMR)) sıvı duvar kavramında sıvı duvarı oluşturan akışkan, tabakanın üstünden arka katı duvara doğru poloidal yönde enjekte edilir. Akışkanın poloidal yönde enjekte edilmesi ile bir poloidal akım ($\vec{J}$) üretilir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, üretilen poloidal akım, akışkanın arka duvara tutunmasını sağlayacak elektriksel kuvveti ($\vec{F}$) üretmek için toroidal manyetik alan ($\vec{B}$) ile etkileşir.

Sıvı duvar kavramlarından dördüncüsü; Manyetik itme (Magnetic Propulsion) sıvı duvar kavramıdır. L. Zakhorov tarafından önerilen bu sıvı duvar kavramı henüz APEX için incelenmemiştir. Bu yöntem kullanılarak sıvı duvarı oluşturan akışkan, bir elektrik akımı ile birlikte tabakanın üstünden arka katı duvara doğru enjekte edilir. Toroidal manyetik alan, uygulanan elektrik akımı etkileşimi ile bir basınç tahrik

kuvveti oluşturur. Oluşan basınç değişimi, akışın manyetik alan kuvvetinin olduğu iç bölgeden dış bölgeye doğru ivmelenmesini sağlar. Ayrıca toroidal manyetik alanın düzensizliği ile düzensiz bir Lorentz kuvveti oluşur. Oluşan Lorentz kuvveti ise akışkan katı duvara yapışık tutarken akışı düzenli hale getirmek için aktif bir geri besleme sistemi kullanılır [7,22, 26, 28-30].

2.3.2. APEX Reaktörünün Bileşenleri

APEX hibrit reaktöründe yakıt, soğutucu ve yapısal malzeme seçiminin doğru yapılması önemlidir. Yakıt, soğutucu ve yapısal malzeme; gerekli ve yeterli enerji elde edilmesi, fisil yakıt ve trityum üretimi için önemli bileşenler olarak sıralanabilir.

2.3.2.1. Yakıt

Füzyon reaktörlerinde, yüksek enerjinin elde edilip diğer reaksiyonların yürütülebilmesi için yakıt olarak D-D ya da D-T füzyon yakıtları kullanılır. APEX hibrit reaktöründe ise D-D yakıtı ile elde edilen enerji D-T yakıtına göre daha az olması nedeniyle yakıt olarak D-T füzyon yakıtı tercih edilir. Yüksek sıcaklıkta D-T füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için bir araya gelen döteryum ve trityum çekirdeklerinin füzyonu ile oluşması istenen plazma elde edilir. Plazmadan yaklaşık 3,5 MeV enerjili alfa parçacığı ve yaklaşık 14,1 MeV enerjili füzyon nötronları açığa çıkar. Alfa parçacığı sahip olduğu enerjiyi füzyon reaksiyonunun devam edebilmesi ve plazmanın ısıtılması için plazmaya aktarır. Füzyon nötronlarının ise sahip oldukları enerji, fertil yakıtların dönüşümü için kullanılır. Dönüşüm için gerekli olan fisyon reaksiyonunu yaptırarak fisil yakıt ve fisyon nötronlarının üretimini sağlar. D-T füzyon reaksiyonu ile plazmadan çıkan ve diğer nükleer reaksiyonlar ile elde edilen nötronlar, lityumlu tabaka ile reaksiyonu ile D-T füzyonunun devam edebilmesi için gerekli olan trityum elde edilmiş olur.

APEX hibrit reaktöründe; D-T yakıtının kullanılması ile ihtiyaç duyulan yüksek enerji, fisyon reaktörlerinde yakıt hammaddesi olan fisil yakıt üretimi, reaktörün çalışması ve D-T füzyon reaksiyonunun devam edebilmesi için gerekli olan trityum üretimi elde edilmektedir [35-41].

2.3.2.2. Soğutucu

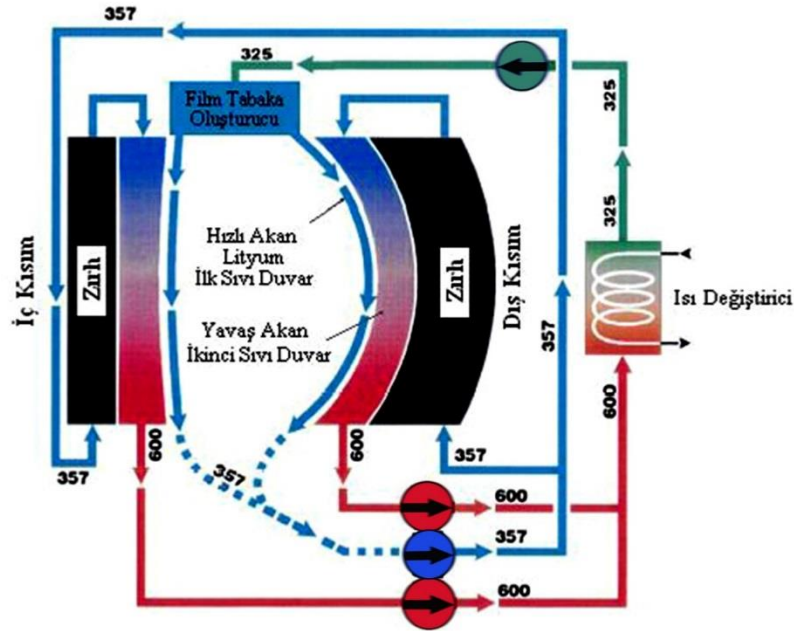
Reaktörün yapısal malzemesinin hasar görmesine engel olmak ve açığa çıkan ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için ısı iletimini sağlayan enerji taşıyıcı malzemelere soğutucu denir. Reaktörlerde soğutucu olarak sıvı ve gaz soğutucular kullanılır. APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak genellikle, ısı iletiminde etkili olan sıvı soğutucular tercih edilmektedir. İyi bir soğutucu seçiminde dikkat edilmesi gereken özellikler şunlardır;

1. Düşük yoğunluk,
2. Düşük trityum çözünürlüğü,
3. Düşük erime noktası ve düşük buhar basıncı,
4. Düşük maliyet,
5. Trityum üretimi için yüksek lityum atomik yoğunluğu,
6. Yüksek kimyasal kararlılık,
7. Yüksek termal iletim,

Özelliklerinin sağlanması gereklidir. D-T füzyon yakıtı kullanan APEX hibrit reaktöründe, reaktörün ve D-T füzyon reaksiyonunun sürekli oluşabilmesi için gerekli trityumun elde edilmesi gereklidir. Lityum ile reaksiyon sonucunda trityum üretildiğinden soğutucu (enerji taşıyıcı), yeterli trityum üretimini sağlamak için lityum içeren bir sıvı seçilmelidir. Buna göre, APEX hibrit reaktöründe D-T füzyon reaksiyonu ile plazmadan çıkan ve diğer nükleer reaksiyonlar ile elde edilen nötronlar, lityumlu tabaka ile reaksiyona girerek reaktör için gerekli olan trityum elde edilmiş olacaktır. APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak Flibe (Li_2BeF_4), Flinabe eriyik tuzları ile $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$, Li, $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ sıvı metalleri tercih edilmiştir [7,12, 22-33, 42-51].

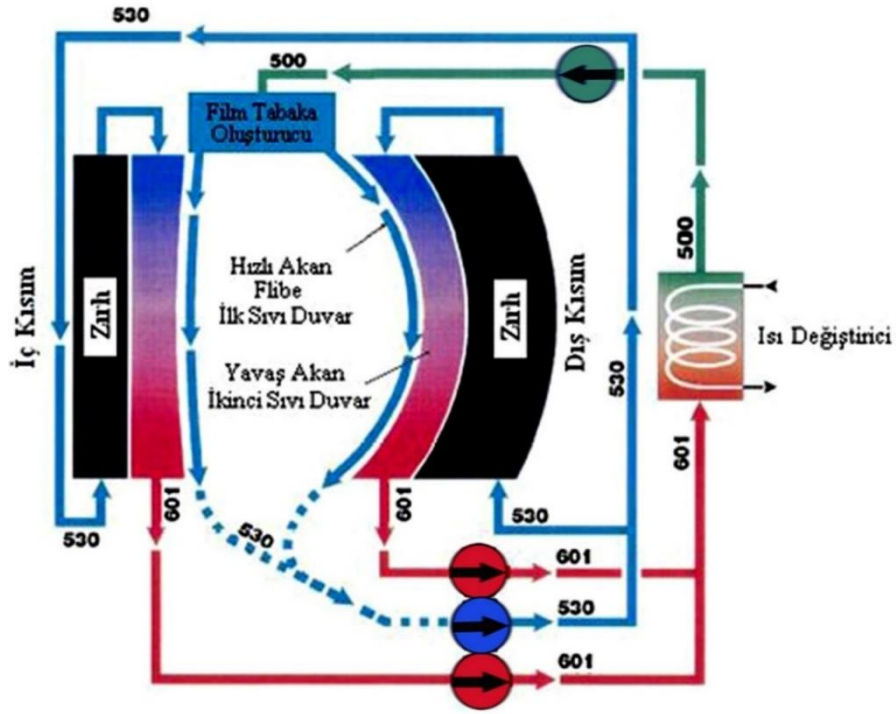
APEX hibrit reaktöründe yüksek trityum üretimi nedeniyle soğutucu olarak bir alkali metal olan lityum sıvı metali tercih edilmiştir. Doğal lityumun, lityum atom yoğunluğu ve nötron yakalaması diğer soğutucu adaylarından daha yüksektir. Bu nedenle trityum üretimi istenilen düzeydedir. Ancak ısı iletimi istenilen düzeyde değildir. Bunun dışında lityumun su ve hava ile reaksiyon verme ihtimali yüksektir. Bu sebeple soğutucu olarak lityum dışındaki alternatif olabilecek malzemelerin trityum üretimi ve kimyasal özellikleri incelenmiştir [7,29-31, 33-39, 44-51].

APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak kullanılan Li sıvı metalinin Şekil 2.10’da reaktörün ilgili bölgeleri için derece cinsinden sıcaklıkları gösterilmiştir [53]. Son yıllarda Flinabe eriyik tuzu ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metali soğutucularının trityum üretimi incelenmiştir. Bu soğutucu adayları erime noktaları ve buhar basınçları istenilen değerlerden düşük olduğundan dolayı tercih edilmişlerdir. Flinabe’nin lityum yoğunluğu $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metalinden yüksektir. Ancak Flinabe’de bulunan Flor (F) elementinin nötron yakalama tesir kesiti yüksek olduğundan dolayı, Flinabe ile reaksiyondan çıkan nötronlar azalır. Flinabe ile nötronlar azaldığı için daha az sayıda nötron, lityum ile trityum üretimi için reaksiyona gireceğinden Flinabe’nin trityum üretimi $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metalinden daha düşüktür [7,12, 26-35, 42-52].



Şekil 2.10. Lityum için sıcaklık akış şeması

$\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metalinin buhar basıncı, $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ sıvı metalinden daha düşüktür. Plazmanın kararlılığı, enerji taşıyıcı sıvının elektriksel iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir. Flibe, düşük aktivasyon ve düşük elektriksel iletkenliğine sahip olması ile soğutucu olarak tercih edilir [7,12, 22-33, 42-51]. APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak kullanılan Flibe eriyik tuzunun Şekil 2.11’de reaktörün ilgili bölgeleri için derece cinsinden sıcaklıkları gösterilmiştir [53].



Şekil 2.11. Flibe için sıcaklık akış şeması

2.3.2.3. Yapısal Malzeme

Hibrit reaktörün güç yoğunluğunun artırılması ve nötronik performanslarını geliştirilmesi için yüksek nötron duvar yükü kullanmak gereklidir. Yüksek nötron duvar yüküne ulaşmak için de reaktörde yapısal malzeme kullanılır. İstenilen özelliklerde yapısal malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken özellikler şunlardır;

1. Yüksek sıcaklık,
2. Yüksek enerjili nötronlara karşı düşük radyasyon zararı,
3. Yüksek termal iletim,
4. Nükleer reaksiyonlar ile düşük hidrojen ve helyum üretimi,
5. Düşük aktivasyon özelliklerinin sağlanması gereklidir.

Bu özellikleri taşıyan yapısal malzeme olarak alaşımlar ve yansıtıcı metaller kullanılır. Alaşım olarak; Niobium (Nb), Tantalium (Ta), Krom (Cr), Molibden (Mo) ve Tungsten(W) kullanılır.

Yansıtıcı metal olarak; Ferritic steel (9Cr-2WVTa), vanadium alaşımları (V-4Cr-4Ti) ve SiC kullanılır. Belirlenen yapısal malzemeler yüksek sıcaklığa, yüksek nötron duvar yüküne ve düşük aktivasyon özelliklerine sahiptirler. Yansıtıcı metaller sahip olduğu yüksek sıcaklık, iyi ısı iletimi, düşük aktivasyon özelliklerinden dolayı füzyon reaktörlerinde soğutucu olarak da kullanılabilirler [7,23, 27-31, 46, 47, 54].

3. BİLGİSAYAR KODLARI ve TESİR KESİTİ KÜTÜPHANELERİ

Çalışmada kullanılan bilgisayar kodları ve nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphaneleri olmak üzere iki alt bölümde incelenmiştir.

3.1. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo yöntemi karmaşık bir olayı veya deneyi istatistik yöntemler kullanılarak modelleme yapan bir tekniktir. Çok elemanlı sistemlerin özelliklerinin hesaplanmasında güçlü bir yöntemdir. Monte Carlo yönteminde rasgele sayılar üretilerek tahmini süreçlerin canlandırılması istenir. Problemin çözülebilmesi için olasılıklar göz önüne alınarak benzerlik kurulmaya çalışılır.

Monte Carlo Yöntemi, Los Alamos laboratuvarında nükleer silah geliştirme projesinde çalışan bilim adamları tarafından bulunmuştur. Monte Carlo Yöntemi 1930'lerden sonra hızla gelişmiştir. Monte Carlo şehrinde rasgele sayılarla oynanan rulet ve diğer oyunlara benzerliği nedeniyle Simülasyon kelimesinin modern anlamda kullanılışı 1940 yılı sonlarında John Von Neumann ve Stanislaw Ulam'ın çalışmalarına Monte Carlo Simülasyonu adını vermeleri ile başlamıştır [55,56].

Günümüzde Monte Carlo yöntemi matematikte ve sosyal bilimlerde kullanımı tercih edilmektedir. Deneysel örneklem aracılığı ile model kurma amacı bu yöntemin fizik alana uygunluğunu artırmaktadır. Fizikte Monte Carlo yöntemi; istatistik fizik, katı hal fiziği ve nükleer fizikte kullanılmaktadır.

3.1.1. MCNP (Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu)

MCNP; Monte Carlo grubu tarafından Los Alamos laboratuvarında teorik fizik için geliştirilmiş 40000 satır fortran ve yorumlar içeren 1000 satır C kaynak kodlayıcı ve programı uygulayan genel bir bloğa sahiptir. Bu kod 1940 yıllarında nükleer savunma ve nükleer silahlar için geliştirilmiş bir koddur. 2.Dünya Savaşı'nda Los Alamos'da ilk atom bombası geliştirilmiştir [56].

MCNP; nötron, foton ve elektronların zamana bağlı sürekli enerji geçişini üç boyutlu geometride çözen genel bir koddur. MCNP kodu hem sabit kaynak hem de kritik altı problemleri çözecek özelliktedir. MCNP kodu tesir kesiti verilerini kullanması nedeniyle karmaşık parçacık geçişini modellemede oldukça iyi

uygulanmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan nötron enerjisi 10^{-11} MeV ile 25 MeV aralığındadır [56].

MCNP'nin kullanıldığı bazı uygulama alanları nükleer güvenlik, radyasyon koruması, dedektör analiz ve dizaynı, sağlık fiziği, hedef hızlandırıcı dizaynı, radyoterapi, fisyon ve füzyon reaktör tasarımı olarak sıralanabilir [55,56].

3.1.2. MCNPX-2.7.0 (Monte Carlo N- Particle Extending Code)

Nükleer mühendislikte düşük enerjilerde radyasyon taşınımında başarılı olan MCNP kodu ile yüksek enerjili radyasyon taşınımında kullanılan LAHET (Los Alamos High Energy Transport) kodu ile birleştirildiğinde parçacıklar hemen hemen tüm enerjilerde tam olarak taşınabilmiştir. MCNP ve LAHET kodlarının birleştirilmesi ile geliştirilen yeni kod MCNPX adını almıştır. İki kodun birleşimi olan MCNPX nükleer mühendislikte yüksek enerji uygulamalarında tam olarak radyasyon taşınımına imkan sağlamıştır. MCNPX yeni kodda sürekli doğrulama ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. MCNPX kod gelişiminin kalite, değer ve özellik olmak üzere önemli üç yönü vardır.

MCNP-4B ve LAHET-2.8'in birleşmiş kodu 1994'te MCNPX yüksek enerjili taşınım kodu, olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak 1999'da MCNPX-2.1.5 versiyonu yayımlanmıştır. MCNP-4C ve Fortran 90 ile 12 yeni özellik geliştirilerek 2002'de MCNPX-2.4.0 versiyonu yayımlanmıştır. 2005'te MCNPX-2.5.0, 2008'de MCNPX-2.6.0 versiyonu, 2011'de son versiyon MCNPX-2.7.0 yayımlanmıştır [56-58]. Çalışmada 2011'de yayımlanan MCNPX-2.7.0 versiyonu kullanılmıştır.

MCNPX kodu, proton ve nükleer etkileşmeler için 1-150 MeV ve nötronlar için 20-150 MeV arasındaki enerjilerde kullanılan yeni nükleer bilgileri kapsamaktadır. MCNPX programının kullanıldığı alanlar;

1. Özellikle nötron saçılma deneyleri için hızlandırıcı ile parçalanma hedeflerinin tasarım araştırmalarında,
2. Hızlandırıcı kullanılarak nükleer atıkların dönüşümünü kapsayan izotop üretim ve imha etme programları araştırmalarında,
3. Hızlandırıcı Güdümlü Sistemlerin enerji kaynakları araştırmasında,

4. Tıbbi fizikte, proton ve nötron terapisi ve görüntüleme yöntemlerini kullanan dallarında,
5. Yüksek uçuş seviyesinde bulunan uçaklar ve uzay araçlarının kozmik geri plan ışımasından korunması için yapılan araştırmalarda,
6. Plazmada yüklü parçacıkların izlenmesinde,
7. Nötrino deneyleri konusunda yapılan araştırmalarda,
8. Yüklü parçacıklar kullanılarak tanımlama teknolojileri konusunda,
9. Nükleer güvenlik konusunda,
10. Radyasyondan korunma konusunda,
11. Filyon ve füzyon reaktör tasarımında

MCNPX-2.7.0'da nötronlar için özel bir tesir kesiti hesaplamasında ENDF/B-VII.0 gibi bir kütüphanede verilen tüm reaksiyonlar göz önünde bulundurulur [57,58].

MCNPX-2.7.0'da kullanılan temel sabitler;

- Uzunluk cm cinsinden
- Enerjiler MeV cinsinden
- Zaman saniye (10^{-8} s) cinsinden
- Sıcaklık kT cinsinden
- Atomik yoğunluklar atom/barn.cm cinsinden
- Kütlese! yoğunluklar g/cm³cinsinden
- Tesir kesiti barn(10^{-24} cm²) cinsinden,
- Isıtma sayısı MeV/çarpışma cinsinden
- Avagadro sayısı= $6,025 \times 10^{23}$

MCNPX kodunun kullanılmasının avantajları; simülasyonların sağladığı genel avantajları sağlamaktadır. Esnek bir çözüm yöntemidir. Aşamalı olarak uygulayabilme imkânı vardır. Klasik çözüm yöntemlerinin kullanılamadığı büyük karmaşık problemlerin çözümünde oldukça etkilidir. Bir başka yöntemde incelenmesi olanaksız olan koşullar ve kısıtlar simülasyon ile rahatça modellenebilir. Sonuçları ancak aylar, yıllar sonra alınabilecek durumlarda simülasyon ile çok kısa sürede analiz edilebilir. Simülasyon, modellenen sistemi değiştirmeden yeni fikir ve politikaların model üzerinde rahatça uygulamasına olanak verir. Kullanıcı simülasyonu istenen zamanda

durdurup yeniden başlatabildiğinden deney koşullar üzerinde tam bir kontrole sahip olması olarak sıralanmaktadır [55].

3.2. Tesir Kesiti Kütüphaneleri

Nükleer teknoloji alanında yapılan çalışmalarda tüm parametrelerinin hesaplamaları tesir kesitine bağlıdır. Nükleer teknolojinin birçok uygulamaları için 20 MeV üzerindeki enerjilerde nötron reaksiyon tesir kesitleri gereklidir. Nükleer reaksiyon tesir kesiti verileri deneysel ölçüm, teorik hesaplamalar ve değerlendirilmiş nükleer veri dosyaları “Evaluated Nuclear Data File (ENDF)” olmak üzere üç farklı yolla elde edilmektedir. Dünyada uluslararası bir nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanesi yoktur. Ancak bazı ülkelerin geliştirdiği ENDF/B, JENDL, JEFF, BROND, CENDL gibi nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphaneleri vardır.

Nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphaneleri, birincil nötronların 10^{-10} eV’tan 150 MeV’e kadar olan enerji bölgelerinde atom numarası 1’den 98’e kadar sınırlanmış 98 çekirdek ve bu çekirdeklerin izotopları için taşınma, ısınma (heating) ve güvenlik uygulamalarını içerir. 20 MeV altındaki tesir kesiti verileri, nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanelerinden alınır. 20 MeV üzerindeki enerjilerde yayınlanan parçacıkların enerji ve açısal dağılımlarının değerlendirilmesi, mevcut deneysel verilerin analizi ve kodların yardımı ile biçimlendirilir [57,59]. Bir nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanesi yalnızca temel fizik verilerinin doğruluğunu sağlamak için değil aynı zamanda daha iyi performans, genel etki ve uygulanan simülasyonlar için geliştirilir. Bu özellikle nükleer kritiklik uygulamaları için önemlidir. Nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanelerinin seçimi her nükleer modelleme çalışması için önemlidir. Çalışmada ENDF/B ve JENDL tesir kesiti kütüphaneleri kullanılmıştır.

3.2.1. ENDF/B-VII.0 Kütüphanesi

ENDF/B tesir kesiti kütüphanesi A.B.D.’de geliştirilmiştir. Nükleer bilim ve uygulamalarında kullanmak için değerlendirilmiş nükleer veri dosyası “Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B)” adını almıştır. Tesir kesiti değerlendirme çalışma grubu ENDF/B nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanesinin geliştirilmesi için “Cross Section Evaluation Working Group (CSEWG)” 1966 yılında kurulmuştur. CSEWG

sanayi, üniversite ve ulusal laboratuvarlarda üyelerin katılımı ile oluşturulmuştur. CSEWG; uluslararası atom enerjisi ajansı “International Atomic Energy Agency (IAEA, Vienna)” ve OECD nükleer enerji ajansı “OECD Nuclear Energy Agency (NEA, Paris) ile diğer ulusal tesir kesiti değerlendirme projelerinin ortak işbirliğinden faydalanmıştır. 1966’dan iki yıl sonra ilk ENDF/B versiyonu, 1968 yılından 2006 yılına kadar ENDF/B kütüphanesinin yedi farklı versiyonları yayımlanmıştır. Geniş çaplı araştırmalar ve ilaveler sonunda yeni versiyonlar yayımlanmıştır [57,59]. ENDF/B kütüphanesi genellikle MCNP ile kullanılmaktadır. Çalışmada son versiyonu ENDF/B-VII.0 kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan ENDF/B-VII.0 kütüphanesi; nötron, termal saçılma, proton ve fotonükleer verilerinden oluşur. fotonükleer, fotoatomik, bozunma verisi, kendiliğinden fisyon ürünleri, atomik reaksiyon, nötron reaksiyon, nötron fisyon ürünleri, termal nötron saçılması, nötron tesir kesiti standartları, elektroatomik, proton etkileşim reaksiyonları, döteron etkileşim reaksiyonları, triton etkileşim reaksiyonları ve ^3He etkileşim reaksiyonları alt kütüphaneden oluşmuştur. 10^{-5}eV - 20 MeV nötron enerji aralığında 393 izotopun verilerini içermektedir [60].

3.2.2. JENDL-4.0 Kütüphanesi

Japonya Atom Enerjisi Kurumu (Japanese Evaluated Nuclear Data Library = JAEA) ve Nükleer Veri Merkezi (The Nuclear Data Center =NDC) ile Japon Nükleer Veri Komitesi (Japanese Nuclear Data Committee =JNDC) işbirliği ile Japonya nükleer tesir kesiti kütüphanesi (Japanese Evaluated Nuclear Data Library=JENDL) oluşturulmuştur. 1977 yılında ilk versiyonu JENDL-1 daha sonra 1982 yılında JENDL-2, 1989 yılında JENDL-3, 1990 yılında JENDL-3.1, 1994 yılında JENDL-3.2, 2002 yılında JENDL-3.3 ve son versiyon 2010 yılında JENDL 4.0’dır. JENDL kütüphanesi, füzyon, aktinit ve dozimetri dosyaları olmak üzere 3 alt kütüphaneden oluşmuştur. Çalışmada son versiyon JENDL-4.0 kullanılmıştır. JENDL-4.0 kütüphanesi 10^{-5}eV - 20 MeV nötron enerji aralığında ENDF-6 formatında 406 izotopun verilerini içermektedir [61].

4. HESAPLAMALAR

APEX füzyon reaktör teknolojisinden faydalanarak bu çalışmada yeni bir APEX hibrit reaktör modeli tasarlandı. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi tasarlanan APEX hibrit modeli büyük yarıçapı 552 cm olan bir torus şeklindedir. Çalışmada kullanılan APEX hibrit reaktör tasarımında bölge, bölge yarıçapları ve bölge kalınlıkları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. İlk kesit torusun merkezinden plazmaya kadar olan iç kısmı, ikinci kesit ise plazmanın merkezinden reaktörün dış bölgesine kadar olan dış kısmı oluşturur. APEX hibrit reaktör tasarımında kullanılan yapı malzemeleri ve bölgelere göre sıralaması şöyledir;

Torusun merkezi: Bu bölgede 230 cm çapa sahip manyetik alanla veya eylemsiz olarak sınırlandırılmış plazma bulunur. D-T yakıtının kullanılarak füzyon reaksiyonunun meydana geldiği bölge plazmadır.

1. Bölge: Plazma ile ilk sıvı duvar arasında bulunan boşluk bölgesidir. İç ve dış kısımlarda çapı 28 cm olan bu boşluk, plazmanın ilk sıvı duvarla temasını önler. Bu boşluk plazmanın kirlenmesini engellerken aynı zamanda ilk duvarın yüksek plazma sıcaklığından çok daha az etkilenmesini sağlar.

2. Bölge: Boşluk ile ikinci sıvı duvar arasında yer alan ilk sıvı duvar bölgesidir. Hızlı akan bu sıvı duvarın iç ve dış kısımlarda çapı 2 cm’dir. Plazmanın çevresinde füzyon reaksiyonu sonucunda oluşan 14,1 MeV’lik yüksek enerjili nötronların en çok hasarı meydana getirdiği bölgedir. Bölgenin amacı, plazmadan açığa çıkan yüklü parçacıkları hapsedmektir. Bu bölgenin sıvı duvar olması oluşan hasarın çok daha az olmasını sağlar. Ayrıca sürekli yenilenebilir yapıda olması sürekli yeni bir duvar oluşmasını sağlar.

3. Bölge: İlk sıvı duvarın hemen arkasında yer alan ve yavaş akan ikinci sıvı duvar bölgesidir. Çapı bu çalışma için iç ve dış kısımlarda 50 cm olarak kullanılmıştır. Bu duvarın amacı, nötronlardan dolayı açığa çıkan radyasyon enerjisini hapsederek ısıya çevirmek ve plazmadan açığa çıkan yüksek enerjili nötronları soğurarak yapısal malzemede radyasyon hasarının önemli oranda azalmasını sağlamaktır.

4. Bölge: İkinci sıvı duvarın yaslandığı yapısal malzemedir. İç ve dış kısımlarda çapı 4 cm’dir. Bu bölgede iki farklı yapısal malzeme ayrı ayrı kullanılmıştır. Birincisi Ferritic steel (9Cr-2WVTa), ikincisi ise Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlarıdır. Bu bölge; zırh ve ikinci sıvı duvar arasında bir köprü oluştururken ikinci sıvı duvardan geçen nötronların etkisinde kalır.

5. Bölge: Çelik duvarın arkasında yer alan zırh (koruyucu) bölgesidir. İç kısımda 49 cm ve dış kısımda 50 cm çapında olan koruyucu bölgenin %60 yapısal malzeme ve %40 üretici/soğutucu akışkan içermektedir. Bu bölge, ikinci sıvı duvarı geçen nötronların reaktörün dışına ilerlemelerini ve reaktöre zarar vermelerini engeller.

6. Bölge: Zırh bölgesinin hemen arkasında olan boşluk bölgesidir. İç kısımda 5 cm ve dış kısımda 34 cm çapında olan bölgedir. Zırhta biriken füzyon enerjisinin konveksiyonla reaktörün dış kısımlarına geçmesi, yalıtım görevi yapan bu bölge tarafından önlenmektedir.

7. Bölge: Boşluktan sonra gelen çelik (SS316LN) bölgesidir. İç ve dış kısımlarda 2 cm çapındadır. Bu bölge füzyon için gerekli olan düşük basıncı sağlamakla görevlidir. Bölge %100 SS316LN olup içerisinde farklı yüzdelere sahip Fe, Cr, ⁵⁵Mn, Si, Ni, Mo, ⁹³Nb, ⁵⁹Co, Cu elementleri bulunur.

8. Bölge: Çelik (SS316LN) bölgesinden sonra gelen vakum odası (Vakum Vessel) bölgesidir. İç kısımda 16 cm ve dış kısımda 26 cm olan bölgedir. Bölgenin %80 SS316LN ve %20 H₂O içermektedir. Bu bölge içerisinde farklı yüzdelere sahip Fe, Cr, ⁵⁵Mn, Si, Ni, Mo, ⁹³Nb, ⁵⁹Co, Cu, H, O elementleri bulunur.

9. Bölge: Vakum odasından sonra çelik (SS316LN) bölgesidir. İç ve dış kısımlar, bölgede kullanılan malzeme ve malzeme içerikleri 7. Bölgenin aynısıdır.

Tasarlanan APEX hibrit reaktör modelinin bölgelerinde yer alan malzemeler, bölgelerin içerdiği izotoplar ve izotopların bulunma oranları, bölgelerin kütleli ve atomik yoğunlukları Çizelge 4.1-12’de gösterilmiştir. Çalışmada enerji taşıyıcı sıvı olarak LiF ve BeF₂ tuzu olan Flibe (Li₂BeF₄) kullanıldı. Flibe eriyik tuzu için sıcaklık akış şeması Şekil 2.10’da verilmiştir. Flibe sıvı tabakası; radyasyon ve aktivasyon gibi yapısal malzemelere hasar veren parametreleri önemli ölçüde azalması nedeniyle tercih edilmektedir [7, 24, 26, 29, 31, 32].

Bu çalışmada ilk sıvı duvar kalınlığı 2 cm, ikinci sıvı duvar kalınlığı 50 cm’dir. Çalışmada yapılan APEX hibrit reaktörü tasarımı; ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %100 Flibe, %10 UF₄, %10 ThF₄ ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanlar ve Ferritic Steel ile Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemeler kullanarak yapılmıştır.

Çalışmada tasarlanan APEX hibrit reaktöründe ENDF/B-VII.0 ve JENDL- 4.0 kütüphaneleri için ⁶Li oranı ile seçilen akışkanların, seçilen yapısal malzemeler üzerindeki etkisi araştırıldı. ⁶Li oranı %15, %16, %17, %18, %19 ve %20 oranlarında altı farklı akışkan kullanılarak incelendi.

Çalışmanın amacı, tasarlanan APEX hibrit reaktöründe seçilen 2 farklı kütüphane ve yapısal malzemenin kullanılması, altı farklı ${}^6\text{Li}$ oranı değişimi ile seçilen akışkanlar için hesaplanan nötronik sonuçların nasıl değiştiğini incelemektir.

Tasarımda seçilen kütüphaneler, yapısal malzemeler, ${}^6\text{Li}$ oranı ile değişen akışkanlar için reaktörün ilgili bölgelerinde trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltma faktörü (M), ısı enerjisi (heating), proton üretimi, döteryum üretimi, trityum üretimi, ${}^3\text{He}$ üretimi, ${}^4\text{He}$ üretimi, fisil yakıt üretimi ve fisyon reaksiyon sayısı hesaplanmıştır.

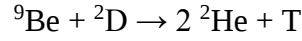
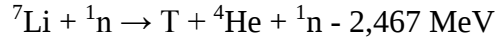
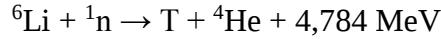
Çalışmada ilk sıvı duvardaki nötron duvar yükünün 10 MW/m^2 ve reaktör füzyon gücünün 4 GW olduğu kabul edilmiştir. Üç boyutlu tasarım ve hesaplamalar MCNPX-2.7.0 Monte Carlo kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MCNPX-2.7.0'da yapılan hesaplamalar $300 \text{ }^\circ\text{K}$ 'deki sıcaklık için yapılmıştır. Hesaplamalarda Monte Carlo metodunda sonuçların hata payının kabul edilebilir mertebelerde olabilmesi için hazırlanan 36 inputta bilgisayarda hesaplama MCNPX-2.7.0'da izlenen parçacık sayısı ENDF/B-VII.0 ve JENDL- 4.0'da ortalama 900000'dir.

4.1. Trityum Üretim Oranı (Tritium Breeding Rate)

Sistemdeki trityumun üretim oranının plazmadaki trityumun yanma miktarına oranı trityum üretim oranı (TBR) olarak ifade edilir. D-T yakıtı kullanan reaktörde, reaksiyonunun sürekli olabilmesi için ihtiyaç duyduğu trityumu üretebilmelidir. Bu nedenle böyle bir reaktörde ihtiyaç duyulan trityumun reaktöre yetebilmesi için trityumun TBR değerine eşit veya daha büyük olması gereklidir. Bu nedenle D-T yakıtı kullanan bir reaktörde $\text{TBR} > 1,1$ olmalıdır [7, 22, 23, 31, 32, 41, 52]. Reaktörün lityum içeren bölgelerinden trityum üretilir. Doğal lityum ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ izotoplarından oluşur. ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ 'nin nötronlarla reaksiyonu sonucu trityum elde edilir [12, 35].

Çalışmada trityum üretiminin sağlanabilmesi için ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde lityum içeren Flibe eriyik tuzu kullanılmıştır. Doğal lityum %7,56 oranında ${}^6\text{Li}$ ve %92,44 oranında ${}^7\text{Li}$ izotopundan oluşur. Plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlar önce, trityum içeren ilk sıvı duvar ile temasa geçer. ${}^6\text{Li}$ termal nötronlarla, ${}^7\text{Li}$ hızlı nötronlarla reaksiyon verdiğinden plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlar lityumlu bölgede Li izotopları ile reaksiyon verir.

Trityum üretimi için nükleer reaksiyonlar;



Flibe'deki lityum için yapılan bu çalışmalardan sonra, D-T yakıtı kullanarak yaptığımız APEX hibrit reaktörü tasarımında, trityumun kendi kendine yetebilmesi için gerekli olan doğal lityum içeren Flibe eriyik tuzunun bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde TBR değeri hesaplandı. Çizelge 6.13-6.14'de TBR'nin ${}^6\text{Li}$ oranı, %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve iki farklı yapısal malzemeye göre seçilen kütüphanelerdeki sonuçları gösterilmiştir.

ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphanelerinin kullanımı ile reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde trityumun kendi kendine yetebilmesi şartı olan $\text{TBR} > 1,1$ değeri sağlanmıştır. Trityum; ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ 'den elde edildiğinden TBR'ye en büyük katkı ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ izotoplarından gelir. F elementinin inelastik saçılma yapıp nötronun sahip olduğu enerjiyi değiştirmesi, Be elementinin (n,2n) reaksiyonu veren iyi bir nötron çoğaltıcısı olması TBR üzerinde etkili olmuştur. Lityumun bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde trityum üretiminin yeterli oranda olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.13'te ENDF/B-VII.0 ve Çizelge 4.14'de JENDL-4.0 kütüphanesi için Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanarak TBR değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde %100 Flibe, %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılmıştır. Çizelge 4.13-4.14'de ${}^6\text{Li}$ oranına göre elde edilen toplam TBR değerinin; Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme kullanıldığında Ferritic Steel yapısal malzemesine göre yaklaşık %1 oranında daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Çizelge 4.13-4.14'te ${}^6\text{Li}$ oranına göre elde edilen toplam TBR değerinin; JENDL-4.0 kütüphanesi kullanıldığında ENDF/B-VII.0 kütüphanesine göre yaklaşık %2 oranında daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Çalışmada ${}^6\text{Li}$ oranı %15-20'ye kadar incelenmiştir. Çizelge 4.13-4.14'te ${}^6\text{Li}$ oranı %15'ten %20'ye kadar arttırıldığında, %100 Flibe için hesaplanan TBR değerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın nedeni akışkandaki ${}^6\text{Li}$ zenginliğinin artması ile ${}^7\text{Li}$ oranının azalmasıdır. Plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlar önce, lityum içeren ilk sıvı duvar ile temasa geçer. ${}^6\text{Li}$ termal nötronlarla, ${}^7\text{Li}$ hızlı nötronlarla reaksiyon verdiğiinden plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlar lityumlu bölgede ${}^7\text{Li}$ ile reaksiyon verir. Ancak ${}^6\text{Li}$ zenginliğinin artması ile ${}^7\text{Li}$ oranı azaldığı için ${}^7\text{Li}$ ile oluşan nötron akısı azalır dolayısıyla trityum üretimi de azalır. Bu sonuçlardan, %100 Flibe için hesaplanan TBR değerinin ${}^6\text{Li}$ zenginliği ile azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.13-4.14'te %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanıldığında, %100 Flibe'ye göre %90 Flibe yüzdesi azaldığı için akışkandaki toplam Li oranı azalmıştır. Akışkandaki ${}^6\text{Li}$ oranı %15'ten %20'ye kadar arttıkça genel olarak %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri için TBR değerinin arttığı görülmüştür. TBR'deki bu artışa plazmadan gelen füzyon nötronları ve sıvı duvarda meydana gelen fisyon reaksiyonu sonucu yayınlanan nötronlar sebep olur. U ve Th'un fisyon reaksiyonu ile nötron akısı arttığından, hesaplamalarda kaynak nötronu başına toplam çarpışma sayısı UF_4 ve ThF_4 'un katkısıyla artar. Toplam çarpışma sayısındaki bu artış, ortamdaki ${}^6\text{Li}$ çekirdekleriyle çarpışan nötronların sayısını artırır. Bu sebeple ${}^6\text{Li}$ oranının artması ile %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri için TBR değerinin arttığı görülmüştür.

Çalışmada, TBR değerinin en çok JENDL-4.0 kütüphanesinde, Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemenin, %10 ThF_4 ağır metal karışımlı akışkanın %20 ${}^6\text{Li}$ oranı kullanılması ile elde edilmiştir.

4.2. Enerji Çoğaltma Faktörü (Energy Multiplication Factor)

Sistemdeki toplam depolanma enerjisinin, nötron kinetik enerjisine oranı enerji çoğaltma faktörü (M) olarak ifade edilir. Bir reaktör, D-T yakıtı kullanarak enerji üretiyorsa elde edilen enerji plazma tarafından üretilen enerjiden yüksek olmalıdır. M değeri, termal güç elde etmek için yüksek değere sahip olmalıdır. Bu nedenle D-T yakıtı kullanan bir reaktörde $M > 1,2$ olmalıdır [25, 31].

M'nin hesaplanması;

$$M = 1 + \frac{(\text{İlk sıvı duvar} + \text{İkinci sıvı duvar} + \text{Zırh bölgelerindeki ısı enerjisi})}{14,1 \text{ MeV}}$$

Çizelge 4.15-4.16'da çalışmada kullanılan kütüphaneler için ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde hesaplanan toplam M değeri gösterilmiştir. Çizelge 4.15-4.16'da M'nin ${}^6\text{Li}$ oranı, %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve iki farklı yapısal malzemeye göre seçilen kütüphanelerdeki sonuçları gösterilmiştir. ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphanelerinin kullanımı ile reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde termal güç elde etmek için gerekli olan $M > 1,2$ değeri sağlanmıştır.

M değerleri, Çizelge 4.15'te ENDF/B-VII.0 ve Çizelge 4.16'da JENDL-4.0 kütüphanesi için Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde %100 Flibe, %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılmıştır. Çizelge 4.15-4.16'da ${}^6\text{Li}$ oranı %15'ten % 20'ye kadar arttırıldığında, %100 Flibe ve %10 UF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan için hesaplanan M değerinin arttığı görülmüştür. Bu artışın nedeni, ${}^6\text{Li}$ oranı arttıkça ${}^6\text{Li}$ 'nin nötron ile gerçekleştirdiği reaksiyonun ${}^7\text{Li}$ 'nin nötron ile gerçekleştirdiği reaksiyona göre daha fazla enerji açığa çıkarmasından dolayı akışkandaki artan ${}^6\text{Li}$ 'nin M değerine etkisinin ${}^7\text{Li}$ 'ye göre daha fazla olmasından kaynaklanır.

Çizelge 4.15-4.16'da ${}^6\text{Li}$ oranına göre elde edilen toplam M değerinin; Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme kullanıldığında Ferritic Steel yapısal malzemesine göre çok küçük oranda daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Çizelge 4.15-4.16'da ${}^6\text{Li}$ oranına göre elde edilen toplam M değerinin; ENDF/B-VII.0 kütüphanesi kullanıldığında JENDL-4.0 kütüphanesine göre yaklaşık % 0,5 oranında daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Çizelge 4.15-4.16'da ${}^6\text{Li}$ oranına göre elde edilen toplam M değerinin; %10 UF_4 ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanıldığında %100 Flibe'ye göre yaklaşık %5 ve %10 ThF_4 ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanıldığında %20 daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni; çalışmada Şekil.4.12-4.13'te toryumun fisyon reaksiyon sayısı uranyumun fisyon reaksiyon sayısından daha fazla olduğu bulunduğu için, toryumun

enerji çoğaltma faktörü de uranyumun enerji çoğaltma faktöründen daha büyük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.15-4.16'da %10 UF₄ ve %10 ThF₄ ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanıldığında, tasarlanan modelin, reaktörün ilgili bölgelerinde hesaplanan yüksek termal güç için gerekli olan $M > 1,2$ şartının ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri için sağlandığı görülmüştür.

Sonuç olarak ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde hesaplanan toplam M değeri, tasarlanan APEX hibrit reaktör modelinin enerji ihtiyacını karşılamaktadır. M değerinin en çok ENDF/B-VII.0 kütüphanesinde, Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemenin, %10 ThF₄ ağır metal karışımlı akışkanın % 20 ⁶Li oranı kullanıldığında elde edilmiştir.

4.3. Isı Enerjisi (Heating)

Çalışmada %100 Flibe, %10 UF₄ ve %10 ThF₄ ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımının bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde ısı enerjisi hesaplandı. Plazmadan çıkan nötronların bu bölgelerde nükleer reaksiyon ve fisyon reaksiyonu yapması, ısı enerjisinin oluşmasında etkili olmuştur. Çalışmada, ısı enerjisi W/cm³ birimi cinsinden hesaplandı.

Isı enerjisi değerleri Çizelge 4.17'de ENDF/B-VII.0 ve Çizelge 4.18'de JENDL-4.0 kütüphanesi için Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde %100 Flibe, %10 UF₄ ve %10 ThF₄ ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılmıştır. Çizelge 4.17-4.18'de ⁶Li oranına göre elde edilen toplam ısı enerjisi değerinin; Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme kullanıldığında Ferritic Steel yapısal malzemesine göre çok küçük oranda daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Çizelge 4.17-4.18'de ⁶Li oranına göre elde edilen toplam ısı enerjisi değerinin; ENDF/B-VII.0 kütüphanesi kullanıldığında JENDL-4.0 kütüphanesine göre yaklaşık %5 oranında daha fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.17'de ENDF/B-VII.0 kütüphanesi, Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemeleri ile ⁶Li oranına göre elde edilen toplam ısı enerjisi değeri hesaplandı. %10 ThF₄ ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan

kullanıldığında %100 Flibe'ye göre yaklaşık %40 ve %10 UF₄ ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkana göre %30 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18'de JENDL-4.0 kütüphanesi, Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemeleri ile ⁶Li oranına göre elde edilen toplam ısı enerjisi değeri hesaplandı. %10 ThF₄ ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanıldığında %100 Flibe'ye göre yaklaşık %45 ve %10 UF₄ ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkana göre %40 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4.17-4.18'de, ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri, Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemeleri, %100 Flibe, %10 UF₄ ve %10 ThF₄ ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanlar için ⁶Li oranı %15'den %20'ye kadar artırıldığında hesaplanan toplam ısı enerjisinin arttığı görülmüştür. Bu artışın nedeni ⁶Li'nin nötron ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan enerjinin ⁷Li'ye göre fazla olması akışkandaki artan ⁶Li'nin toplam ısı enerjisine etkisinin ⁷Li'ye göre daha fazla olmasından kaynaklanır. Ayrıca, Flibe eriyik tuzundaki ⁶Li'nin nötron soğurması, ⁷Li ve F elementinin inelastik saçılma yapıp nötronun sahip olduğu enerjiyi değiştirmesi, Be elementinin (n,2n) reaksiyonu veren iyi bir nötron çoğaltıcısı olmasıdır. Ancak %100 Flibe'ye göre %10 UF₄ ve %10 ThF₄ ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile daha fazla ısı enerjisi elde edilmiştir. UF₄ ve ThF₄ ağır metalindeki ²³⁸U, ²³⁵U ve ²³²Th'un fisyon reaksiyonu yapması ısı enerjisi üretimi üzerinde etkili olmuştur. %10 UF₄ ve ThF₄ ağır metali ile Flibe eriyik tuz karışımlarında ısı enerjisi en fazla ThF₄ ağır metali karışımından elde edilmiştir.

Isı enerjisi değerinin en çok ENDF/B-VII.0 kütüphanesinde, Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemenin, %10 ThF₄ ağır metal karışımlı akışkanın %20 ⁶Li oranı kullanıldığında elde edilmiştir.

4.4. Radyasyon Hasarı

Radyasyon hasarı; yapısal malzemelere yüksek enerji uygulanması ile örgü yapısının bozulması olarak ifade edilir. Plazmaya yakın duvarlarda radyasyon hasarına yüksek enerjili nötronlar neden olmakta ve reaktörün ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenle radyasyon hasarını en aza indirmek için APEX reaktöründe kullanılan ilk sıvı duvar yüklü parçacıkları hapsederken, ikinci sıvı duvar ise nötronlardan dolayı açığa çıkan radyasyon enerjisini hapsederek ısıya çevirir ve yapısal malzemelerin radyasyon

hasarını ve aktivasyonu azaltmasını sağlar. Yapısal malzemede oluşan proton, döteryum, trityum, ^3He ve He üretim oranı değerleri radyasyon hasarı parametreleridir. Hidrojen izotopları olan proton, döteryum ve trityum yapısal malzeme dışına yayılırken, ^3He ve He gazları yapısal malzeme içinde biriktirilir [25,28-31, 36, 53, 54].

Çalışmada radyasyon hasarı parametreleri 30 tam güç yılı (Full PowerYear = FPY) üzerinden hesaplanmıştır. Radyasyon hasarı değerleri ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri ile Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanarak elde edilmiştir. İlk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde %100 Flibe, %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanlar kullanılmıştır.

4.4.1. Proton Üretimi

Şekil 4.3'te ENDF/B-VII.0 kütüphanesi ve Şekil 4.4'te JENDL-4.0 kütüphanesinin ^6Li oranına göre Ferritic Steel yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama proton üretiminin Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama proton üretiminden yaklaşık üç kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.3'te %100 Flibe akışkanı ve Ferritic Steel yapısal malzemesi ile elde edilen en büyük ortalama proton üretimi değerinin, %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en küçük ortalama proton üretimi değerinden yaklaşık 4 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 4.4'te %10 UF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve Ferritic Steel yapısal malzemesi ile elde edilen en büyük ortalama proton üretimi değerinin, %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en küçük ortalama proton üretimi değerinden yaklaşık 3 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 4.3-4.4'te ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri için ortalama proton üretimi değerleri karşılaştırıldığında, ENDF/B-VII.0 kütüphanesinin JENDL-4.0 kütüphanesinden ortalama %20 oranında daha az elde edildiği görülmüştür.

Şekil 4.3-4.4'te ^6Li oranının %15'den %20'ye kadar artması ile ortalama proton üretimi değerinin az miktarda azaldığı gözlenmiştir. Reaktör ömrünün uzaması ve yapısal malzemelerde hasarın en az olması için radyasyon hasarının en küçük değerde olması istenir. Bu sebeple, çalışmada ENDF/B-VII.0 kütüphanesi, Vanadium

(V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme ve %10 ThF₄ ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile en küçük ortalama proton üretimi değeri elde edilmiştir. Ortalama proton üretimi değeri için bu malzemenin seçilen diğer kütüphane, yapısal malzeme ve akışkanlara göre daha uygun olduğu görülmüştür.

4.4.2. Döteryum Üretimi

Şekil 4.5'te ENDF/B-VII.0 kütüphanesi ve Şekil 4.6'da JENDL-4.0 kütüphanesinin ⁶Li oranına göre Ferritic Steel yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama döteryum üretiminin Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama döteryum üretiminden daha az olduğu görülmüştür.

Şekil 4.5'te Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi ile %100 Flibe akışkanı kullanılması ile elde edilen en büyük ortalama döteryum üretiminin, Ferritic Steel yapısal malzemesi %10 ThF₄ ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile elde edilen en küçük ortalama döteryum üretimi değerinden ortalama %25 daha fazla değer aldığı hesaplanmıştır. Şekil 4.6'da Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi ile %10 UF₄ ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile elde edilen en büyük ortalama döteryum üretiminin, Ferritic Steel yapısal malzemesi %10 ThF₄ ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile elde edilen en küçük ortalama döteryum üretimi değerinden yaklaşık 10 kat büyük değer aldığı hesaplanmıştır.

Şekil 4.5-4.6'da ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri için ortalama döteryum üretimi değerleri karşılaştırıldığında birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. En küçük ve en büyük ortalama döteryum üretimi değerlerinin JENDL-4.0 kütüphanesi kullanılması ile elde edilmiştir.

Şekil 4.5-4.6'da ⁶Li oranının %15'den %20'ye kadar artması ile reaktörün yapısal malzemesinde döteryum üretiminin ortalama %2 azaldığı hesaplanmıştır. Çalışmada JENDL-4.0 kütüphanesinin Ferritic Steel yapısal malzemesi ile %10 ThF₄ ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile ortalama döteryum üretiminin en az değeri elde edilmiştir. Ortalama döteryum üretimi değeri için bu malzemenin seçilen diğer kütüphane, yapısal malzeme ve akışkanlara göre daha uygun olduğu görülmüştür.

4.4.3. Trityum Üretimi

Şekil 4.7’de ENDF/B-VII.0 kütüphanesi ve Şekil 4.8’de JENDL-4.0 kütüphanesinin ^6Li oranına göre Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama trityum üretiminin Ferritic Steel yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama trityum üretiminden Şekil 4.7’de iki kat, Şekil 4.8’de ise yirmi kat daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 4.7’de Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi %100 Flibe eriyik tuz akışkanı ile kullanıldığında elde edilen en büyük ortalama trityum üretimi, Ferritic Steel yapısal malzemesinin %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile elde edilen en küçük ortalama trityum üretimine göre yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 4.8’de Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi %10 UF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile en büyük ortalama trityum üretimi, Ferritic Steel yapısal malzemesinin %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile elde edilen en küçük ortalama trityum üretimi değerinden yaklaşık 500 kat büyük olduğu hesaplanmıştır. Bu fark iki yapısal malzemenin özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.7-4.8’de ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphanelerine göre ortalama trityum üretimi karşılaştırıldığında, JENDL-4.0 kütüphanesinin ortalama 10 kat oranında daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.7-4.8’de ^6Li oranının %15’den %20’ye kadar artması ile reaktörün yapısal malzemesinde trityum üretiminin ortalama %2 azaldığı hesaplanmıştır. Yapısal malzeme de ortalama trityum üretiminin meydana gelen radyasyon hasarının az olması için JENDL-4.0 kütüphanesinde Ferritic Steel yapısal malzemesinin %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması uygun olduğu görülmüştür.

4.4.4. ^3He Üretimi

Şekil 4.9’da ENDF/B-VII.0 ve Şekil 6.10’da JENDL-4.0 kütüphanesi için Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanarak ^6Li oranına göre elde edilen ortalama ^3He üretiminin Ferritic Steel yapısal malzemesi kullanıldığında Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemesine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 4.9’da %100 Flibe eriyik tuz akışkanının Ferritic Steel yapısal malzemesi ile kullanıldığında elde edilen en büyük ortalama ^3He üretimi değerinin, %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanın Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesinin ile kullanıldığında elde edilen en küçük ortalama ^3He üretimi değerinden 10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 4.10’da %10 UF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanın Ferritic Steel yapısal malzemesi ile kullanıldığında elde edilen en büyük ortalama ^3He üretimi değerinin, %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanın Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi kullanılması ile elde edilen ortalama ^3He üretimi değerinden yaklaşık 30 kat fazla olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.9-4.10’da ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphanelerine göre ortalama ^3He üretimi karşılaştırıldığında, ENDF/B-VII.0 kütüphanesinin ortalama ^3He üretiminin yaklaşık 30 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.9-4.10’da ^6Li oranının %15’den %20’ye kadar artması ile ortalama ^3He üretiminin ortalama %2 azaldığı görülmüştür.

Reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan ^3He gazı yapısal malzeme ile reaksiyon meydana getirir. Reaksiyon sonucunda ^3He gazı yapısal malzeme içinde kalarak boşluklar oluşmasına neden olur. Bu boşluklar kristal yapının bozulmasına ve yapısal malzemenin özelliğini kaybetmesine neden olur. Bu sebeple, çalışmada JENDL-4.0 kütüphanesi, Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi ve %10 ThF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile en küçük ortalama ^3He üretimi değeri elde edilmiştir. Ortalama ^3He üretimi değeri için bu malzemenin seçilen diğer kütüphane, yapısal malzeme ve akışkanlara göre daha uygun olduğu görülmüştür.

4.4.5. He Üretimi

Şekil 4.11’de ENDF/B-VII.0 ve Şekil 4.12’de JENDL-4.0 kütüphanesi için Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme kullanarak ^6Li oranına göre elde edilen ortalama He üretiminin Ferritic Steel yapısal malzeme kullanıldığında Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 4.11-4.12’de %100 Flibe akışkanı ve Ferritic Steel yapısal malzemesi ile elde edilen en büyük ortalama He üretimi değerinin, %10 ThF_4 ağır metali ile %90

Flibe karışımından oluşan akışkanın Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi ile elde edilen en küçük ortalama ^4He üretimi değerine göre yaklaşık 4 kat fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 4.11-4.12’de ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphanelerine göre ortalama He üretimi karşılaştırıldığında, ENDF/B-VII.0 kütüphanesinin daha az olduğu görülmüştür. Şekil 4.11-4.12’de ^6Li oranının %15’den %20’ye kadar artması ile ortalama He üretimin yaklaşık %2 azaldığı hesaplanmıştır.

Reaksiyon sonucunda He gazı yapısal malzeme içinde kalarak boşluklar oluşmasına neden olur. Bu boşluklar kristal yapının bozulmasına ve yapısal malzemenin özelliğini kaybetmesine neden olur. Bu sebeple, çalışmada ENDF/B-VII.0 kütüphanesi, Vanadium (V-4Cr-4Ti) yapısal malzemesi ve %10 ThF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan kullanılması ile en küçük ortalama He üretimi değeri elde edilmiştir. Ortalama He üretimi değeri için bu malzemenin seçilen diğer kütüphane, yapısal malzeme ve akışkanlara göre daha uygun olduğu görülmüştür.

4.5. Fiyon Reaksiyon Sayısı

Çalışmada ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgesinde %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan, Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemeler, ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri için ^6Li oranına göre ortalama fiyon reaksiyon sayısı hesaplanmıştır.

Plazmada D-T füzyon reaksiyonu sonucu açığa çıkan 14,1 MeV’lik yüksek enerjili nötronlar önce plazmaya en yakın ilk sıvı duvar ile temas eder. Bu bölgede Flibe eriyik tuzu ile akışkan oluşturan, UF_4 ve ThF_4 ağır metallerindeki Uranyum ve Toryum plazmadan çıkan hızlı nötronlarla fiyon reaksiyonu verir. UF_4 ve ThF_4 ağır metalleri çalışmada ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde bulunduğundan bu bölgelerde fiyon reaksiyonu oluşmaktadır.

Şekil 4.13’te UF_4 ve Şekil 4.14’te ThF_4 akışkanları, ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri, Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre fiyon reaksiyon sayısı elde edilmiştir.

Şekil 4.13’te UF_4 ve Şekil 4.14’te ThF_4 ağır metali karışımlı akışkanlar kullanıldığında ^6Li oranına göre JENDL-4.0 kütüphanesi ile elde edilen ortalama fiyon reaksiyon sayısının ENDF/B-VII.0 kütüphanesine göre Şekil 4.13’te ortalama

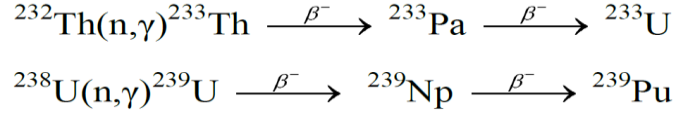
%10, Şekil 4.14'te %4 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.13-4.14'te Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme kullanıldığında Ferritic Steel yapısal malzemesine göre fisyon reaksiyon sayısının çok küçük oranda daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 4.13-4.14'te ortalama fisyon reaksiyon sayıları karşılaştırıldığında ThF₄ ağır metali karışımı akışkanın UF₄ ağır metali karışımı akışkana göre 4 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.13'te UF₄ ve Şekil 4.14'te ThF₄ ağır metali karışımı akışkanlar JENDL-4.0 kütüphanesinde Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemesi ile kullanıldığında en büyük fisyon reaksiyon sayısı değerinin elde edildiği görülmüştür.

Şekil 4.13-4.14'te ⁶Li oranı %15'ten %20'ye artırıldığında ortalama fisyon sayısının Şekil 4.13'te az miktarda, Şekil 4.14'te lineer olarak azaldığı gözlenmiştir. Ortalama fisyon sayısındaki azalmanın nedeni; alışıandaki ⁶Li oranı attıkça ⁷Li azalır. ⁷Li'nin azalması tityum üretimi reaksiyonu ile açığa çıkan yüksek enerjili nötronların yaptığı fisyon reaksiyonlarının azalmasına neden olmasından kaynaklanmıştır.

4.6. Fisil Yakıt Üretimi

Günümüzde enerji üretiminde kullanılan nükleer reaktörlerin yakıt malzemesi fisil yakıtlardır. Fisil yakıtlar; düşük enerjili nötronlar ile fisyon reaksiyonu veren çekirdeklerdir. Bunlar ²³⁵U, ²³³U, ²³⁹Pu'dur. Yüksek enerjili nötronlar ile fisyon reaksiyonu veren maddeler fertil çekirdeklerdir. Bunlar ²³²Th ve ²³⁸U'dur. Doğada bulunan ²³²Th ve ²³⁸U elementlerinin termal nötronlarla fisyon tesir kesitleri çok küçüktür. Bu izotoplar termal nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılamamaktadır. Düşük enerjilerdeki nötronlarla fisyon yapabilen ²³⁵U, ²³³U ve ²³⁹Pu izotopları, ²³²Th ve ²³⁸U'dan elde edilmektedir. Günümüz nükleer reaktörlerinde yakıt olarak kullanılan ²³⁵U izotopu, termal nötronlarla yüksek oranda fisyon yaparak enerji ve yeni nötronlar üretir. Bu yakıt doğada çok az oranda bulunması ile mevcut fisyon reaktörleri uranyumun sadece küçük bir bölümünü kullanmaktadırlar. Doğada bol bulunan ²³⁸U izotopu (n,γ) reaksiyonu ile çok düşük bir verimle, ²³⁹Pu'a dönüşür. Oluşan plütonyumun reaktörün tipine ve çalışma biçimine bağlı olarak bir kısmı yanar bir kısmı da biriktirilir [54].

Çalışmada fisil yakıt üretimi için ^{232}Th ve ^{238}U fertilleri kullanılmıştır. ^{232}Th ve ^{238}U fertillerinden fisil yakıt üretimi için (n,γ) reaksiyonu gereklidir.



Yukarıda da görüldüğü gibi, reaktörde yakıt hammaddesi olan ^{233}U fisil yakıtı ^{232}Th 'un (n,γ) reaksiyonu ile ^{239}Pu fisil yakıtı ise ^{238}U 'in (n,γ) reaksiyonu ile üretilir.

Çalışmada, Şekil 4.15'te %10 UF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve Şekil 4.16'da ise %10 ThF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanların, Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemelerinin ^6Li oranına göre, ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 kütüphaneleri için ortalama fisil yakıt üretimi, ^{238}U ve ^{232}Th fertillerinin bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde hesaplanmıştır.

Şekil 4.15'te %10 UF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz ve Şekil 4.16'da ise %10 ThF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar kullanıldığında ^6Li oranına göre elde edilen fisil yakıt üretimi değeri; JENDL-4.0 kütüphanesinde ENDF/B-VII.0 kütüphanesine göre Şekil 4.15'te ortalama %5, Şekil 4.16'da %1 daha fazla fisil yakıt üretimi gözlenmiştir. Şekil 4.15-4.16'da Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme kullanıldığında Ferritic Steel yapısal malzemesine göre çok küçük oranda fisil yakıt üretiminin fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 4.15-4.16'da ortalama fisil yakıt üretimi karşılaştırıldığında UF_4 ağır metal karışımlı akışkan kullanıldığında ThF_4 ağır metal karışımlı akışkana göre ortalama %10 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.15-4.16 incelendiğinde ortalama fisil yakıt üretiminin en fazla %10 UF_4 ağır metali ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanın Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemesi ile kullanıldığında JENDL-4.0 kütüphanesinde elde edildiği görülmüştür.

Şekil 4.15-4.16'da ^6Li oranı %15'ten %20'ye artırıldığında ortalama fisil yakıt üretiminin ortalama %20 azaldığı gözlenmiştir. Ortalama fisil yakıt üretiminin azalmasının nedeni; ^6Li oranının artması ile akışkandaki ^7Li oranının azalmasına bağlıdır. Akışkandaki ^7Li 'nin azalması, trityum üretimi reaksiyonu sonucunda açığa çıkan yüksek enerjili nötronlarında azalmasına neden olur. Yüksek enerjili nötronlarla reaksiyona giren UF_4 ve ThF_4 ağır metalindeki fertillerinden (^{238}U ve ^{232}Th) elde

edilen fisil (^{239}Pu ve ^{233}U) yakıtların azalmasına neden olur. Bu nedenle ^6Li oranının artması ile ortalama fisil yakıt üretiminin lineer olarak azaldığı gözlenmiştir.

Uranyum ve toryumun bulunduğu bölgelerde ortalama fisil yakıt üretimi; UF_4 ağır metali ile oluşturulan akışkanın ThF_4 akışkanından yaklaşık %10 daha fazla fisil yakıt üretimi elde edilmiştir. Şekil 4.15'te UF_4 ve Şekil 4.16'da ThF_4 ağır metal karışımlarında ^6Li oranı %15'ten %20'ye artırıldığında fisil yakıt üretiminin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütleli ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (% 100 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9	0,300000 1,700000 4,000000 1,000000	1,97933	8,45040.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 F.S)	C V Cr Fe Ta-181 W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,02568	8,31977.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 F.S + %40 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 C V Cr Fe Ta-181 W	0,120000 0,680000 1,600000 0,400000 0,000600 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,012000	3,04011	8,37202.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütleli ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (% 100 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9	0,400000 1,600000 4,000000 1,000000	1,97933	8,45898.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 F.S)	C V Cr Fe Ta-181 W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,02568	8,31977.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 F.S + %40 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 C V Cr Fe Ta-181 W	0,160000 0,640000 1,600000 0,400000 0,000600 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,012000	3,03972	8,37545.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶Li oranına göre %100 Flibe akışkanı, V₄Cr₄Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütleli ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%100 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9	0,300000 1,700000 4,000000 1,000000	1,97933	8,45040.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 V ₄ Cr ₄ Ti)	Ti V Cr	0.042473 0.918406 0.039111	6,05000	7,16451.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 V ₄ Cr ₄ Ti + %40 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Ti V Cr	0,120000 0,680000 1,600000 0,400000 0.025484 0.551044 0.023467	2,62550	7,67886.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 6.4. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶Li oranına göre % 100 Flibe akışkanı, V₄Cr₄Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği izotopların atomik oranları, kütleli ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%100 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9	0,400000 1,600000 4,000000 1,000000	1,97933	8,45898.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 V₄Cr₄Ti)	Ti V Cr	0.042473 0.918406 0.039111	6,05000	7,16451.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 V₄Cr₄Ti + %40 Flibe)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Ti V Cr	0,160000 0,640000 1,600000 0,400000 0.025484 0.551044 0.023467	2,62517	7,68229.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H₂O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ^6Li oranına göre %10 UF_4 + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm^3)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 UF_4)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238	0,270000 1,530000 4,000000 0,900000 0,000725 0,099275	2,45877	$8,37197 \cdot 10^{-2}$
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 F.S)	C V Cr Fe Ta-181 W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,02568	$8,31977 \cdot 10^{-2}$
5-55. Bölge	Zırh (%60 F.S + %40 (%90 Flibe + %10 UF_4))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238 C V Cr Fe Ta-181 W	0,108000 0,612000 1,600000 0,360000 0,000288 0,039710 0,000600 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,012000	3,46092	$8,34065 \cdot 10^{-2}$
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 4.6. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ^6Li oranına göre %10 UF_4 + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm^3)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 UF_4)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238	0,360000 1,440000 4,000000 0,900000 0,000725 0,099275	2,45919	$8,37969.10^{-2}$
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 F.S)	C V Cr Fe Ta-181 W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,02568	$8,31977.10^{-2}$
5-55. Bölge	Zırh (%60 F.S + %40 (%90 Flibe + %10 UF_4))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238 C V Cr Fe Ta-181 W	0,144000 0,576000 1,600000 0,360000 0,000288 0,039710 0,000600 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,012000	3,4607	$8,34373.10^{-2}$
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357.10^{-2}$
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	$9,12296.10^{-2}$

Çizelge 4.7. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶Li oranına göre %10 UF₄ + %90 Flibe akışkanı, V₄Cr₄Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 UF ₄)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238	0,270000 1,530000 4,000000 0,900000 0,000725 0,099275	2,45877	8,371969.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 V ₄ Cr ₄ Ti)	Ti V Cr	0.042473 0.918406 0.039111	6,05000	7,164505.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 V ₄ Cr ₄ Ti + %40 (%90 Flibe + %10 UF ₄))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238 Ti V Cr	0,108000 0,612000 1,600000 0,360000 0,000288 0,039710 0.025484 0.551044 0.023467	3,00717	7,647491.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,543573.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,122959.10 ⁻²

Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶Li oranına göre %10 UF₄ + %90 Flibe akışkanı, V₄Cr₄Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 UF ₄)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238	0,360000 1,440000 4,000000 0,900000 0,000725 0,099275	2,45919	8,371969.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 V ₄ Cr ₄ Ti)	Ti V Cr	0,042473 0,918406 0,039111	6,05000	7,16451.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 V ₄ Cr ₄ Ti + %40 (%90 Flibe + %10 UF ₄))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 U-235 U-238 Ti V Cr	0,144000 0,576000 1,600000 0,360000 0,000288 0,039710 0,025484 0,551044 0,023467	3,23347	7,65058.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.9. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ⁶Li oranına göre %10 ThF₄ + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 UF ₄)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th	0,270000 1,530000 4,000000 0,900000 0,100000	2,40273	8,22210.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 F.S)	C V Cr Fe Ta-181 W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,02568	8,31977.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 F.S + %40 (%90 Flibe + %10 ThF ₄))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th C V Cr Fe Ta-181 W	0,108000 0,612000 1,600000 0,360000 0,040000 0,000600 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,012000	3,42596	8,28025.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.10. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶Li oranına göre %10 ThF₄ + %90 Flibe akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 UF ₄)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th	0,360000 1,440000 4,000000 0,900000 0,100000	2,40284	8,22670.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 F.S)	C V Cr Fe Ta-181 W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,02568	8,31977.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 F.S + %40 (%90 Flibe + %10 ThF ₄))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th C V Cr Fe Ta-181 W	0,144000 0,576000 1,600000 0,360000 0,040000 0,000600 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,012000	3,42781	8,28833.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,180090 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.11. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %15 ^6Li oranına göre %10 ThF_4 + %90 Flibe akışkanı, $\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$ yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm^3)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 ThF_4)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th	0,270000 1,530000 4,000000 0,900000 0,100000	2,40240	$8,22098.10^{-2}$
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 $\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$)	Ti V Cr	0.042473 0.918406 0.039111	6,05000	$7,16451.10^{-2}$
5-55. Bölge	Zırh (%60 $\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$ + %40 (%90 Flibe + %10 ThF_4))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th Ti V Cr	0,108000 0,612000 1,600000 0,360000 0,040000 0.025484 0.551044 0.023467	2,97433	$7,58710.10^{-2}$
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,018009 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357.10^{-2}$
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	$9,12296.10^{-2}$

Çizelge 4.12. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %20 ⁶Li oranına göre %10 ThF₄ + %90 Flibe akışkanı, V₄Cr₄Ti yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları

Reaktör Bölgeleri	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	% İzotop	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/barn.cm)
1. Bölge	Boşluk				
2-3-22-33. Bölge	Sıvı Duvar (%90 Flibe + %10 ThF ₄)	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th	0,360000 1,440000 4,000000 0,900000 0,100000	2,40284	8,22870.10 ⁻²
4-44. Bölge	Çelik Duvar (%100 V ₄ Cr ₄ Ti)	Ti V Cr	0.042473 0.918406 0.039111	6,05000	7,16451.10 ⁻²
5-55. Bölge	Zırh (%60 V ₄ Cr ₄ Ti + %40 (%90 Flibe + %10 ThF ₄))	Li-6 Li-7 F-19 Be-9 Th Ti V Cr	0,144000 0,576000 1,600000 0,360000 0,040000 0,025484 0,551044 0,023467	2,97433	7,59018.10 ⁻²
7-9-77-99. Bölge	Çelik (%100 SS316LN)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,652818 0,175079 0,018009 0,002501 0,120055 0,025012 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
8-88. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	H-1 O-16 Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu	0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 4.13. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için ${}^6\text{Li}$ oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritium Üretim Oranı) değeri.

% ${}^6\text{Li}$	ENDF/B-VII.0					
	F.S.			$\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$		
	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4
15	2,32497	2,15028	2,32016	2,33705	2,16025	2,33016
16	2,32519	2,16534	2,33271	2,33646	2,17476	2,34257
17	2,32489	2,17905	2,34447	2,34376	2,18701	2,35406
18	2,32417	2,19158	2,35726	2,33377	2,16788	2,36588
19	2,32308	2,20016	2,36681	2,33204	2,20787	2,37328
20	2,32181	2,20948	2,37486	2,33012	2,21679	2,38187

Çizelge 4.14. JENDL-4.0 kütüphanesi için ${}^6\text{Li}$ oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritium Üretim Oranı) değeri.

% ${}^6\text{Li}$	JENDL- 4.0					
	F.S.			$\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$		
	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4
15	2,36844	2,21674	2,36480	2,37685	2,22601	2,37202
16	2,36767	2,21968	2,37789	2,37526	2,22517	2,38472
17	2,36648	2,17841	2,38901	2,38264	2,23142	2,39542
18	2,36439	2,22092	2,39906	2,37084	2,18859	2,40519
19	2,36310	2,24245	2,40933	2,36922	2,25752	2,41535
20	2,36123	2,26901	2,41806	2,36702	2,28253	2,42230

Çizelge 4.15. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.

% ^6Li	ENDF/B-VII.0					
	F.S.			$\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$		
	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4
15	1,96096	2,05140	2,50993	1,96339	2,05350	2,51270
16	1,96167	2,05447	2,50876	1,96394	2,05651	2,51136
17	1,96227	2,05122	2,50784	1,96435	2,05910	2,51027
18	1,96282	2,06000	2,50696	1,96392	2,05633	2,50976
19	1,96330	2,06200	2,50715	1,96520	2,06372	2,50843
20	1,96376	2,06408	2,50582	1,96555	2,06570	2,50786

Çizelge 4.16. JENDL- 4.0 kütüphanesi için ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.

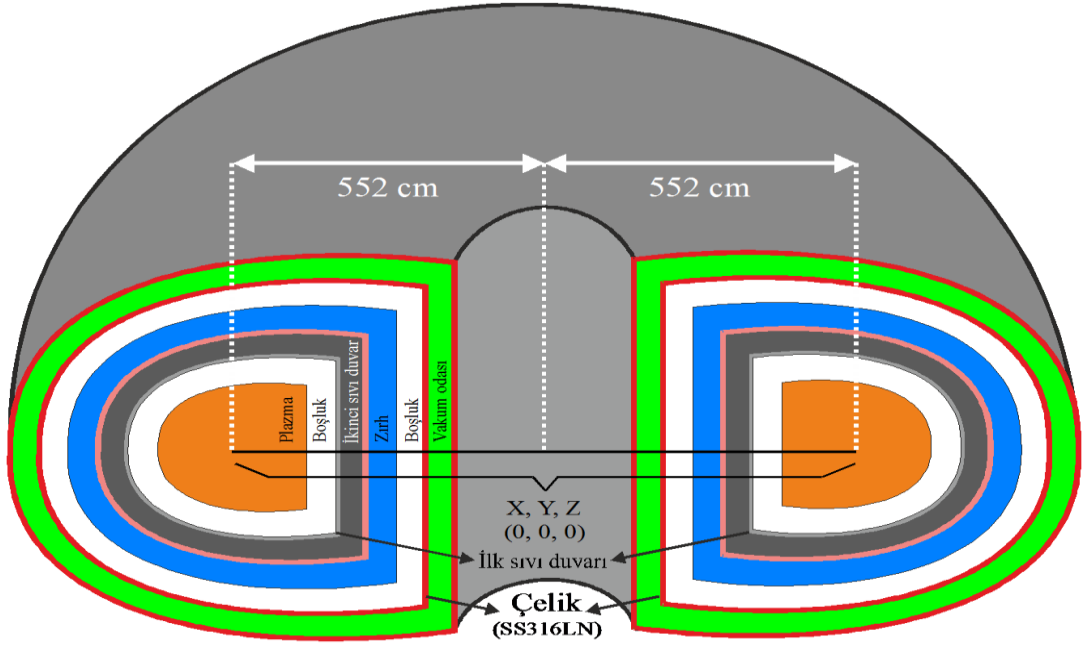
% ^6Li	JENDL- 4.0					
	F.S.			$\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$		
	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4
15	1,87844	1,97225	2,49690	1,88016	1,97499	2,49893
16	1,87912	1,97241	2,49550	1,88067	1,97438	2,49739
17	1,87967	1,96565	2,49408	1,88111	1,97623	2,49594
18	1,88007	1,97436	2,49257	1,88144	1,96991	2,49497
19	1,88060	1,97875	2,49233	1,88196	1,98241	2,49398
20	1,88110	1,98291	2,49142	1,88236	1,98638	2,49312

Çizelge 4.17. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için ${}^6\text{Li}$ oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi (W/cm^3) değerleri.

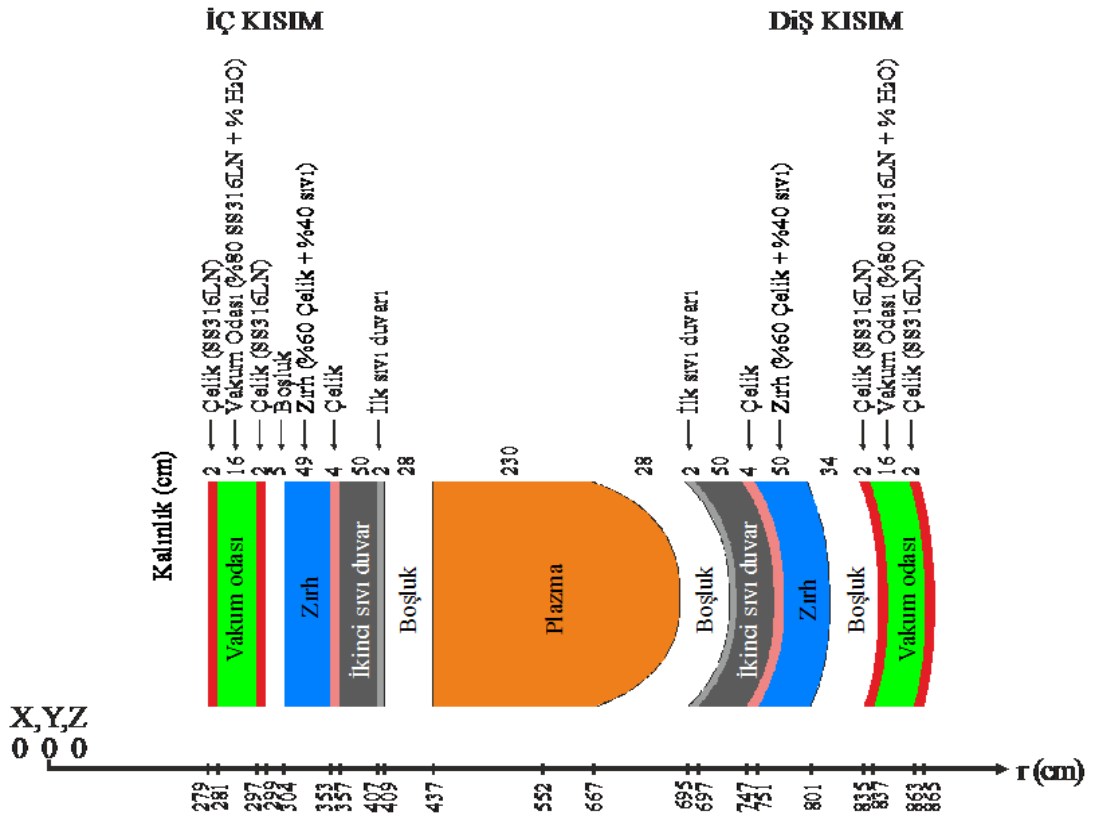
% ${}^6\text{Li}$	ENDF/B-VII.0					
	F.S.			$\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$		
	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4	% 100Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4
15	129,325	148,890	218,263	129,393	148,945	218,288
16	129,643	149,377	218,356	129,712	149,438	218,396
17	129,917	149,696	218,607	130,001	149,868	218,531
18	130,219	150,294	218,579	130,288	150,275	218,679
19	130,465	150,671	218,784	130,546	150,732	218,870
20	130,727	151,045	218,954	130,806	151,129	219,050

Çizelge 4.18. JENDL- 4.0 kütüphanesi için ${}^6\text{Li}$ oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi(W/cm^3) değerleri.

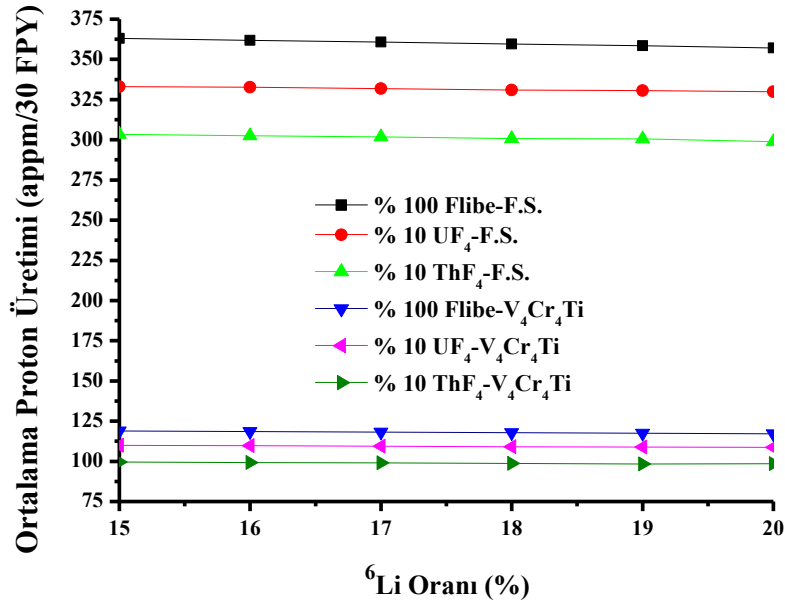
% Li-6	JENDL- 4.0					
	F.S.			$\text{V}_4\text{Cr}_4\text{Ti}$		
	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4	% 100 Flibe	%10 UF_4	%10 ThF_4
15	112,755	127,737	209,197	112,800	127,917	209,123
16	113,040	128,116	209,270	113,100	128,313	209,364
17	113,295	127,883	209,446	113,330	128,265	209,536
18	113,550	128,260	209,630	113,588	128,236	209,694
19	113,747	129,102	209,692	113,779	129,297	209,941
20	114,001	130,476	210,030	114,067	130,735	210,017



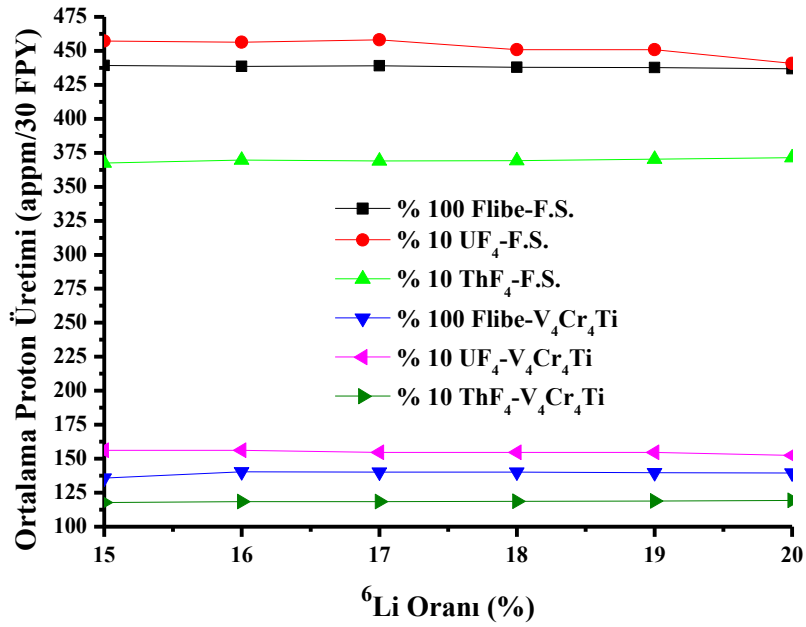
Şekil 4.1. Hesaplamlarda kullanılan APEX hibrit reaktörünün gösterimi



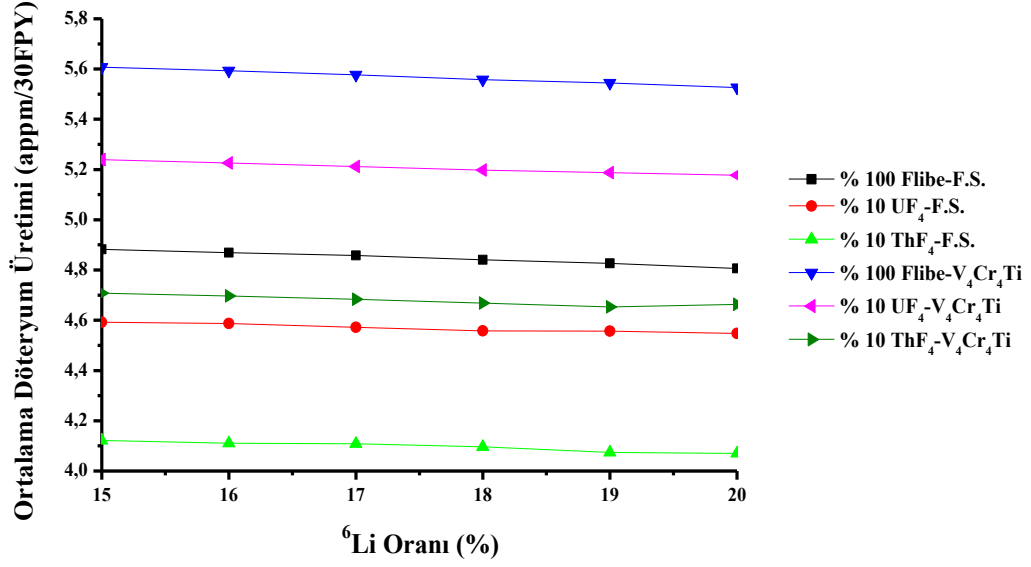
Şekil 4.2. Hesaplama için kullanılan APEX hibrit reaktörün bölge yarıçap ve kalınlıkları



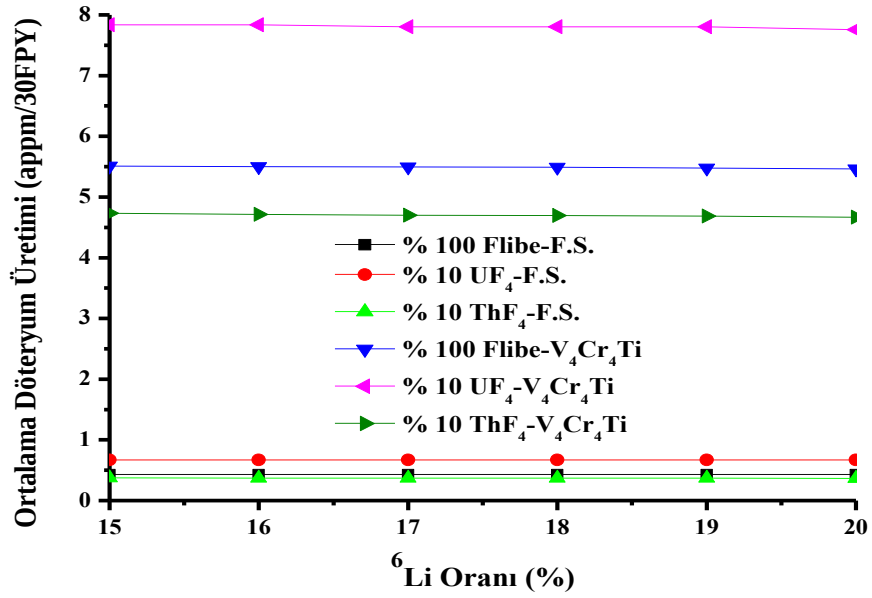
Şekil 4.3. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışıklı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama proton üretimine etkisi



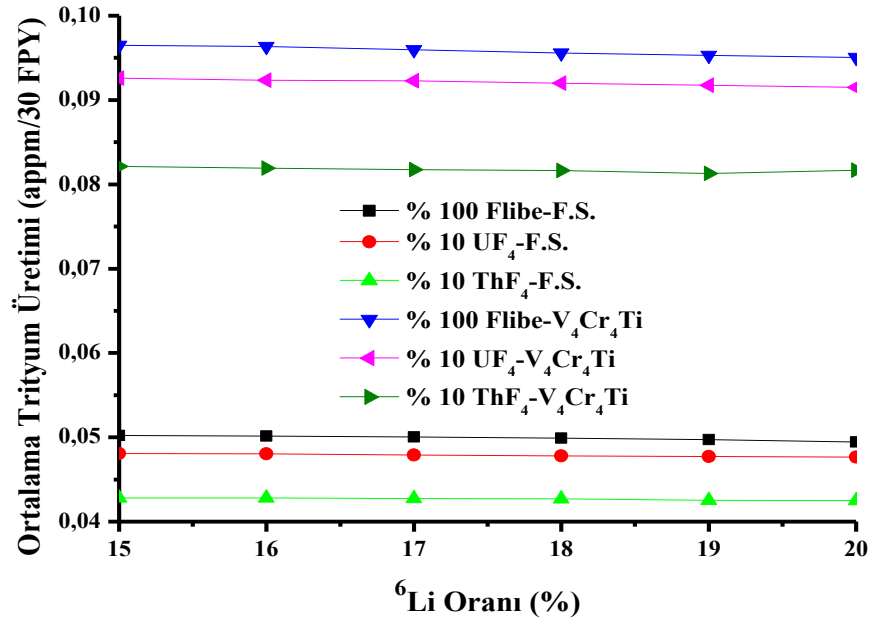
Şekil 4.4. JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışıklı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama proton üretimine etkisi



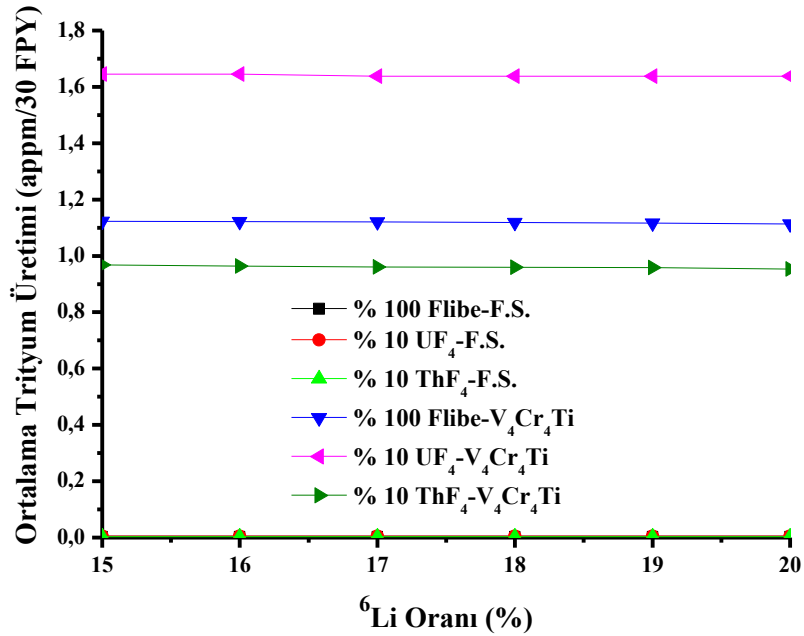
Şekil 4.5. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama döteryum üretimine etkisi



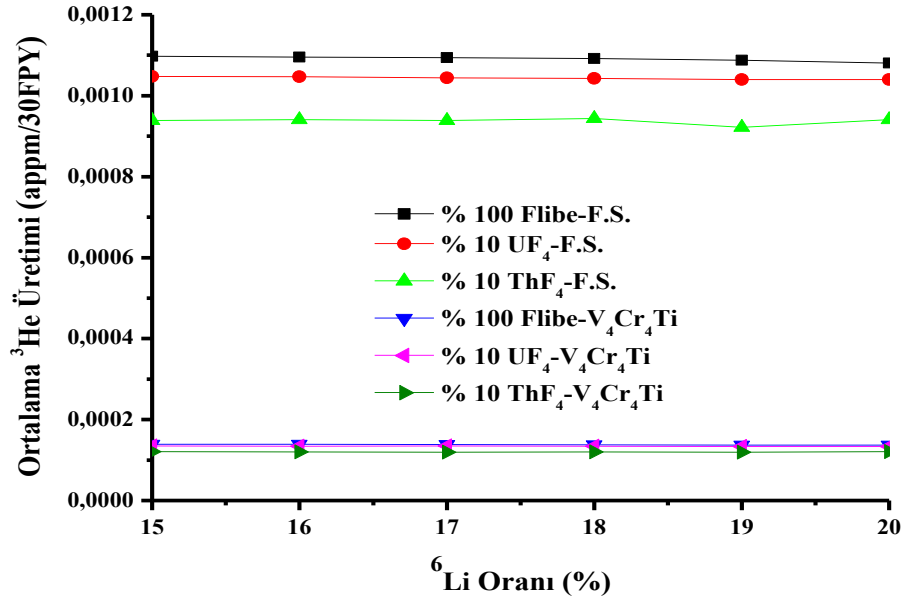
Şekil 4.6. JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama döteryum üretimine etkisi



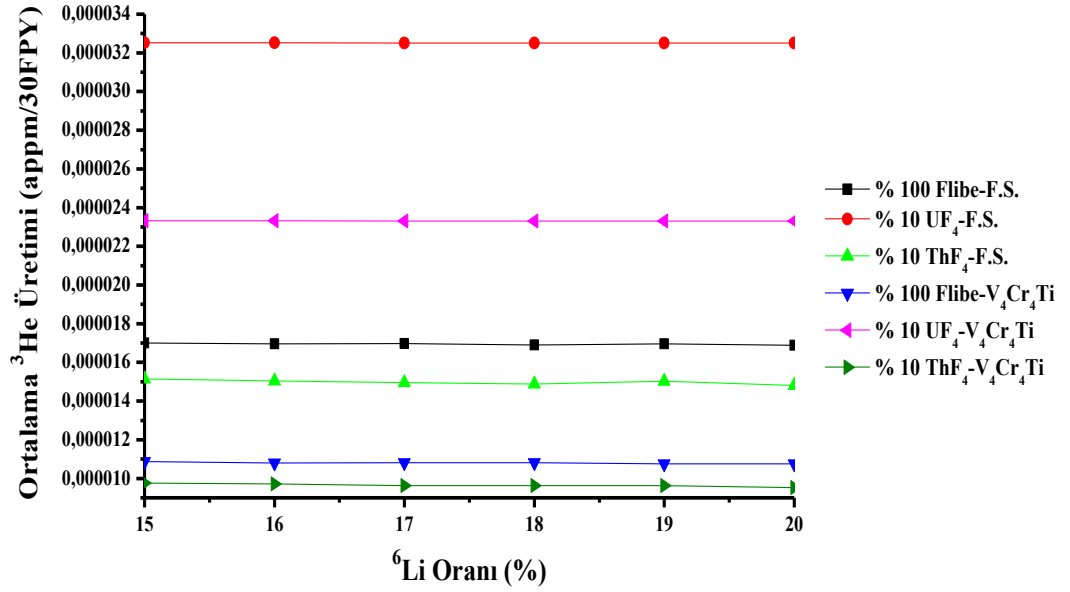
Şekil 4.7. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama trityum üretimine etkisi



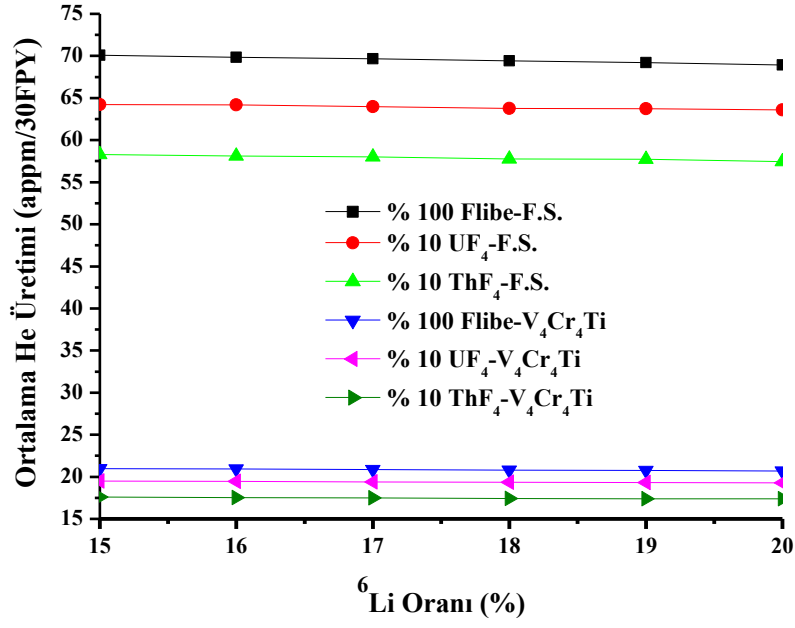
Şekil 4.8. JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama trityum üretimine etkisi



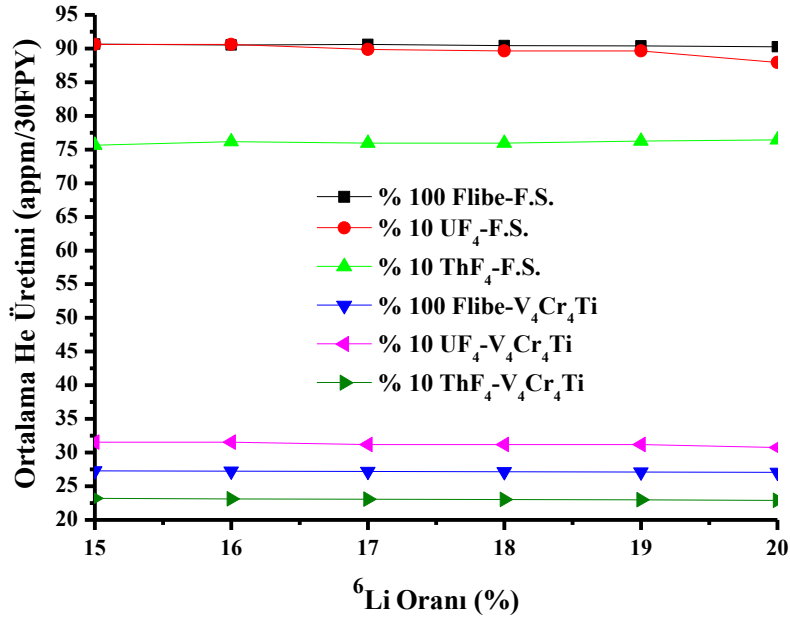
Şekil 4.9. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^3He üretimine etkisi



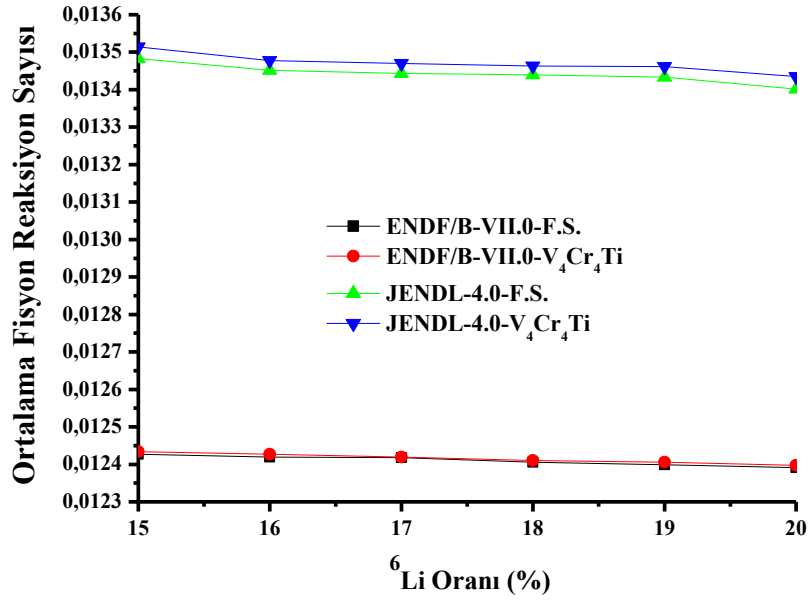
Şekil 4.10. JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışımli akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama ^3He üretimine etkisi



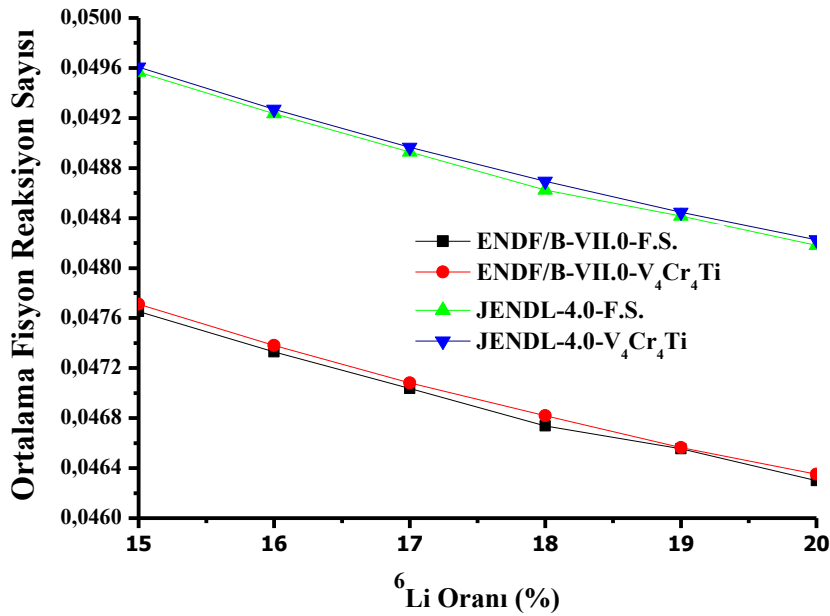
Şekil 4.11. ENDF/B-VII.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışıklı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He üretimine etkisi



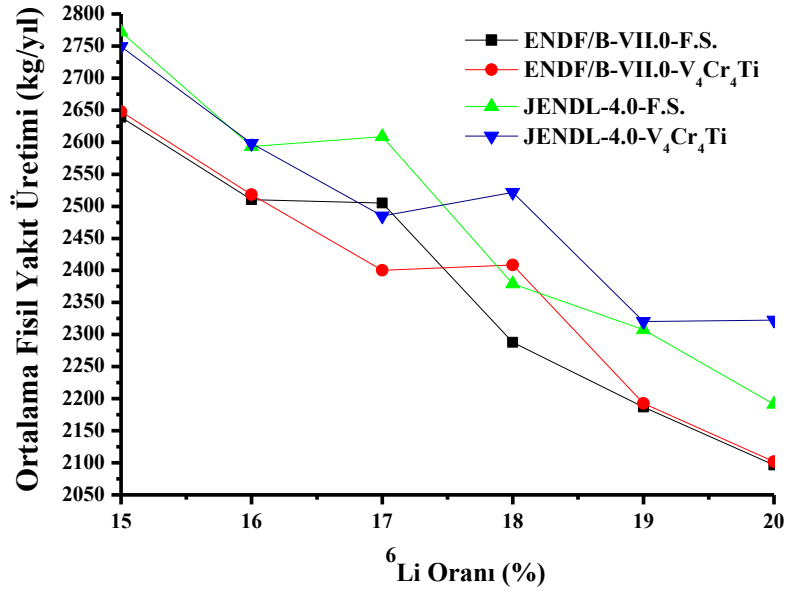
Şekil 4.12. JENDL-4.0 kütüphanesi için reaktörün ^6Li oranına göre Flibe, UF_4 ve ThF_4 karışıklı akışkanların seçilen yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He üretimine etkisi



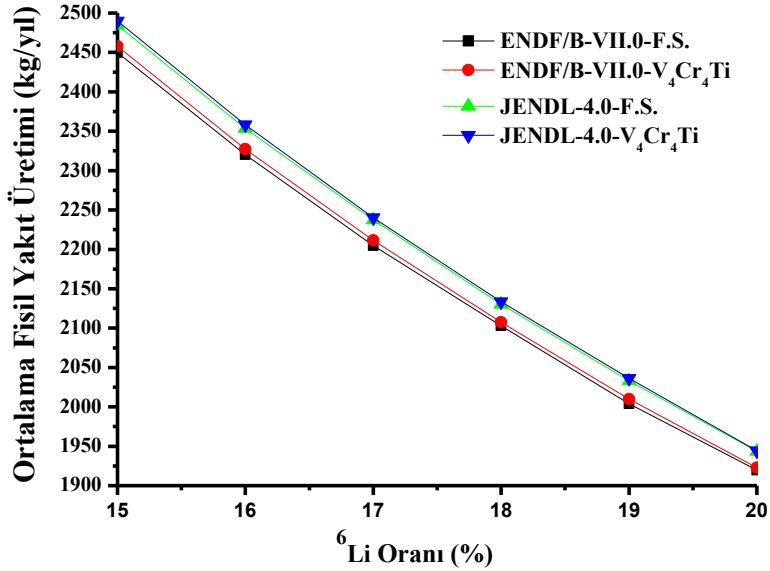
Şekil 4.13. Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 UF_4 karışımlı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fiyon reaksiyon sayısı



Şekil 4.14. Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 ThF_4 karışımlı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fiyon reaksiyon sayısı



Şekil 4.15. Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 UF_4 karışımlı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fisil yakıt üretimi değeri



Şekil 4.16. Seçilen kütüphaneler ve yapısal malzemeler için ^6Li oranına göre %90 Flibe + %10 ThF_4 karışımlı akışkanın reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama fisil yakıt üretimi değeri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dünyadaki hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojinin yaygın olarak kullanılması, istek ve ihtiyaçların artması enerjiye olan gereksinimi arttırmaktadır. Buna bağlı olarak dünyadaki artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Günümüzde elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık %70'i doğada sınırlı miktarda bulunan petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil enerji kaynaklarından elde edilmektedir, Fosil enerji kaynaklarının hızla tüketilmeleri ve çevre sorunlarına sebep olmaları alternatif enerji kaynakları arayışını arttırmaktadır. Güneş, rüzgâr, akarsu, jeotermal gibi çevre sorunlarına neden olmayan yenilenebilir enerji kaynakları ise tüketildikçe yeri doldurulabilen kaynaklar olmasına karşın bu kaynaklardan elde edilen enerji miktarları yeterli olmamaktadır.

Ülkelerin alternatif enerji arayışına çözüm olabilecek kaynak nükleer enerjidir. Nükleer reaktörlerde nükleer enerji, fisyon ya da füzyon yoluyla üretilmektedir. Her iki reaksiyon sonucu açığa çıkan yüksek derecedeki enerji çeşitli yollarla reaktörler içinden dışarı alınarak gerekli enerji haline dönüştürülmektedir. Fisyon ve füzyon reaksiyonlarından yüksek enerji elde edilebilmesi, kaynak problemi yaşanmaması, bununla birlikte gerekli güvenlik tedbirleri alındığında çevre sorunlarına neden olmaması geleceğin alternatif enerji kaynağının nükleer reaktörlerden elde edileceğini göstermektedir. Günümüzde sadece fisyon reaktörleri enerji üretiminde kullanılmaktadır. 2014 yılı itibariyle dünya elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %15'ini karşılayan 437 adet fisyon reaktörü aktif olarak çalışmaktadır.

Kullanımda olan bugünün fisyon reaktörleri doğal uranyumun çok az bir yüzdesini kullanmakta ve kalan kısmı atık olarak kalmaktadır. Bu nedenle doğal uranyumdan karşılanmakta olan bölünebilir yakıt ihtiyacının karşılanamaz duruma geleceği beklenmektedir. Füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için gerekli olan ham maddeler ise kolay elde edilebilmeleri ile alternatif çözüm olacaktır. Füzyon reaksiyonu sonunda fisyonla göre çok yüksek enerjinin açığa çıkması ve füzyon reaksiyonu ile radyoaktif atıkların meydana gelmemesi füzyon reaktörlerini fisyon reaktörlerine göre daha cazip hale getirmiştir. Fakat füzyon ve hibrit reaktörler teknolojik bilgi birikiminin yeterli düzeyde olmaması nedeniyle şimdilik araştırma aşamasındadırlar. Füzyon reaktörlerindeki bu sorunların gelecekte bilgi ve teknolojinin yeterli düzeye gelmesi ile aşılabacağı beklenmektedir.

Son yıllarda araştırmacılar tarafından kabul gören hibrit reaktör sistemi; füzyon reaktör özelliğini kullanarak günümüz fisyon reaktörlerinden açığa çıkan harcanmış yakıtta bulunan uranyum ötesi elementleri tekrar işleyerek geri kazanılmasını sağlamak, miktarını azaltmak ve uzun ömürlü fisyon ürünlerinin zararsız hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada APEX füzyon teknolojisinden faydalanarak yeni bir APEX hibrit reaktör modeli tasarlanmıştır. Tasarımda, plazmayı çevreleyen ilk katı duvarın yerini hızlı akan ilk sıvı duvar ve yavaş akan ikinci sıvı duvar bölgeleri almıştır. İlk sıvı duvarın kullanım amacı, reaktör içerisindeki yüklü parçacıkları, hemen arkasındaki ikinci sıvı duvarın kullanım amacı ise, nötronlardan dolayı açığa çıkan radyasyon enerjisinin soğurulmasını sağlayarak yapısal malzemenin zarar görmesini engellemektir.

Çalışmada tasarlanan APEX hibrit reaktöründe Ferritic Steel ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı farklı iki yapısal malzeme ile reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %100 Flibe (Li_2BeF_4), %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri ile %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, nötronik hesaplamalar ^6Li oranının %15-20 arasında değişmesi ile ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır. Tasarımda ENDF/B-VII.0 ve JENDL-4.0 nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphaneleri kullanılarak ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgeleri için TBR, M, ısı enerjisi, ortalama fisyon reaksiyon sayısı ve bir yıldaki ortalama fisil yakıt üretimi ile yapısal malzeme olan çelik bölgesinde radyasyon hasar parametreleri proton üretimi, döteryum üretimi, trityum üretimi ^3He üretimi ve He üretimi hesaplanmıştır.

Tasarlanan modelde akışkanın bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde trityumun kendi kendine yetebilmesi için gerekli olan $\text{TBR} > 1,1$ ve termal güç için gerekli olan $M > 1,2$ şartlarının kullanılan akışkanlar ve kütüphaneler için sağlandığı görülmüştür. Akışkandaki ^6Li oranı %15'den %20'ye kadar arttıkça genel olarak %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri için TBR'nin, %100 Flibe eriyik tuz akışkanı kullanıldığında M'nin, kullanılan tüm akışkanlarda ısı enerjisi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. TBR, M, ısı enerjisi değerlerindeki bu artışa plazmadan gelen füzyon nötronları ve sıvı duvarda meydana gelen fisyon reaksiyonu sonucu yayınlanan nötronlar sebep olur. U ve Th'un fisyon reaksiyonu ile nötron akısı arttığından, hesaplamalarda kaynak nötron başına toplam çarpışma sayısı UF_4 ve ThF_4 'un

katkısıyla artar. Toplam çarpışma sayısındaki bu artış, ortamdaki ${}^6\text{Li}$ çekirdekleriyle çarpışan nötronların sayısını artırır. Bu sebeple ${}^6\text{Li}$ oranının artması ile %10 UF_4 ve %10 ThF_4 ağır metalleri için TBR değerinin arttığı görülmüştür. Çalışmada, TBR, M ve ısı enerjisi değerleri en çok JENDL-4.0 kütüphanesinde, Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzemenin, %10 ThF_4 ağır metal karışımlı akışkanın %20 ${}^6\text{Li}$ oranı kullanılması ile elde edilmiştir.

Reaktörlerde radyasyon hasarı, reaktör ömrünün azalması ve yapısal malzemenin bozulmasına neden olduğundan radyasyon hasarının en az olması istenir. (n,p), (n,d), (n,t), (n, ${}^3\text{He}$), (n, α) reaksiyonları sonucunda çıkan reaksiyon ürünlerinden, He gazı, hidrojen izotopları, hızlı nötronlar reaktörün yapısal malzemesi olan çelik duvarın yapısını zarar vermektedir. Hızlı nötronlar çelik duvar yüzeyine çarpması ile oluşan reaksiyonlar sonucu yapısal malzeme olan çelikte gaz oluşur. Oluşan hidrojen gazı izotopları olan proton, döteryum ve trityum yapısal malzeme dışına çıkarken, ${}^3\text{He}$ ve He gazları yapısal malzeme içinde kalarak yapıda boşluklar oluştururlar. Bu boşluklar yapısal malzemenin kristal yapısını bozar ve yapısal malzeme özelliğini kaybetmesine ve ömrünün kılmasına neden olur.

Çalışmada, radyasyon hasarı parametreleri için %10 ThF_4 ağır metali %90 Flibe eriyik tuz karışımından oluşan akışkanın; ENDF/B-VII.0 kütüphanesi ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımlı yapısal malzeme kullanılması ile en küçük ortalama proton üretimi ve He üretimi değeri, JENDL-4.0 kütüphanesi ve Ferritic Steel yapısal malzemesi kullanılması ile ortalama döteryum üretiminin, ortalama trityum üretiminin ve ortalama ${}^3\text{He}$ üretiminin en küçük değeri elde edilmiştir. Ortalama gaz üretimi değerlerinin seçilen akışkanlara, diğer kütüphane ve yapısal malzemeye göre daha uygun olduğu görülmüştür.

Çalışmada kullanılan iki farklı kütüphanede ortalama fisyon reaksiyon sayısı için yapılan hesaplamada, ThF_4 ağır metali karışımlı akışkanın UF_4 ağır metali karışımlı akışkana göre ortalama fisyon reaksiyon sayısının 4 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır. ${}^6\text{Li}$ oranı %15'ten %20'ye artırıldığında ortalama fisyon sayısının UF_4 ağır metali karışımlı akışkan kullanıldığında az miktarda, ThF_4 ağır metali karışımlı akışkan kullanıldığında lineer olarak azaldığı gözlenmiştir. Ortalama fisyon sayısındaki azalmanın nedeni; akışkandaki ${}^6\text{Li}$ oranı attıkça ${}^7\text{Li}$ oranı azalır. ${}^7\text{Li}$ 'nin azalması tityum üretimi reaksiyonu ile açığa çıkan yüksek enerjili nötronların yaptığı fisyon reaksiyonlarının azalmasına neden olmasından kaynaklanmıştır.

Çalışmada ^{238}U ve ^{232}Th fertilinin bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde ^{239}Pu ve ^{233}U fisil yakıtı elde edilmiştir. Hibrit reaktörde üretilen fisil yakıtın çok az bir kısmı reaktör içerisinde enerji üretiminde kullanılırken, fisil yakıtın geriye kalan kısmı uygun yöntemlerle reaktör dışına alınıp, fisyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılabilir.

Çalışmada kullanılan iki farklı kütüphanede ortalama fisil yakıt üretimi için yapılan hesaplamada, UF_4 ağır metali karışımı akışkanın ThF_4 ağır metali karışımı akışkana göre yaklaşık %10 ortalama fisil yakıt üretimi elde edilmiştir. JENDL-4.0 kütüphanesinin ENDF/B-VII.0 kütüphanesi ve Vanadium (V-4Cr-4Ti) alaşımı yapısal malzeme kullanıldığında Ferritic Steel yapısal malzemesine göre ortalama fisil yakıt üretiminin küçük oranda fazla olduğu hesaplanmıştır. UF_4 ve ThF_4 ağır metal karışımlarında ^6Li oranı %15'ten %20'ye artırıldığında fisil yakıt üretiminin azaldığı tespit edilmiştir.

Hibrit reaktörlerin hem füzyon ve hemde fisyon reaksiyonlarını bir arada kullanarak nükleer enerji ve fisil yakıt üretimi elde edilebildiğinden gelecekte bilgi ve teknolojinin yeterli düzeye gelmesi ile enerji kaynağı olarak hibrit reaktörler kullanılacaktır.

6. KAYNAKLAR

- [1] United Nations, (1998), *Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change*
- [2] N. Baltacıoğlu, *Fisyon Reaktörlerinde kullanılmış yakıt çubuklarının füzyon fisyon hibrit reaktörlerinde yeniden kullanılabilir hale dönüştürülmesi*, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (1997)
- [3] I. Hore – Lacy, Energy Use, Chapter 1. *Nuclear Energy in the 21 st Century*, Academic press, London, (2006)
- [4] Anonim, *Günümüzde Nükleer Enerji*, TAEK, (2010)
- [5] IAEA, *Comparative Assessment of Nuclear power and order Energy Sources*, Annual Report, www.nucleus.iaea.org , (2012)
- [6] WNA(World Nuclear Association), *Nuclear Power in the Today*, www.nuclear.org, (2013)
- [7] M. Günay, *Monte Carlo Tekniği Kullanılarak Bir Füzyon Fisyon Hibrit Reaktöründe Üç Boyutlu Nötronik Hesaplamalar*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, (2009)
- [8] S. Kenneth, *Nükleer Fizik I*, Çeviri Editörü B. Şarer, Palme Yayıncılık, Ankara, (2001)
- [9] H. Yapıcı, İ. Çürüttü, *Nükleer Enerji*, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kayseri, (1997)
- [10] S. Kenneth, *Nükleer Fizik II*, Çeviri Editörü B. Şarer, Palme Yayıncılık, Ankara, (2002)
- [11] M. Salvatores, *Nuclear Fuel Cycle Strategies Including Partitioning and Transmutation*, Nuclear Engineering and Design, 235, 805–816, (2005)
- [12] R.E.Nygren, *A Fusyon Reactor design With A Liquid First Wall and Divertor*, Fusion Engineering and Design, 72, 181-221, (2007)
- [13] L. H. Baetsle, *Application of Partitioning/ Transmutation of Radioactive Materials in Radioactive Waste Management*, Lectures given at the Workshop on Hybrid Nuclear Systems for Energy Production, Utilisation of Actinides and Transmutation of Long-Lived Radioactive Waste Trieste, 3-7 September, Belgium, (2001)
- [14] H. M. Şahin, *Monte Carlo Calculation of Radiation Damage in First Wall of An Experimental Hybrid Reactor*, Annals of Nuclear Energy, 34, 861-870 (2007)

- [15] B. B. Kadomtsev, *Tokamak Plasma: A Complex Physical System*, Çeviri editörü: E.W. Laing, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia tokamak (1992)
- [16] S. L. Itah, A. Fukiyama, Steady-State Operation Regime of Tokamak Reactor Plazma Consistency Analysis, *Fusion Technology*, Vol.16, p.343 (1989)
- [17] A. Sözen, H. M. Şahin, M.Übeyli, *Nükleer Yakıt üretimi ve Nükleer Yakıt Dönüşümünde Hızlandırıcı Kaynaklı Sistemle Füzyon –Fisyon (Hibrit) Sistemlerin Karşılaştırılması*, I. Ulusal Parçacık hızlandırıcı ve Uygulamaları Kongresi, TAEK, Ankara (2001)
- [18] S. Şahin, *Mainlin Fusion-Fission (Hybrid) Reactor Concepts*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Institut de Genie Atomique PHB-Ecublens, 1015 Lausanne, Switzerland
- [19] V. Altın, *Nükleer Enerji*, Bilim Teknik Dergisi Eki (2004)
- [20] M. A. Abdou, *The APEX Team, Exploring Novel High Power Density Concepts for Attractive Fusion Systems*, *Fusion Engineering and Design* 45 (1999)
- [21] B. Şarer, A. Hançerlioğulları, M. Übeyli, *Füzyon Teknolojisinde ilk sıvı duvar yaklaşımı: APEX*, 8. Ulusal Nükleer Bilimler ve teknolojiler Kongresi, Kayseri (2003)
- [22] M. A. Abdou, et al., *Overview of Fusion Blanket R&D in The US Over The Last Decade*, *Nuclear Engineering and Technology*, 37: 5, 401-422 (2005)
- [23] C. P. C. Wong, et al., *Molten Salt Self-Cooled Solid First Wall and Blanket Design Based On Advanced Ferritic Steel*, *Fusion Engineering and Design*, 72, 245-275 (2004)
- [24] M. A. Abdou, *Preface*, *Fusion Engineering and Design*, 72, 1-2 (2004)
- [25] S. Şahin, M. Übeyli, *Modified APEX Reactor as A Fusion Breeder*, *Energy Conversion and Management*, 45, 1497-1512 (2004)
- [26] M. A. Abdou, *Research On Liquid Walls for Fusion Systems*, *Applied Electromagnetics and Mechanics*, 151-152 (2001)
- [27] M. Z. Youssef and M. A. Abdou, *Heat Deposition, Damage and Tritium Breeding Characteristics in Thick Liquid Wall Blanket Concepts*, *Fusion Engineering and Design*, 49-50, 719-725 (2000)
- [28] M. A. Abdou and The APEX Team, *Exploring Novel High Power Density Concepts For Attractive Fusion Systems*, *Fusion Engineering and Design*, 45, 145- 167 (1999)
- [29] M. A. Abdou, et al., *Chapter 1: Overview*, APEX Interim Report, 1-17 (1999)

- [30] M. A. Abdou, et al., *On The Exploration of Innovative Concepts for Fusion Chamber Technology*, Fusion Engineering and Design, 54, 181-247 (2001)
- [31] A. Ying, et al., *Chapter 5: Thick Liquid Blanket Concept*, APEX Interim Report, 1-172 (1999)
- [32] M. Z. Youssef, et al., *The Breeding Potential of “Flinabe” and Comparison to “Flibe” in “CLiFF” High Power Density Concept*, Fusion Engineering and Design, 61-62, 497-503 (2002)
- [33] M. A. Abdou, The APEX Team, A.Ying, N. Morley, K. Gulec, , S. Smolentsev, M. Kotschenreuther, S. Malang, S. Zinkle, T. Rognlien, P.Fogarty, B.Nelson, R.Nygren, K.McCarthy, M.Z.Youssef, N.Ghoniem, D.Sze, C.Wong, M.Sawan, H.Khater, R.Woolley, R.Mattas, R.Moir, S.Sharafat, J.Brooks, A.Hasanein, D.Petti, M.Tillack, M.Ulrickson, T.Uchimoto, *On the exploration of innovative concepts for fusion chamber technology*. Fusion Engineering and Design, 54: 181-247 (2001)
- [34] B.Sarer, A.Hancerlioğulları, N.Savruk. *Apex füzyon reaktör modelinin Monte Carlo yöntemi kullanarak tasarlanması*. G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 18(1): 201-210 (2005)
- [35] M. Z. Youssef, et al., *X-rays Surface And Volumetric Heat Deposition and Tritium Breeding Issues In Liquid-Protected FW In High Power Density Devices*, Draft copy paper presented at the 13th Topical Meeting on the Technology of Fusion Power, Nashville, Tennessee, June 7-11 (1998)
- [36] S. Ünal, *Rejuvenation of The LWR Spent Fuel in (D-T) Driven Hybrid Reactors*, Fusion Engineering and Design, 38, 393- 416 (1998)
- [37] A. Blink, et al., In: K. L. Essary, K. L. Lewis, editors, *High-Yield Lithium-Injection Fusion Energy (HYLIFE) Reactor*, UCRL-53559, Lawrence Livermore National Laboratory (1985)
- [38] M. A. Abdou, et al., *Deuterium-Tritium Fuel Self-Sufficiency in Fusion Reactors*, 9, 250-285 (1986)
- [39] M. A. Abdou, et al., *U.S. Plans and Strategy for ITER Blanket Testing*, Fusion Science and Technology, 47, 475-487 (2005)
- [40] S. Şahin and H. Yapıcı, *Rejuvenation of Light Water Reactor Spent Fuel in Fusion Blankets*, Annals Nuclear Energy, 25: 6, 1317-1339 (1998)
- [41] M. E. Sawan and M. A. Abdou, *Physics and Technology Conditions for Attaining Tritium Self-Sufficiency for The DT Fuel Cycle*, Fusion Engineering and Design, 81, 1131-1144 (2006)

- [42] T. Korkut, A. Hançerlioğulları, *The Evalition of ReactorPerformance by using Flibe and Flinabe Molten Salts in the APEX Hybrid Reactor*, J. Fusion Energ 31:151–159 (2012)
- [43] M. Günay, B. Şarer, Y. Celik, *Three-Dimensional Neutronic Calculations for a Fusion Breeder APEX Reactor using some Libraries*, Annals of Nuclear Energy 38 :2757–2761 (2011)
- [44] M.Günay, *Investigation of Radiation Damage in Structural Material of APEX Reactorby using Monte Carlo method*, Annals of Nuclear Energy 53: 59–63 (2013)
- [45] A. Hançerlioğulları, *Determining of Energy Multiplication in the APEX Hybrid Reactor by using THF₄ and UF₄ Heavy Metal Salts*, Int. J. Energy Res. 36:1375–1382 (2012)
- [46] M. Übeyli, *Neutronic Performance of New Coolants in A Fusion-Fission (Hybrid) Reactor*, Fusion Engineering and Design, 70, 319-328 (2004)
- [47] M. Übeyli and A. Acır, *Utilization of Thorium in A High Power Density Hybrid Reactor With Innovative Coolants*, Energy Conversion and Management, 48, 576-582 (2007)
- [48] T. Yokomine, et al., *Experimental Investigation of Turbulent Heat Transfer of High Prandtl Number Fluid Flow Under Strong Magnetic Field*, Fusion Science and Technology, 52, 625-629 (2007)
- [49] J. Takeuchi, et al., *Study of Heat Transfer Enhancement / Suppression for Molten Salt Flows in A Large Diameter Circular Pipe Part I: Benchmarking*, Fusion Engineering and Design, 81, 601-606 (2006)
- [50] M. Übeyli, *On The Tritium Breeding Capability of Flibe, Flinabe and Li₂₀ Sn₈₀ in A Fusion-Fission (Hybrid) Reactor*, Journal of Fusion Energy, 22: 1, 51-57 (2004)
- [51] R. E. Nygren, et al., *A Fusion Chamber Design With A Liquid First Wall and Divertor*, 20th Symposium on Fusion Engineering, San Diego, CA, United States, 14-17 October (2003)
- [52] J. Jung and M. Abdou, *Assessments of Tritium Breeding Requirements and Breeding Potential for The Starfire / Demo Design*, Nuclear Technology / Fusion, 4, 361-366 (1983)
- [53] N. B. Morley, et al., *Chapter 7: Thin Liquid Wall Concepts and The CLiFF Design*, APEX Interim Report (1999)
- [54] S. Şahin and M. Übeyli, *Radiation Damage Studies on The First Wall of a HYLIFE-II Type Fusion Breeder*, Energy Conversion and Management, 46, 3185- 3201 (2005)

- [55] Haerlioğulları, A. *Monte Carlo Metodu ve MCNP Kod Sistemi*, Kastamonu Eğitim Dergisi 14.2, 545-556 (2006)
- [56] F.J.Briesmeister, *RSIC Computer Code Collection MCNP4A, Monte Carlo N Particle Transport Code System*, Los Alamos National Laboratory, New Mexiko (1993)
- [57] F.J.Briesmeister, *MCNP–A General Monte Carlo N–Particle Transport Code Manual*, LA–13709–M (2000)
- [58] D. B. Pelowitz, *MCNPX User’s Manual, Version 2.7.0*, LA-UR-11-02295 (2011)
- [59] G. McKinney, et al., *Review of Monte Carlo All-Particle Transport Codes and Overview of Recent MCNPX Features*, International Workshop on Fast Neutron Detectors University of Cape Town, South Africa, April 3 – 6 (2006)
- [60] M. Herman and A. Trkov, *Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII*, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000 (2010)
- [61] Japanese Evaluated Nuclear Data Library (JENDL), <http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/jendl.html> (2014)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Hızır KASAP

Doğum Yeri ve Tarihi : Rize - 12/05/1976

Adres : Cumhuriyet Anadolu Lisesi Battalgazi / MALATYA

E-posta : hizirkasap@hotmail.com

Lisans : Gazi Üniversitesi

YAYIN LİSTESİ

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler :

- M. Günay, B. Şarer, **H. Kasap**, “*The Effect on Radiation Damage of Structural Material in a Hybrid System By Using a Monte Carlo Radiation Transport Code*”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 63 (2014) 157-161, DOI:10.1016/j.anucene.2013.07.038 **(SCI-Expanded)**
- M. Günay, **H. Kasap**, “*Neutronic Investigation of the Application of Certain Plutonium-Mixed Fluids in a Fusion–Fission Hybrid Reactor*”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 63 (2014)432-436, DOI: 10.1016 /j.anucene. 2013.08.024 **(SCI-Expanded)**
- M. Günay, B. Şarer, **H. Kasap**, “*Contributions of Each Isotope in Some Fluids on Neutronic Performance in a Fusion–Fission Hybrid Reactor: a Monte Carlo Method*”, Indian Journal of Physics, Vol. 88:8 (2014) 861-66 DOI: 10.1007/s12648-014-0496-4 **(SCI-Expanded)**

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler :

- M. Günay, **H. Kasap**, "*The Investigation of Neutronic Properties in The APEX By Using Different Nuclear Data Libraries and Structural Materials*", Turkish Physical Society 29th International Physics Congress, 709 pp. 5-8 September (2012), Bodrum, Turkey.
- M. Günay, **H. Kasap**, B. Şarer, S.Öğüt, "*Calculation of Radiation Damage in Structural Material of a Hybrid Reactor by using MCNPX Monte Carlo Transport Code*", Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 227 pp. 2-5 September (2013), İstanbul, Turkey.
- M. Günay, S. Öğüt, **H. Kasap**, "*The Neutron Flux of Some Alternative Fluids in a Fusion-Fission Hybrid Reactor by using Monte Carlo Method*", Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 606 pp. 2-5 September (2013), İstanbul, Turkey.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR / SUNUMLAR

- M. Günay, **H. Kasap**, "*The Neutronic Calculations for Some Fluids in a Hybrid System by using MCNPX Monte Carlo Transport Code*", Turkish Physical Society 31th International Physics Congress, 21-24 July (2014), Bodrum, Turkey (Kabul Edildi).
- M. Günay, **H. Kasap**, "*The Effect on Radiation Damage of Some Fluids in a Fusion-fission Hybrid Reactor System*", Turkish Physical Society 31th International Physics Congress, 21-24 July (2014), Bodrum, Turkey (Kabul Edildi).