

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MONTE CARLO TEKNİĞİ KULLANILARAK BİR FÜZYON-FİSYON
HİBRİT REAKTÖRÜNDE BAZI AKIŞKAN MALZEME
OPTİMİZASYONLARI İÇİN ÜÇ BOYUTLU NÖTRONİK
HESAPLAMALAR**

GÖKMEN ŞEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

MALATYA
HAZİRAN 2019

Tezin Başlığı: Monte Carlo Tekniği Kullanılarak Bir Füzyon-Fisyon Hibrit Reaktöründe Bazı Akışkan Malzeme Optimizasyonları İçin Üç Boyutlu Nötronik Hesaplamalar

Tezi Hazırlayan : **Gökmen ŞEKER**

Sınav Tarihi : **19/06/2019**

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

Sınav Jürisi Üyeleri;

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehtap DÜZ
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Fatih KÜLAHÇI
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin GENCER
İnönü Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı:

Prof. Dr. İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Monte Carlo Tekniği Kullanılarak Bir Füzyon-Fisyon Hibrit Reaktöründe Bazı Akışkan Malzeme Optimizasyonları İçin 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.

Gökmen ŞEKER



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MONTE CARLO TEKNİĞİ KULLANILARAK BİR FÜZYON-FİSYON HİBRİT REAKTÖRÜNDE BAZI AKIŞKAN MALZEME OPTİMİZASYONLARI İÇİN ÜÇ BOYUTLU NÖTRONİK HESAPLAMALAR

Gökmen ŞEKER

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

106+ xv sayfa

2019

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehtap DÜZ

Bu çalışmada, APEX füzyon teknolojisinden yararlanılarak bir APEX hibrit reaktörü tasarlanmıştır. Tasarlanan APEX hibrit reaktöründe %10 UC₂, %10 ThC₂ ve %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ile %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan, Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle, yansıtıcı (Reflektör) Berilyum kullanılmıştır. Reaktörün ilk sıvı duvardaki nötron duvar yükü 10 MW/m², ikinci sıvı duvar kalınlığı 50 cm ve füzyon gücünün 4000 MW değeri için tasarım yapılmıştır. Reaktörün üç boyutlu tasarımında ve ilgili bölgelerdeki nötronik hesaplamalarda MCNPX-2.7.0 Monte Carlo kodu ve ENDF/B-VIII.0 nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanesi kullanılmıştır.

Reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgeleri için Nötron Akısı, Trityum Üretim Oranı (TBR), Enerji Çoğaltma Faktörü (M), Isı Enerjisi, Filyon Reaksiyon Sayısı ve 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, ⁴He ve DPA (atomların yer değiştirmesi) değerleri hesaplandı.

Tasarlanan modelde ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde seçilen akışkanlarda ağır metal oranı artırılıp eriyik tuz oranı düşürüldüğünde, Am ve Cm'lü akışkanlarda artışı, Np'lü akışkanlarda düştüğü gözlemlenmiştir. Trityumun kendi kendine yetebilmesi için gerekli olan şart TBR>1.1 ve termal güç için gerekli olan şart M>1.2, seçilen akışkanlar, yapısal malzeme ve yansıtıcı için sağlandığı görülmüştür. Çalışmada AmF₃ ve NpF₄ oranı artıkça TBR değerleri azalmış, azalmanın seçilen akışkanlarda Li oranı azaldığında TBR'nin azaldığı ve CmF₃ oranı artıkça TBR değeri artmış olduğu gözlemlenmiştir. AmF₃, CmF₃ ve NpF₄'un oranının artmasıyla gözlemlenen M ve ısı enerjisinin arttığı tespit edildi. Nötron akısı, depolanan ısı enerji, filyon enerjisi ve filyon reaksiyon sayısı değerlerinin plazmadan reaktörün dış bölgesine doğru üstel olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Reaktörde (n,γ) reaksiyonunun fisil yakıt üretimi üzerinde etkili olduğu, ²³⁸U 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, ^4He), DPA reaksiyonları yaptığı ve radyasyon hasarına neden olduğu belirlenmiştir.



ANAHTAR KELİMELER: APEX, Sıvı Duvar, Hibrit Reaktör, ENDF/B-VIII.0, MCNPX- 2.7.0

ABSTRACT

Master Thesis

THREE-DIMENSIONAL NEUTRONIC CALCULATIONS FOR SOME FLUID MATERIAL OPTIMIZATIONS IN A FUSION-FISSION HYBRID REACTOR BY USING MONTE CARLO METHOD

Gökmen ŞEKER

İnönü University
Institute of Science and Technology
Department of Physics

106+xv pages

2019

Supervisor: Doç. Dr. Mehtap DÜZ

In this study, an APEX hybrid reactor was designed using APEX fusion technology. In the designed APEX hybrid reactor 10% UC₂, 10% ThC₂ and fluid consisting of 0.1-1% AmF₃, 0.1-1% CmF₃, 0.1-1% NpF₄ heavy metal with 89.9-89% Li₂₀Sn₈₀ molten salt mixture, Ferritic Steel (9Cr2WVTa) structural material, reflective Beryllium was used. The neutron wall load of the reactor at the first liquid wall was designed to be 10 MW/m², the second liquid wall thickness was 50 cm, and the fusion power was 4000 MW. MCNPX-2.7.0 Monte Carlo code and ENDF/B-VIII.0 nuclear reaction cross-sectional library were used in the three-dimensional design of the reactor and in the neutronic calculations in the respective regions.

The Neutron Flux, Tritium Production Rate (TBR), Energy Multiplication Factor (M), Heat Energy, Fission Reaction Number and Fissile Fuel Production were calculated for first liquid wall, the second fluid wall, armor zones of the reactor. Proton production, deuterium production, tritium production, ³He production, ⁴He and DPA (displacement per atoms) values were calculated as the radiation damage parameters of 30 full power years (FPY) in the steel region which is the structural material of the reactor.

In the designed model, it was observed that when the ratio of heavy metal was increased in the fluids selected in the first liquid wall, second liquid wall and armor regions and the melt salt ratio was decreased, the increased in the Am and Cm fluids decreased in the Np fluid. The essential condition TBR > 1.1 for the self-sufficiency of tritium and the required condition M > 1.2 for the thermal power was provided for the selected fluids, the structural material and the reflector. In the study, TBR values decreased as the ratio of AmF₃ and NpF₄ increased, it was observed that when the decrease in the Li ratio in the selected fluids decreased, the TBR was decreased and the TBR value increased as the CmF₃ ratio increased. The increase in the ratio of AmF₃, CmF₃ and NpF₄ was observed M and heat energy increased. It was observed

that the values of neutron flux, heat deposition energy, fission energy and fission reaction number decreased exponentially from the plasma to the outer region of the reactor. It was determined that the reaction in the reactor (n, γ) was effective on fissile fuel production and ^{239}Pu and ^{233}U fissile fuel were produced from ^{238}U and ^{232}Th fertile material. In the structural material of neutrons (n, p), (n, d), (n, t), (n, ^3He), (n, ^4He), DPA reactions were determined to cause radiation damage.



KEYWORDS: APEX, Liquid Wall, Hybrid Reactor, ENDF/B-VIII.0, MCNPX- 2.7.0

TEŞEKKÜR

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

Sayın Prof. Dr. İbrahim ADIGÜZEL ve bölümdeki bütün hocalarıma;

Çalışmalarım boyunca bana destek olan mesai arkadaşlarım **Hüseyin GÜNEŞ, Erhan ŞAHİN** ve ev arkadaşım **Vahap ERCAN'a;**

Ayrıca tez çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen **AİLEM'e**

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. FİSYON ve FÜZYON REAKSİYONLARI.....	7
2.1. Fisyon Reaksiyonları.....	7
2.2. Füzyon Reaksiyonları	10
2.2.1. Döteryum-Döteryum (D-D) Reaksiyonları	11
2.2.2. Döteryum-Trityum (D-T) Reaksiyonları	11
2.2.3. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması	12
2.2.4. Füzyon Reaksiyonlarının Gerçekleşebilme Koşulları	13
2.2.5. Füzyon Yakıtları	15
3. HİBRİT (FÜZYON-FİSYON) REAKTÖRÜ	18
3.1. APEX HibritReaktörü	20
3.1.1. APEX Reaktörünün Bileşenleri	25
3.1.1.1. Yakıt	25
3.1.1.2. Akışkanlar.....	26
3.1.1.3. Yapısal Malzeme	31
4. MONTE CARLO YÖNTEMİ.....	32
4.1. MCNP (Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu)	32
4.2. MCNPX-2.7.0 (Monte Carlo N- Particle Extending Code).....	33
4.3. ENDF/BKütüphanesi	35
4.3.1. ENDF/B-VI Kütüphanesi	35
4.3.2. ENDF/B-VII Kütüphanesi.....	35
4.3.3. ENDF/B-VIII Kütüphanesi	36
5. HESAPLAMALAR.....	37
5.1. Nötron Akısı.....	40
5.2. Trityum Üretim Oranı (Tritium Breeding Rate)	41
5.3. Enerji Çoğaltma Faktörü (Energy Multiplication Factor)	43
5.4. Isı Enerjisi (Heating).....	44

5.5. Radyasyon Hasarı	45
5.5.1. Proton Üretimi.....	46
5.5.2. Döteryum Üretimi	46
5.5.3. Tritiyum Üretimi	47
5.5.4. ³He Üretimi	48
5.5.5. ⁴He Üretimi	49
5.5.6. DPA Üretimi	50
5.6. Fiyon Reaksiyon Sayısı.....	51
5.7. Fisil Yakıt Üretimi.....	52
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	95
7. KAYNAKLAR	98
ÖZGEÇMİŞ.....	105

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1.	Radyoaktif elementler, atık yüzdeleri, yarılanma ömürleri ve etkin doz katsayısı miktarlarının gösterimi.....	3
Çizelge 3.1.	Trityum üreten enerji ileten sıvıların bazı özellikleri.....	27
Çizelge 3.2.	Füzyon reaktörlerinde genelde kullanılan akışkanlar.....	31
Çizelge 4.1.	ENDF/B kütüphanesinin sürümleri.....	35
Çizelge 5.1.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 AmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	54
Çizelge 5.2.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 AmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	55
Çizelge 5.3.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %1 AmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	56
Çizelge 5.4.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 CmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	57
Çizelge 5.5.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 CmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	58
Çizelge 5.6.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %1 CmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	59
Çizelge 5.7.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 NpF_4 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	60
Çizelge 5.8.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 NpF_4 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	61
Çizelge 5.9.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %1 NpF_4 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	62
Çizelge 5.10.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 AmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları.....	63
Çizelge 5.11.	Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.5 AmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu	

- malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 64
- Çizelge 5.12.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %1 AmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 65
- Çizelge 5.13.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 CmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 66
- Çizelge 5.14.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.5 CmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 67
- Çizelge 5.15.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %1 CmF_3 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 68
- Çizelge 5.16.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 NpF_4 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 69
- Çizelge 5.17.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.5 NpF_4 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 70
- Çizelge 5.18.** Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %1 NpF_4 akışkanı, Ferritic Steel yapısal malzemesi için bu malzemelerin içerdiği atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları..... 71
- Çizelge 5.19.** %10 UC_2 , %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ve %0.1-1 AmF_3 - CmF_3 - NpF_4 karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Nötron Akısı.....72
- Çizelge 5.20.** %10 ThC_2 , %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ve %0.1-1 AmF_3 - CmF_3 - NpF_4 karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Nötron Akısı.....72
- Çizelge 5.21.** %10 UC_2 , %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ve %0.1-1 AmF_3 - CmF_3 - NpF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritiyum Üretim Oranı) değeri..... 72
- Çizelge 5.22.** %10 ThC_2 , %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ve %0.1-1 AmF_3 - CmF_3 - NpF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritiyum Üretim Oranı) değeri..... 72
- Çizelge 5.23.** %10 UC_2 , %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ve %0.1-1 AmF_3 - CmF_3 - NpF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri..... 73
- Çizelge 5.24.** %10 ThC_2 , %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ve %0.1-1 AmF_3 - CmF_3 - NpF_4 karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde

	kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.....	73
Çizelge 5.25.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi değeri.....	73
Çizelge 5.26.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi değeri.....	73
Çizelge 5.27.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Proton üretimi.....	74
Çizelge 5.28.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Proton üretimi.....	74
Çizelge 5.29.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Döteryum üretimi.....	74
Çizelge 5.30.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Döteryum üretimi.....	74
Çizelge 5.31.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Tritiyum üretimi.....	75
Çizelge 5.32.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Tritiyum üretimi.....	75
Çizelge 5.33.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-3 üretimi.....	75
Çizelge 5.34.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-3 üretimi	75
Çizelge 5.35.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-4 üretimi.....	76
Çizelge 5.36.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-4 üretimi	76
Çizelge 5.37.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama DPA değeri.....	76
Çizelge 5.38.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama DPA değeri.....	76
Çizelge 5.39.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fiyon Reaksiyon Sayısı.....	77

- Çizelge 5.40.** %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fiyon Reaksiyon Sayısı..... 77
- Çizelge 5.41.** %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fisil Yakıt Üretimi.....77
- Çizelge 5.42.** %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fisil Yakıt Üretimi.....77



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Fisyon reaksiyonunun gösterimi	7
Şekil 2.2.	Potansiyel Engeli.....	10
Şekil 2.3.	Döteryum-Döteryum reaksiyonunun gösterimi	11
Şekil 2.4.	Döteryum-Trityum reaksiyonunun gösterimi	11
Şekil 3.1.	Bir hibrit reaktörünün gösterimi	18
Şekil 3.2.	APEX hibrit reaktörü gösterimi	22
Şekil 3.3.	Yerçekimi momentum tahrikiyle (GMD) akışkan duvar Kavramı gösterimi	24
Şekil 3.4.	Elektromanyetik olarak tutma (EMR) akışkan duvar kavramı gösterimi	25
Şekil 3.5.	Lityum için sıcaklık akış şeması	28
Şekil 3.6.	Flinabe için sıcaklık akış şeması.....	29
Şekil 3.7.	Li ₂₀ Sn ₈₀ için sıcaklık akış şeması.....	29
Şekil 3.8.	Flibe için sıcaklık akış şeması.....	30
Şekil 5.1.	Hesaplamalarda kullanılan APEX hibrit reaktörünün Gösterimi.....	78
Şekil 5.2.	Hesaplamada kullanılan APEX hibrit reaktörün bölge yarıçap ve kalınlıkları.....	78
Şekil 5.3.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında ortalama Nötron Akısı.....	79
Şekil 5.4.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında ortalama Nötron Akısı.....	79
Şekil 5.5.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Nötron Akısı.....	80
Şekil 5.6.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Nötron Akısı.....	80
Şekil 5.7.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında Depolanan Isı Enerjisi değeri.....	81
Şekil 5.8.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında Depolanan Isı Enerjisi değeri.....	81
Şekil 5.9.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre Depolanan Isı Enerjisi değeri.....	82
Şekil 5.10.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre Depolanan Isı Enerjisi değeri.....	82
Şekil 5.11.	% 10 UC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Proton üretimi.....	83
Şekil 5.12.	% 10 ThC ₂ , % 89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Proton üretimi.....	83

Şekil 5.13.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Proton üretimi.....	84
Şekil 5.14.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Proton üretimi.....	84
Şekil 5.15.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Döteryum üretimi.....	85
Şekil 5.16.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Döteryum üretimi.....	85
Şekil 5.17.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Döteryum üretimi.....	86
Şekil 5.18.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Döteryum üretimi.....	86
Şekil 5.19.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Tritiyum üretimi.....	87
Şekil 5.20.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Tritiyum üretimi.....	87
Şekil 5.21.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Tritiyum üretimi.....	88
Şekil 5.22.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Tritiyum üretimi.....	88
Şekil 5.23.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-3 üretimi.....	89
Şekil 5.24.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-3 üretimi.....	89
Şekil 5.25.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-3 üretimi.....	90
Şekil 5.26.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-3 üretimi.....	90
Şekil 5.27.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-4 üretimi.....	91
Şekil 5.28.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-4 üretimi.....	91

Şekil 5.29.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-4 üretimi.....	92
Şekil 5.30.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-4 üretimi.....	92
Şekil 5.31.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama DPA değeri.....	93
Şekil 5.32.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama DPA değeri.....	93
Şekil 5.33.	% 10 UC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ -CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama DPA değeri.....	94
Şekil 5.34.	% 10 ThC ₂ , %89.9-89 Li ₂₀ Sn ₈₀ ve %0.1-1 AmF ₃ - CmF ₃ -NpF ₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama DPA değeri.....	94
Şekil 5.35.	Th ve U'un takip ettikleri yarı ömür ve geçekleştirdikleri Reaksiyonlar.....	53

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

U	Uranyum
Th	Toryum
C	Karbon (Grafit)
Np	Neptünyum
Am	Amerisyum
Cm	Küriyum
Pu	Plütonyum
Li	Lityum
n	Nötron
T	Tritiyum
D	Döteryum
TBR	Tritiyum üretim oranı
M	Enerji çoğaltma faktörü
°K	Kelvin
°F	Fahrenheit
APEX	Advanced Power Extraction
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu
FPY	Tam güç yılı
eV	Elektro Volt
keV	Kilo Elektro Volt
MeV	Mega Elektro Volt
MW	Mega Watt
akb	atomik kütle birimi
E _{uy}	Uyarılma Enerjisi
fm	femtometre

1. GİRİŞ

Dünyadaki nüfusun hızlı yükselişi ve bütün alanlarda artan teknoloji kullanımını enerji gerekliliğinin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Enerjiye olan ihtiyacın ve enerji sarfiyatının artıyor olması enerji konusunun gelecek yüzyıllarda da uluslararası toplumun gündeminde kalacağını göstermektedir. Fosil kaynaklı enerji üretimi için gerekli hammadde rezervinin süratle düşmesi, bu yakıtların oluşumunun milyonlarca yılı bulması, çevreye salınan karbondioksit vb. gazlar nedeniyle meydana gelen sera etkisi insanları alternatif enerji kaynakları aramaya yönlendirmiştir.

Alman fizikçi Wilhelm Röntgen 1895 yılında havası boşaltılmış cam tüpün içerisinden elektrik akımını geçirmesi sonucu X ışınlarının üretimi ile beraber iyonlaştırıcı radyasyon bulmuştur. Sonraki yıl Fransız asıllı bilim adamı Antoine Henri Becquerel Radium ile Uranyum karışımından oluşan bir maddenin fotoğraf filminin kararmasına yol açtığını tespit etmiştir. Bu kararmanın uranyum ile radium karışımının alfa ve beta parçacıkları yayımından meydana geldiğini düşünmüştür. Pierre Curie ve Marie Curie, Uranyum Radium karışımının fotoğraf filminde kararmasına “Radyoaktivite” adını vermiştir. Radyoaktivitenin keşfiyle, 20. Yüzyıl atom çalışmalarının başlangıcı olmuştur [1,2]. Nükleer enerji, atom çekirdeklerinin parçalanmasıyla (filyon) ve birleşmesiyle (füzyon) meydana gelmektedir. Bilim insanları filyon ve füzyon tepkimelerinden elde edilen yüksek enerjileri kullanarak enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla nükleer reaktörler ve elektrik üretimi için nükleer santraller kurmuşlardır. Filyon ve füzyon reaksiyonları sonunda yüksek enerji sağlanması ve bunun sonucunda enerji ihtiyacının karşılanması, karbondioksit yaymaması, çevreye zarar vermemesi, en önemlisi de filyon ve füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesinde kaynak probleminin olmaması geleceğin alternatif temiz enerji kaynağının nükleer reaktörler olacağını ve enerji ihtiyacının büyük ölçüde nükleer reaktörlerden sağlanacağını göstermektedir.

Nükleer reaktörler, içerisinde gerçekleşen reaksiyonlara göre filyon, füzyon ve hibrit olmak üzere 3'e ayrılır. 2019 itibariyle dünyada 30 ülkede 450 tane filyon reaktörü işlemektedir [3]. 18 ülkede ise 57 filyon reaktörü inşaatı sürmektedir [4]. Füzyon ve hibrit ise ekonomik ve teknolojik imkânların yetersizliği nedeniyle şu an için araştırma ve laboratuvar aşamasındadır.

Nükleer enerji üretimi için kullanılan fisyon reaktörlerinde yakıt olarak %3-5 oranında zenginleştirilmiş ^{235}U kullanılır. Doğal uranyum %99,2742 oranında ^{238}U , %0,7204 oranında ^{235}U ve %0,0054 oranında da ^{234}U izotopundan oluşur [5]. ^{238}U izotopu sadece hızlı nötronlarla fisyon reaksiyonu verebilir. ^{238}U doğada çok fazla bulunmasına karşın yavaş (termal) nötronlarla tesir kesiti çok düşüktür bu nedenle enerji üretiminde kullanılmamaktadır. ^{235}U izotopu ise hızlı ya da yavaş nötronlarla fisyon reaksiyonu verebilir ve reaktörlerde yakıt olarak kullanılır. Ancak ^{235}U 'in tesir kesiti yüksek olmasına rağmen doğada çok az miktarda bulunmaktadır. Bu sebeple günümüzde kullanılan reaktörler uranyumun sadece %1'ini değerlendirip %99'unu ise yüksek derecede radyoaktif atık şeklinde reaktörde bırakmaktadır. Reaktörlerde yakıtın bir defa yakılması sonucu "yüksek seviyede atık" denilen Uranyum-Ötesi elementler (^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{245}Cm) ile uzun ömürlü fisyon ürünleri (^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{129}I , ^{135}Cs) oluşmaktadır [6].

Dünyada yaklaşık olarak 450 nükleer güç reaktörü tarafından dünya elektriğinin yaklaşık %11'i üretilmektedir. 2019 yılı itibariyle mevcut fisyon reaktörlerinde 1 yılda elde edilen toplam kurulu güç 396,902 MW'tır [4]. Bu gücün elde edilebilmesi için yılda yaklaşık 8500 ton yakıt harcanıp, 23 ton/MW radyoaktif atık oluşmaktadır [7,8]. Bu radyoaktif atıkların yaklaşık %94,6'sını (21,76 ton/MW) uranyum, %4,2'sini (0,97 ton/MW) fisyon ürünleri, %1,2'sini (0,28 ton/MW) uranyum ötesi elementler oluşturmaktadır [9]. Radyoaktif atıkların etkin doz katsayısı miktarları, çıkış miktarları, yarılanma ömürleri Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir. Radyoaktif atıkların insan sağlığını ve doğayı etkilememesi, doğanın ve insanların en iyi biçimde korunması için atıklar, jeolojik depolama alanlarına götürülmektedir [10,11]. Fakat her yıl yaklaşık 8500 ton radyoaktif atığın jeolojik depolama alanlarına götürülüp depolanması, bu alanların gelecekte giderek daha büyük bir alan kaplayıp insan hayatını tehdit edeceğini göstermektedir.

2017 de Amerika 98 adet reaktörle ülke elektriğinin %20'sini, Fransa 58 adet reaktörle ülke elektriğinin %72'sini, Japonya 37 adet reaktörle ülke elektriğinin %2,2'sini sağlamaktadır. Amerika, Fransa ve Japonya'da bulunan toplam 193 adet nükleer reaktör ile dünyadaki 450 adet nükleer reaktörden üretilen elektrik üretiminin yaklaşık %57'sini elinde bulunduran ülkelerdir. Bunun yanında bu üç ülke dünyadaki nükleer reaktör sayısının neredeyse yarısına sahip ülkelerdir. 2017 yılı itibariyle Bulgaristan, Kanada, Almanya, Litvanya, Hollanda, İspanya, İsveç, İngiltere ve ABD

nükleer reaktör sayılarını azaltırken; Brezilya, Çin, Çek Cumhuriyeti, Fransa, Hindistan, Japonya, Kore, Pakistan, Romanya, Rusya ve Slovak Cumhuriyeti nükleer reaktör sayılarını artıran ülkelerdir [3]. Nükleer reaktör sayılarını azaltma kararı alan ülkelerin 1979 yılında A.B.D.’deki “TMI-2” kazası, 1986 yılında Rusya’daki “Çernobil” kazasının olması, nükleer reaktörlerin çevre sorunları oluşturması ve nükleer silahlanmanın artması endişesi ile bu karara vardıkları düşünülmektedir. Ancak yapılan araştırmalar reaktör kazalarının normal çalışma şartlarında son derece güvenli olduğunu ve reaktör kazalarının asıl nedeninin ihmal ve bilgisizlikten kaynaklandığını göstermiştir.

Çizelge 1.1. Radyoaktif elementler, atık yüzdeleri, yarılanma ömürleri ve etkin doz katsayısı miktarlarının gösterimi [9]

Radyoaktif Elementler	Atık Yüzdesi	Yarı Ömür (yıl)	Etkin Doz Katsayısı (10^{-8} Sv/Bq)
Uranyum	%94,6		
²³⁵ U	%0,8	$7,04 \cdot 10^8$	4,7
²³⁶ U	%0,6	$2,34 \cdot 10^7$	4,7
²³⁸ U	%98,6	$4,47 \cdot 10^9$	4,5
Neptünyum	%0,06		
²³⁷ Np	%100	$2,14 \cdot 10^6$	11
Plütonyum	%1,1		
²³⁸ Pu	%2,5	87,7	23
²³⁹ Pu	%54,2	$2,41 \cdot 10^4$	25
²⁴⁰ Pu	%23,8	$6,56 \cdot 10^3$	25
²⁴¹ Pu	%12,6	14,4	0,47
²⁴² Pu	%6,8	$3,75 \cdot 10^5$	24
Amerisyum	%0,05		
²⁴¹ Am	%63,8	432	20
²⁴³ Am	%36	$7,37 \cdot 10^3$	19
Küriyum	%0,01		
²⁴³ Cm	%1	29,1	15
²⁴⁴ Cm	%92,2	18,1	12
²⁴⁵ Cm	%5,7	$8,5 \cdot 10^3$	21
²⁴⁶ Cm	%1,1	$4,76 \cdot 10^3$	21
Fisyon Ürünleri	%4,2		
⁹³ Zr	%30,6	$1,53 \cdot 10^6$	0,11
⁹⁹ Tc	%35,2	$2,11 \cdot 10^5$	0,078
¹⁰⁷ Pd	%9,5	$6,5 \cdot 10^6$	0,004
¹²⁶ Sn	%1,1	$1 \cdot 10^5$	0,47
¹²⁹ I	%7,4	$1,57 \cdot 10^7$	11
¹³⁵ Cs	%16,2	$2,3 \cdot 10^6$	0,2

Nükleer fisyon reaktörlerinden yüksek enerji sağlanması ve karbondioksit gazı yaymamasına rağmen, reaktör içinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda kararsız, uzun ve kısa yarı ömürlü radyoaktif atıklar meydana gelmektedir. Radyoaktif atıkların oluşumu, taşınması, depolanması nükleer fisyon reaktörleri için önemli bir sorundur. Ayrıca mevcut reaktörlerin yakıt olarak doğal uranyumun %1 gibi çok düşük bir yüzdesini kullanıp kalan kısmının atık olması gelecekte nükleer yakıt temininin zorlaşacağını göstermektedir. Bazı araştırmalara göre, doğal uranyumdan elde edilen bölünebilir yakıt ihtiyacının, farklı bir seçenek bulunmadıkça, 21. yüzyılın ilk çeyreğinin sonuna doğru karşılanamaz bir hal alacağı söylenmektedir.

Nükleer enerji üretimi için araştırma aşamasında olan füzyon reaktörlerinde yakıt olarak döteryum-döteryum ya da döteryum-trityum kullanılır. Döteryum ve trityum hidrojenin izotoplarıdır. Hidrojen %0,015 oranında döteryumdan oluşur. Trityum ise 12,3 yıl yarılanma ömrüne sahip radyoaktif bir izotop olup, suni olarak üretilir. Füzyon reaktörlerinde döteryum-döteryum ya da döteryum-trityum yakıtlarının kullanılması ile fisyonla oranla çok daha yüksek enerji sağlanmaktadır. Ayrıca füzyon reaksiyonunda fisyondaki kadar radyoaktif atık oluşmamaktadır.

Radyoaktif atıkların fisyondaki kadar çok meydana gelmemesi, Füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için kullanılan hammaddelerin bol ve kolay bulunması, füzyon reaksiyonu sonunda çok yüksek enerjinin açığa çıkması füzyon reaktörlerini daha ilgi çekici hale getirmiştir. Yapılan denemeler sonucu füzyon enerjisi çok kısa süreler için elde edilebilmiştir. Ayrıca füzyon reaksiyonu en az 100 milyon °C'de gerçekleşebildiğinden, bilimsel ve teknik altyapı yetersizliğinden dolayı bu yüksek sıcaklıkta füzyonun kontrollü ve sürekli olarak sağlanması şimdilik mümkün olamamıştır [12]. Gelecekte bilgi ve teknoloji yeterliliği oluşması sonucunda füzyon reaktörlerindeki bu sorunların giderileceği ve ihtiyaç duyulan temiz, ucuz, sürekli enerji kaynağı olarak füzyon reaktörlerinin kullanılacağı düşünülmektedir.

Fisyon reaktörlerinde uranyum yakıtının sadece %1'lik kısmının kullanılıp geri kalan kısmının atık olarak bırakılması, Füzyon reaktörlerinin şimdilik enerji kaynağı olarak kullanılamamasından dolayı önümüzdeki yüzyılda nükleer yakıt temini noktasında herhangi bir sıkıntı olmaması için şimdiden farklı kaynaklar arayışına yönelmek bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu yüzden yüksek enerji ve

nükleer yakıt elde edilmesi, depolama sahalarındaki atık miktarının düşürülmesi, kullanılan yakıtta yer alan Uranyum Ötesi elementler, işlenerek tekrar yakıt olarak kullanılması ve uzun ömre sahip fisyon ürünlerinin zararsız şekle dönüştürülmesi konularında birçok araştırmacı hibrit reaktör sistemini teklif etmiştir. Bu reaktör sistemi; çekirdeklerin birleşme ve bölünme (füzyon-fisyon) reaksiyonlarının aynı zamanda gerçekleştirilebildiği sisteme denir.

Diğer reaktörlerde olduğu gibi, hibrit reaktörlerin de amacı; kaynak sorunu olmayan, yüksek enerji sağlayan, radyoaktif atık ve CO₂ gibi çevre sorununa neden olmayan temiz, ucuz ve sürekli enerji kaynağı olmaktır.

Füzyon reaktörlerinde olduğu şekilde nükleer enerji üretimi için araştırma aşamasında olan hibrit reaktörlerinde de yakıt olarak döteryum-döteryum ya da döteryum-trityum yakıtı kullanılır. Fisyon reaktörlerinde kullanılan yakıtlara göre (U, Th, vb.), hibrit reaktörlerinde yakıt olarak kullanılan döteryum suda bol miktarda bulunur. Bir ton suda yaklaşık 30 gr döteryum bulunur. Ayrıca trityum yapay olarak kolayca elde edilebilmektedir. Bu yüzden döteryum ve trityumun reaktör yakıtı olarak kullanılması daha cazip görünür.

Hibrit reaktörlerinde enerji üretimi çoğunlukla; füzyon reaksiyonunun gerçekleştiği plazma ile fisyon ve dönüşüm reaksiyonlarının gerçekleştiği duvardan (blanket) sağlanmaktadır. Buna göre, döteryum-trityum yakıtının füzyon reaksiyonu ile oluşan plazmadan 3,5 MeV'lik Helyum ve 14,1 MeV'lik füzyon nötronları açığa çıkmaktadır. Füzyon nötronları plazmanın etrafını saran ²³⁸U veya ²³²Th gibi fertil malzemelerin bulunduğu duvara çarpar. Böylece füzyon nötronları ²³⁸U veya ²³²Th fertilleri ile dönüşüm ve fisyon reaksiyonu yaparak ²³⁹Pu veya ²³³U fisilleri ve fisyon nötronları oluşturmaktadır. ²³⁹Pu ve ²³³U fisilleri fisyon reaktörlerinde kullanılan yakıt hammaddeleridir [13,14,15]. Ayrıca fisyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılan doğal uranyumun sadece, ²³⁵U'in tesir kesitinin yüksek olmasından dolayı ²³⁵U'in bolluk oranı olan yaklaşık %1'lik kısmı kullanılıp, ²³⁸U'in tesir kesitinin az olmasından dolayı ²³⁸U'in bolluk oranı olan yaklaşık %99'luk kısmı kullanılmamaktadır. Hibrit reaktör sayesinde döteryum-trityum füzyon reaksiyonu ile açığa çıkan 14,1 MeV'lik füzyon nötronları plazmanın etrafını saran ²³⁸U ile nötron soğurulması (yakalması) ile dönüşüm yolu ile ²³⁸U'den ²³⁹Pu yakıtı elde edilmektedir. Yani hibrit reaktörde fisyon ve ²³⁹Pu'a dönüşümü ile doğal uranyum

%100 kullanılmış olmaktadır. Hibrit reaktörde uranyumun %100 kullanılması ile uranyumun, 21. yuzyılın ilk çeyreğinin sonuna kadar değil çok daha uzun yıllar nükleer yakıt olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Hibrit reaktörde, daha kolay ve bol bulunan yakıtların (döteryum, trityum) füzyon reaksiyonu ile meydana gelen hızlı nötronların, fertil malzeme ile dönüşüm ve fisyon reaksiyonu sonucu hem enerji hem de fisyon reaktörleri için nükleer yakıt üretilmektedir. Ayrıca hibrit reaktörler, fisyon reaktörlere göre daha az radyoaktif atık oluşturur. Yani uzun ömürlü radyoaktif atıkların, plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlarla fisyon reaksiyonu yapması ile radyoaktif atıklar, kararlı ya da kısa ömürlü hale getirilmektedir.

Füzyon reaktörler; yüksek enerji sağlaması, CO₂ ve radyoaktif atık gibi evre sorununa neden olmaması, kaynak sorunu olmaması bakımından fisyon reaktörlerine göre avantajlıdır. Hibrit reaktörler, bu avantajlara ek olarak füzyon ve fisyon reaksiyonlarını bir arada gerçekleştirerek nükleer enerji ve fisil yakıt üretimi sağladığından füzyon reaktörlerine göre daha avantajlıdır.

Buna göre, uygun akışkan seçimi ile gelecekte hibrit reaktörlerin fisyon ve füzyon reaktörlerine tercih edilerek gerek duyulan temiz, ucuz, sürekli enerji kaynağı olarak hibrit reaktörlerin kullanılacağı tahmin edilmektedir.

2. FİSYON ve FÜZYON REAKSİYONLARI

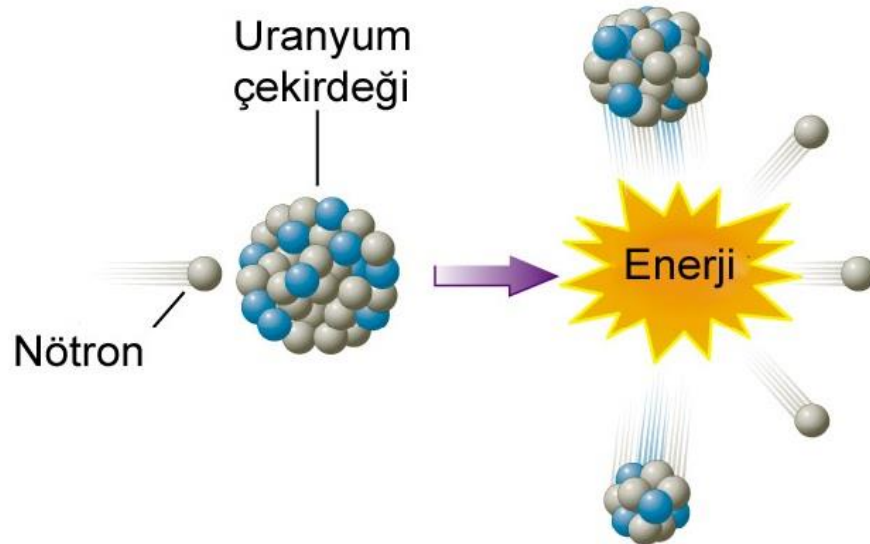
2.1. Fisyon Reaksiyonları

Ağır ve kararsız yapıya sahip radyoaktif çekirdeklerin bir nötron absorbesi sonucu iki hafif çekirdek ve enerji oluşurmasıdır.



Fisyon doğal bir bozulma sonucunda olacağı gibi; foton ve nötron düşük enerjili bir parçacık absorbesi veya kendiliğinden potansiyel engeli aşarak ya da daha kolay şekilde engeli aşmayı sağlayacak kadar yüksek enerjili uyarılmış durum veya bileşik çekirdek durumu yaparak oluşabilir. Yeterli uyarılma enerjisi oluştuğunda da bütün çekirdekler parçalanabilir, bu durum ağır çekirdekler için daha önem taşımaktadır.

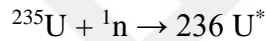
Fisyon reaksiyonu sonucu; iki ağır fisyon ürünü ile ortalama iki yüksek enerjili nötron ortaya çıkar. Fisyon ürünlerinin ne oldukları α veya β bozunumundaki reaksiyonlarda ortaya çıkan ürünler gibi tam olarak tespit edilemez. Bir fisyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan enerji yaklaşık 200 MeV'dir. Bu enerji fisyon reaksiyonu sonucunda meydana gelen fisyon ürünleri ile nötronlar arasında pay edilir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Fisyon reaksiyonunun gösterimi [16]

Bölünme esnasında sistemin ilk enerjisi ile son enerjisi arasındaki fark fisyon reaksiyonundan açığa çıkan enerjidir. Fisyon reaksiyonu yapan izotoplar iki kısma ayrılabilir. Birinci tür ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu gibi izotoplar termal enerjili nötronlarla çok iyi Fisyon yaparlar. Bunlar içinde sadece günümüz nükleer reaktörlerinin nükleer yakıtı olan (UO_2) ^{235}U doğada tabii halde bulunur. Tabii uranyumun doğada % 0,7 oranında bulunur. İkinci tür ise yüksek enerjili nötronlarla Fisyon reaksiyonu yapabilen ^{232}Th , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu gibi izotoplar. ^{232}Th ve ^{238}U çekirdekleri doğada bol miktarda bulunur. Ama bu çekirdeklerin zincir fisyon reaksiyonları yapabilecekleri sürekli bir nötron kaynağı sağlanamadığı için fisyon yakıtı olarak kullanılması zordur. Günümüz reaktörlerinde üretken izotop olarak kaliteli fisyon yakıtı elde edilmesinde kullanılan ^{238}U doğal uranyum içinde % 99,7 oranında mevcuttur.

^{235}U bir tane nötron yakaladığında $^{236}\text{U}^*$ bileşik durumuna dönüşür.



Bu reaksiyonda uyarılma enerjisi;

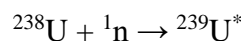
$$E_{uy} = [m(^{236}\text{U}^*) - m(^{236}\text{U})]c^2$$

Termal bölgede nötronun enerjisinin çok küçük olduğunu kabul edersek;

$$\begin{aligned} m(^{236}\text{U}^*) &= m(^{235}\text{U}) + m_n \\ &= 235,043924 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} \\ &= 236,052589 \text{ akb} \end{aligned}$$

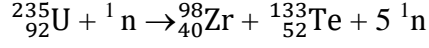
$$\begin{aligned} E_{uy} &= (236,052589 \text{ u} - 236,045563 \text{ u}) \times 931,502 \text{ MeV/u} \\ &= 6,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

^{236}U için aktivasyon enerjisi 6.2 MeV şeklinde bulunur [12]. Böylece ^{236}U 'yı fisyon oluşturabilecek hale yükseltmek için gereken aktivasyon enerjisi ^{235}U 'e bir ${}^1_0\text{n}$ ekleme sonucu elde edilen enerjidir. Bu, termal bölgede incelenen büyük tesir kesitiyle uyum sağlayacak şekilde, ^{235}U 'in enerjisi olmayan nötronlarla fisyonla uğrayabileceği manasına gelir. Benzer şekilde;



reaksiyonunun uyarılma enerjisini 4,8 MeV olur, çıkan sonuç ^{239}U 'un bulunan aktivasyon enerjisi 6,6 MeV'den küçük olur.

^{235}U ile ^{238}U 'in termal nötronlarla fisyonu uğraya birirlikleri arasındaki fark; 6,5 ve 4,8 MeV'lik uyarılma enerjilerinin farkından meydana gelmektedir.



$$Q = [m(^{235}_{92}\text{U}) + m(^1_0\text{n}) - m(^{98}_{40}\text{Zr}) - m(^{133}_{52}\text{Te}) - 5m(^1_0\text{n})] c^2$$

$$=[235,043924 - 97,912735 - 132,910910 - 4 \times 1,0086600] \times 931,502 \text{ MeV/u}$$

$$=172,904 \text{ MeV}$$

Coulomb enerjisi;

$$V = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{Z_1 \times Z_2}{R}$$

$$V = 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \times \frac{40 \times 52}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = 1,25 \times 98^{1/3} = 5,7630 \text{ fm}$$

$$R_2 = 1,25 \times 133^{1/3} = 6,3805 \text{ fm}$$

$$V = 246,65 \text{ MeV}$$

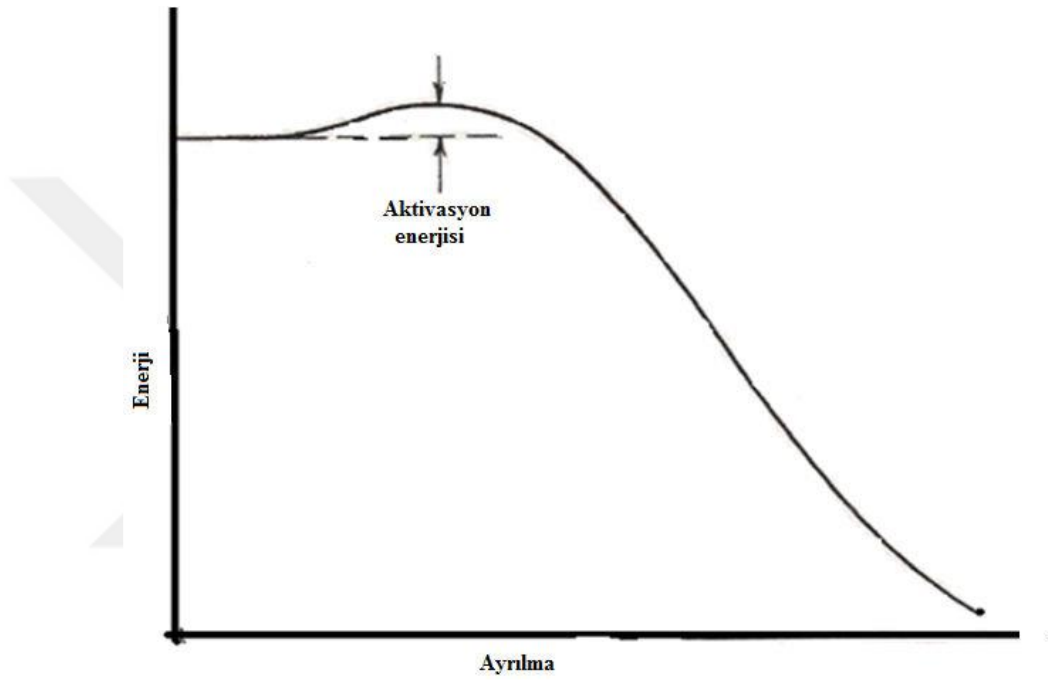
Coulomb engeli parçacıkların birbirlerinden ayrılmasını önler ve engel aşılmadığı için bozunma ihtimali azdır.

Bu hesaplama fisyonun oluşmasının niçin engellendiğini gösterebilir ancak kullandığımız değerler (engel yüksekliği için 246,65 MeV ve serbest bırakılan enerji için 214 MeV) tahmini değerlerdir ve kolaylıkla değiştirilebilirler.

Kendiliğinden fisyon yapabilen çekirdekler için, ortaya çıkan enerji iki parçacığın engeli delip çıkmalarına bir şans tanımak için coulomb engelini hemen altında kalır. Bazı çekirdekler ise fisyon gözlenemeyecek kadar engelin altında kalırlar, ancak bunlar düşük enerjili nötronlar veya fotonlarla oldukça küçük bir enerji soğurdıklarında engel yüksekliğinde veya daha üstünde bir ara durum meydana gelir, bu durumda indüklenmiş fisyon meydana gelmektedir. Bir çekirdeğin indüklenmiş fisyonu uğraması ara durum enerjisine bağlı olacaktır; bazı çekirdekler

için, termal nötronların enerjisi, engeli geçmek için yeterliyken bazılarında hızlı nötronlar gereklidir. Şekil 2.2. ağır çekirdekler için fisyon engelinin daha gerçekçi temsili verilmiştir.

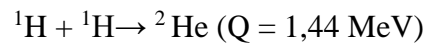
Fisyon ürünleri nötron fazlalığını, fisyon anında (10^{-16} s içinde) yayınlayarak gönderirler. Bunlara ani nötronlar denir. Bir fisyon reaksiyonunda yayınlanan ani nötronların miktarı iki fisyon ürününün yapısına göre değişebilir. Fisyonda ani nötronlara ilaveten gecikmiş nötronlar da yayınlanır [12].



Şekil 2.2. Potansiyel Engeli [12]

2.2. Füzyon Reaksiyonları

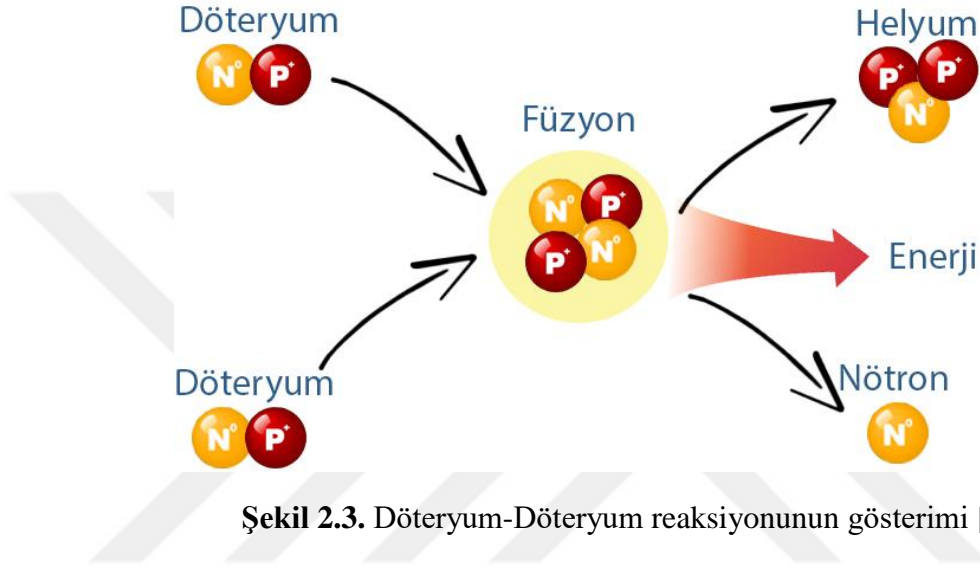
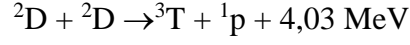
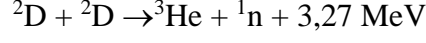
İki hafif çekirdeğin birleşimi ile daha ağır bir çekirdek üretmesi olayıdır. Füzyon reaksiyonunda meydana gelen enerji fisyon reaksiyonundan çok daha yüksektir. Füzyon, güneş ve diğer yıldızların güç kaynağıdır. En temel füzyon reaksiyonu,



Ancak ${}^2\text{He}$ 'nin kararsız olması sebebiyle böyle bir reaksiyon oluşamaz. Gerçekleşmesi muhtemel füzyon reaksiyonları döteryum-döteryum, döteryum-trityum reaksiyonlarıdır [12].

2.2.1. Döteryum-Döteryum (D-D) Reaksiyonları

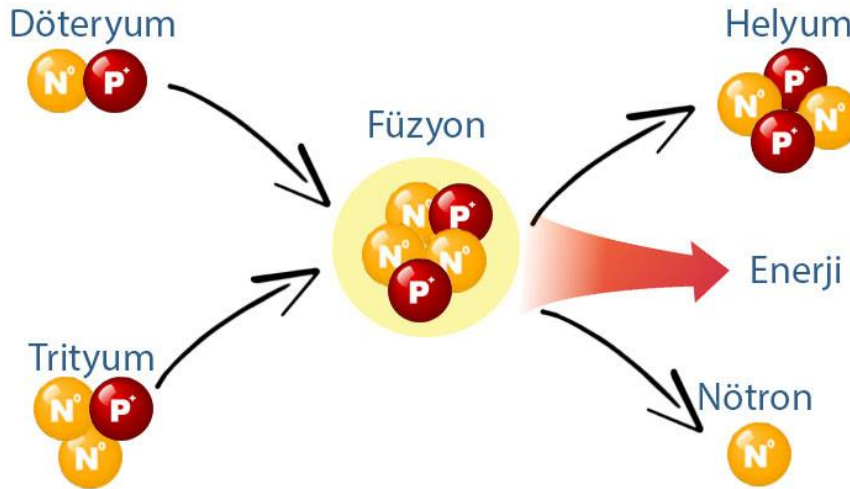
Döteryum, hidrojen çekirdeğinin kararlı bir izotopu olan bir proton ile bir nötrondan oluşur. Deniz suyunda fazlasıyla bulunur [17] (Şekil2.3.). Olması en muhtemel reaksiyonlar şunlardır;



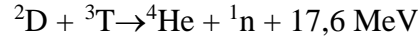
Şekil 2.3. Döteryum-Döteryum reaksiyonunun gösterimi [18]

2.2.2. Döteryum-Trityum (D-T) Reaksiyonları

Bir döteryum ve bir trityum çekirdeğinin reaksiyonu sonucu meydana gelen füzyon reaksiyonudur (Şekil 2.4.).

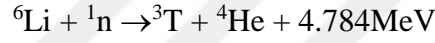


Şekil 2.4. Döteryum-Trityum reaksiyonunun gösterimi [18]



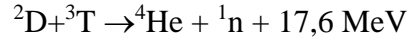
Gelen parçacıkların hareket enerjileri önemsenmeyecek kadar küçükse D-T reaksiyonu ile açığa çıkan 17,6 MeV'lik enerji ${}^4\text{He}$ ve ${}^1\text{n}$ arasında bölüşülür. Enerji paylaşımı sonucunda yaklaşık 14,1 MeV değerinde bir nötron ve 3,5 MeV değerinde bir ${}^4\text{He}$ yayınlanır. Büyük bir enerji açığa çıkardığı için D-T reaksiyonu çoğunlukla hızlı nötron kaynağı olarak kullanılır [14,19].

Hidrojenin doğal bir izotopu olan Döteryum deniz suyunda kolaylıkla elde edilebilir. Ancak, trityum hidrojenin yapay bir izotopu olduğundan dolayı lityumun nötronla reaksiyonu sonucunda meydana gelir. Trityum aşağıda verilmiş reaksiyonlarla üretilir.



2.2.3. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması

D-T reaksiyonu ile oluşan füzyon reaksiyonu sonunda ortaya çıkan enerji şöyle hesaplanır:



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

$$Q = (\text{Reaksiyona giren} - \text{Reaksiyondan çıkan}) \times c^2$$

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

$$Q = ([2,014100 \text{ akb} + 3,016049 \text{ akb}] - [4,002603 \text{ akb} + 1,008665 \text{ akb}]) \times 931,32 \text{ MeV/akb}$$

$$Q = ([5,03040 \text{ akb}] - [5,011268 \text{ akb}]) \times 931,32 \text{ MeV/akb}$$

$$Q = (0,018881 \text{ akb}) \times 931,32 \text{ MeV/akb}$$

$$Q = 17,586 \text{ MeV}$$

Ortaya çıkan bu enerji Helyum ve füzyon nötronları arasında paylaşılır. D-T için yukarıda yazılan füzyon reaksiyonuyla ortaya çıkan füzyon enerjisi yaklaşık 17,6 MeV'dir. Bu enerji için;

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

$$E_{He}=17,6 \text{ MeV} \times [1,008665 \text{ akb} / (1,008665 \text{ akb} + 4,002603 \text{ akb})]$$

$$E_{He} \approx 3,54 \text{ MeV'dir.}$$

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

$$E_n=17,6 \text{ MeV} \times [4,002603 \text{ akb} / (1,008665 \text{ akb} + 4,002603 \text{ akb})]$$

$$E_n \approx 14,06 \text{ MeV'dir.}$$

Görüldüğü gibi, D-T füzyon reaksiyonu ile ortaya çıkan füzyon nötronları, yaklaşık 14,1 MeV'lik çok yüksek enerji değerine yani enerjinin yaklaşık %80'ine sahiptir. Oysaki fisyon reaksiyonu ile sağlanan fisyon nötronlarının her biri sadece 2 MeV değerindedir. Ancak D-T füzyon reaksiyonu ile açığa çıkan 14,1 MeV değerindeki nötronlar yüksek enerjili olduklarından manyetik olarak hapsedilemezler ve manyetik bir alan içinde durdurulamazlar. Bu sebepten plazma hacmi nötronu tutan bir madde ile kaplanmalıdır. D-D reaksiyonunda ise açığa çıkan enerjinin yaklaşık %75'i proton ve nötronlara aittir.

Enerji üretimi için füzyon reaksiyonunun fisyon reaksiyonuna göre başlıca iki üstünlüğü bulunmaktadır. İlki, hafif çekirdeklerin kolay elde edilebilmeleri ve bol miktarda bulunmalarıdır. İkincisi, füzyonda meydana gelen ürünlerin genelde hafif çekirdekler olmaları ve radyoaktif ağır çekirdeklerden daha kararlı olmasıdır. Füzyon reaksiyonunun dikkat çeken dezavantajı, hafif çekirdeklerin birleşme öncesi Coulomb engelini aşmaları gerekmektedir [10,12-14,20].

2.2.4. Füzyon Reaksiyonlarının Gerçekleşebilme Koşulları

Laboratuvar ortamında Füzyon enerjisinin sağlanabilmesi için sıcaklık, yoğunluk ve zaman parametrelerinin gerekli seviyede oluşturulması gereklidir.

A. Sıcaklık: Füzyon reaksiyonu, maddenin plazma halinde gerçekleşebilen bir nükleer reaksiyon olduğundan, yüksek sıcaklık füzyon reaksiyonunun ilk şartıdır.

İki hafif çekirdeğin birleşmesi ile Füzyon reaksiyonu meydana gelir. Fakat tüm atomların çekirdekleri pozitif elektrik yüklü olduklarından, birbirlerini elektrostatik itme kuvvetiyle iterler. İki çekirdeğin birleşip füzyon reaksiyonu gerçekleştirebilmeleri için ise bu elektrostatik itme engelini delmeleri gereklidir. Elektrostatik itme kuvvetini delebilmenin tek yolu, atomları yüksek sıcaklıklara kadar ısıtmaktır. Atomlar yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldığında gaz (buhar) haline dönerler. Atomlar daha da ısıtılırsa iyonize duruma geçerler yani atomlar sıcaklığın etkisi ile dış yörüngelerindeki elektronlarını salarak pozitif iyonlar ile negatif elektronların karışımını oluşturur. Maddenin bu dördüncü haline **plazma** denir. Plazma çok yüksek sıcaklıklarda negatif elektronlar ve pozitif iyon karışımı ile meydana gelir. Elektrostatik itme kuvveti engelini delip, iki çekirdeğin birleşerek füzyon reaksiyonunu oluşturması için plazma sıcaklığı çok yüksek olmalıdır. Plazma fiziğinde, plazmada sıcaklık çok yüksek olduğundan sıcaklık, Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) ya da Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) ile ifade edilmeyerek genellikle, elektron volt (eV) ya da kilo elektron volt (keV) şeklinde ifade edilir. Parçacıkların ortalama kinetik enerjileri 10 keV'dir. 1 keV değeri $1,16 \cdot 10^7$ $^{\circ}\text{K}$ değerine eşittir. Buna göre, D-T füzyon reaksiyonunun oluşması için plazma sıcaklığı yaklaşık olarak $4,5 \cdot 10^7$ $^{\circ}\text{K}$ ve D-D füzyon reaksiyonu için ise $4 \cdot 10^8$ $^{\circ}\text{K}$ 'dir. İki çekirdeğin birleşip füzyon reaksiyonu oluşturması için sıcaklığın yeterince yüksek olması gereklidir. Bu yüzden füzyon reaksiyonları, sıcaklığa dayalı nükleer reaksiyon anlamına gelen “termonükleer reaksiyon” şeklinde tanımlanmaktadır.

B. Yoğunluk: Birim hacimdeki iyon sayısına Yoğunluk denir ve “n” ile gösterilir. Yoğunluk yüksek olmalıdır. Birim hacimde çok fazla iyon bulunursa, çarpışmaları o kadar fazla meydana gelir. Parçacıklar arasındaki çarpışma fazla olabilmesi için, etkileşen çekirdeklerin yüksek bir yoğunluğa sahip olmaları gereklidir. Birim hacimde tanecik yoğunluğu 10^{20} tanecik/ m^3 'den büyük olması gerekmektedir.

C. Zaman: Füzyon reaksiyonunun devamlılığı için plazma sınırlama zamanının uzun olması gerekmektedir. Plazma sınırlama zamanı “t” ile gösterilip “saniye” cinsinden ifade edilir. Plazmanın daha hızlı tutuşması için; birim hacimde iyon çok olursa, iyonların çarpışmaları o kadar fazla olur. Fakat birim hacimdeki iyon sayısı az olursa, iyonların çarpışmaları daha az olacağından plazma tutuşması daha yavaş olur. O halde plazmanın tutuşması için gerekli olan sıcak tutma süresi plazmanın yoğunluğu ile ters orantılıdır. Yani, yoğunluk yükselirse süre kısalar, yoğunluk

düşerse süre uzar, ancak bunların çarpımları sabittir. İyon yoğunluğu ile sınırlama süresinin çarpımının minimum değerine **Lawson Ölçütü** denir. Bu ölçüt, farklı çalışma sıcaklıkları ve farklı yakıtlar için farklıdır. 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 [12,21].

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

a. Radyo frekansı (rf) ısıtma yöntemi: Plazma ısıtması toroidal akımlar ile yapılır. Toroidal akım, radyo frekansı dalgalarının elektronları sürmesi ile oluşur ve bu akımdan dolayı plazma ısıtılır.

b. Nötr ışın demeti enjeksiyonu (NBI) yöntemi: Plazmayı ısıtma, hidrojen veya döteryum iyonlarından oluşan ışın demeti 10-100 keV'lik enerjilere kadar çıkartılarak yük değiş-tokuşu ile ışın demeti nötr hale getirilir. Işın demetindeki parçacıklar nötr olduklarında manyetik alanda sapmadan geçebilirler. Nötr parçacıklar plazma içindeki pozitif iyonlar ve negatif elektronlarla Coulomb saçılması yaparak enerjilerini plazmaya ileterek yok ederler. Böylece plazma ısıtması NBI yöntemi ile gerçekleşmiş olur.

Füzyon reaksiyonu için plazma tutuşması kullanılan ek ısıtma yöntemleri için sağlanır. D-T füzyon reaksiyonundan çıkan yaklaşık 3,5 MeV'lik enerjili alfa parçacıkları reaksiyonları devam etmek için gereken ısıyı vermektedirler. Alfa parçacıkları manyetik alanlar yardımıyla plazma içine tutularak ve plazmada gerçekleştirdiği çarpışmalarla var olan enerjisini plazmaya ileterek plazmanın ısıtılmasını sağlar [12,21,22].

2.2.5. Füzyon Yakıtları

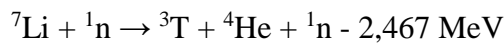
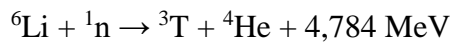
Füzyon nükleer enerji yakıtı olarak döteryum-döteryum ya da döteryum-trityum 'dur.

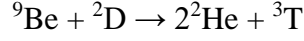
Döteryum; Ağır hidrojen olarak da bilinen, çekirdeğinde bir nötron ve bir protona sahip olan ve ağır suyun ayrıştırılmasıyla elde edilen hidrojenin kararlı izotopudur. ²D ya da ²H şeklinde gösterilir. Atom ağırlığı 2,014'dur. Tabii hidrojen %99,985 ¹H

ve %0,015 ^2H 'den meydana gelir. Buna göre 30 gr döteryum yaklaşık bir ton suda bulunur. Radyoaktif değildir. Döteryum 1931 yılında Amerikalı kimyager Harold C. Urey ve arkadaşları tarafından keşfedilmiştir. İki parçacıklı olduğu için adını Yunanca "ikinci" anlamına gelen "deuteros" kelimesinden almıştır.

Döteryum sıradan hidrojenin karakteristiği olan tüm kimyasal reaksiyonlara girerek denk bileşikler oluşturur. Ancak normal hidrojene göre daha yavaş reaksiyona girer. Bu özelliğiyle hidrojen içeren kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonların araştırılmasında izotopik bir izleyici olarak yaygın şekilde kullanılır. Döteryumun donma noktası $8\text{ }^\circ\text{C}$, kaynama noktası ise $101,4\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Kırılma indisi suya göre daha küçüktür. Döteryum, normal su içinde bulunan çok küçük miktarlardaki ağır suyun ayrıştırılması ile üretilir. Nükleer reaktörler de üretilebilmesine rağmen maliyeti oldukça yüksektir. Günümüzde mevcut olan döteryumun büyük bir kısmının ise Büyük Patlama olayı sırasında üretildiğine inanılmaktadır.

Tritiyum; Hidrojen-3 olarak da bilinir, hidrojenin atom ağırlığı yaklaşık 3 olan izotopudur. ^3T ya da ^3H şeklinde ifade edilir. Bir proton ile iki nötrondan meydana gelen tritiyum çekirdeği kütlesi normal hidrojen çekirdeğinin üç katına eşittir. Tritiyum yarı ömrü 12,5 yıl olan radyoaktif bir parçacıktır ve doğal sudaki bolluğu doğal hidrojeninkinin 10-18'i kadardır. Tritiyumu ilk olarak 1934'te E. Rutherford, M. L. Oliphant ve P. Harteck, döteryumu yüksek enerjili döteronlarla (döteryum atomunun çekirdeği) bombardıman ederek, $\text{D}+\text{D}\rightarrow\text{H}+\text{T}$ bağıntısı uyarınca buldular. Libby ve A. V. Grosse ise kozmik ışınların atmosferdeki azota etki etmesi sonucunda oluştuğunu düşündükleri tritiyumun doğal suda bulunduğunu gösterdiler. Tritiyum izotopu tabiatta bulunmaz, yapay olarak üretilir. Tritiyumun donma noktası $252,5\text{ }^\circ\text{C}$, kaynama noktası ise $-248,12\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Yeryüzünün mevcut tritiyum miktarı yaklaşık 1 kg olarak tahmin edilmektedir. Bu yüzden tritiyum izotopu genellikle lityumun nötronlarla reaksiyonu sonucunda üretilir. Ayrıca berilyumun hızlandırılmış döteryum ile bombardımanından da tritiyum elde edilmektedir. Tritiyumun üretilme reaksiyonları şöyledir;



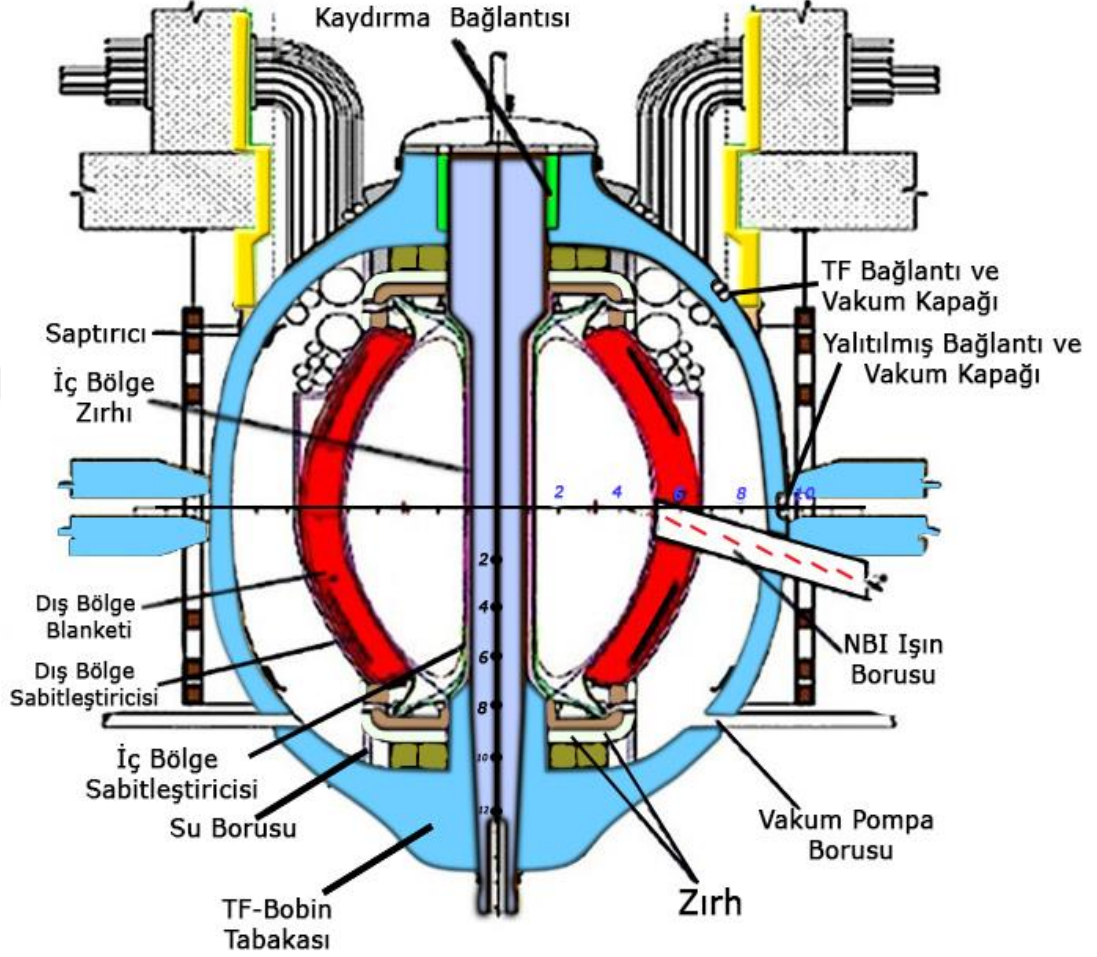


D-T reaksiyonuyla meydana gelen nötron, oluşan enerjinin %80'ine sahiptir (14,1 MeV) ve plazmayı çevreleyen lityum örtüsü tarafından yakalanabilir. ${}^4\text{He}$ ve ${}^3\text{H}$ ise enerjilerini ısı olarak lityum içinde depo ederler. Daha sonra sıcak sıvı lityum, türbini çalıştırmak için kullanılan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

Tritiyum ile elementler normal hidrojene benzer biçimde tepkimeye girer; ama oluşturduğu bileşiklerinin kütleleri hidrojen bileşiklerinden çok farklı olduğundan, kimyasal özellikleri de farklıdır. Bu nedenle trityum kimyasal reaksiyonlarda izleyici izotop olarak döteryum kadar çok tercih edilmez. Termonükleer silahlarda enerji kaynağı için D-T reaksiyonları kullanılır.

3. HİBRİT (FÜZYON-FİSYON) REAKTÖRÜ

Hibrit Reaktör; Füzyon (birleşme) ve fisyon (bölünme) reaktör özelliklerini içerisinde bir araya getiren reaktör sistemine denir (Şekil 3.1.).



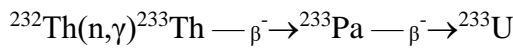
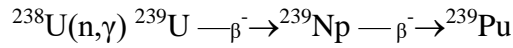
Şekil 3.1. Bir hibrit reaktörünün gösterimi [23]

Hibrit reaktör, yüksek oranda füzyon nötronlarının yakalanmasıyla, fertil malzemelerin (^{238}U veya ^{232}Th) fisyonu ve fisil malzemelere (^{239}Pu veya ^{233}U) transformasyon ve fisyon reaksiyonu yaptırarak, uzun ömürlü radyoaktif ürünlerden kullanışlı fisil malzemeler ve enerji üretmektir [24].

Hibrit reaktörlerde de enerji üretebilmek için fisyon ve füzyon reaktörlerinde olduğu gibi kullanılacak yakıtın belirlenmesi gereklidir. Yakıt olarak fisyon reaktörlerinde çoğunlukla uranyum kullanılmakta, füzyon reaktörlerinde ise D-D veya D-T yakıt olarak kullanılmaktadır. Kullanılan D-D ya da D-T füzyon yakıtlarına, çekirdeklerin birleşmesi ve Coulomb engelini aşarak füzyon reaksiyonu

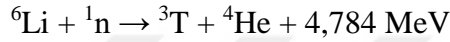
gerçekleştirebilmesi için yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak plazma hale gelmesi gerekir. Plazmanın reaktöre vereceği zararı engellemek için toroidal ve poloidal manyetik alanlarla plazmanın dengede kalması ve reaktör malzemeleri ile etkileşerek sınırlandırılması sağlanır.

Hibrit reaktörlerinde nötron enerji kaynağı; 3,5 MeV enerjili alfa parçacığı üreten D-T yakıtı ve 14,1 MeV ortalama enerjili nötronlar kullanılmaktadır. Alfa parçacığı füzyon reaksiyonunun sürekliliğini sağlaması ve plazmanın soğumaması için enerjisini plazmaya aktarır. 14,1 MeV enerjili füzyon nötronlarının enerjisi çok yüksek olduğundan bu nötronların kontrol edilebilmesi oldukça güçtür [12,14,21,25]. Hibrit reaktörlerin amacına uygun hareket edebilmek için, plazmanın etrafı termal nötronlarla fisyon reaksiyonu yapamayan ancak 14,1 MeV gibi yüksek enerjili nötronlarla transformasyon ve fisyon reaksiyonu yapabilen ^{238}U ya da ^{232}Th fertil malzemeleri ile oluşan bir duvarla çevrelenmelidir. Böylece, plazmadan çıkan 14,1 MeV'lik yüksek enerjili füzyon nötronları, plazmanın etrafını çevreleyen ^{238}U ya da ^{232}Th fertilleri ile transformasyon ve fisyon reaksiyonu yapar. Transformasyon reaksiyonu sonunda, plazmanın etrafını kaplayan duvarda ^{238}U fertili kullanılmışsa ^{239}Pu fisili, ^{232}Th fertili kullanılmışsa ^{233}U fisili ve enerji üretilir. Üretilen fisil materyalin bir kısmı hibrit reaktör içinde yanar geriye kalan materyal reaktör dışına alınarak fisyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılabilir.



Hibrit reaktörlerde yakıt olarak harcanan D-T yakıtında, döteryum suda bol bulunduğu için elde edilmesi kolaydır. Fakat trityum laboratuvar ortamında üretilebilir radyoaktif bir elementtir. Hibrit reaktörlerin çalışması için D-T füzyon reaksiyonunun devam etmesi gereklidir. Ancak trityum, döteryum ile reaksiyona girdiğinden reaksiyonun sürekliliği için düzenli trityum takviyesiyle reaksiyonun devamlılığı sağlanır. Bunun için birinci yöntem laboratuvar ortamında üretilen trityum reaktöre aktararak döteryum ile reaksiyon vermesi sağlanabilir veya ikinci yöntem olarak reaktörün kendi ihtiyacı olan trityumu üretmesi ile olabilir. Reaktörün ihtiyacı olan trityumu kendisinin üretmesi daha işe yarar yöntemdir. Bunun için iyi bir trityum kaynağı olan lityumun kullanılması yeterli olacaktır. Trityum, lityum ve nötronların reaksiyonu sonucunda üretildiği için, hibrit reaktörlerinin gereksinim

duyduğu trityumu üretebilmesi için reaktörde lityum içeren bir duvarla örtülü olması gereklidir. Bunun sonucunda, plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlardan açığa çıkan nötronlar, lityum ile örtülü duvarla reaksiyona girerek, hibrit reaktörlerin çalışması dolayısıyla füzyon reaksiyonunun sürekliliği için gerekli trityum türetilmiş olur. Tabii lityum %7,56 oranında ${}^6\text{Li}$ ve %92,44 oranında ${}^7\text{Li}$ izotopundan meydana gelir. ${}^6\text{Li}(n,\alpha) {}^3\text{T}$ reaksiyonu termal nötronlarla, ${}^7\text{Li}(n,\alpha n) {}^3\text{T}$ reaksiyonu hızlı nötronlarla reaksiyon verir. Böylece, plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlardan meydana gelen nötronlar lityumlu alanda önce ${}^7\text{Li}$ izotopu ile reaksiyona girer. ${}^7\text{Li}$ ile reaksiyon sonucunda trityum, ${}^4\text{He}$ ve termal nötronlar üretilir. Açığa çıkan termal nötronlar ${}^6\text{Li}$ ile reaksiyon verip trityum ve ${}^4\text{He}$ üretilir.



Plazmadan ve diğer nükleer reaksiyonlarda oluşan nötronların lityumla örtülü duvarda reaksiyonu ile hibrit reaktörlerin çalışması ve D-T füzyon reaksiyonunun sürekliliği için ihtiyaç duyulan trityum üretimi ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ 'den sağlanmış olur. Hibrit reaktörlerde, reaktör korunum erimesine mani olmak için ve açığa çıkan ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için ısı iletimini sağlayan soğutuculardan yararlanılır. Soğutucu olarak sıvı ve gaz soğutucular kullanılır. Hibrit reaktörlerde ısı enerjisi, sıvı ve gaz soğutucular yardımıyla elektrik enerjisi üretilecek jeneratörlere yönlendirilir. Sıvı soğutucular ısı aktarımı ve nükleer özelliklerinden dolayı genellikle sıvı lityum, sıvı sodyum gibi sıvı metaller olmalıdır. Gaz soğutucu olarak Helyum kullanılır. Hibrit reaktörlerde, kaçan nötronların yakalanması ve nötron çoğaltmak için reaktör çevresi reflektör (yansıtıcı) ile sarmalanır. Reflektör olarak çoğunlukla grafit, Be, Fe malzemeleri kullanılır [12,14,21,22,26-29].

3.1. APEX HibritReaktörü

Geleneksel füzyon reaktörlerinde, reaktörün kor kısmında füzyon reaksiyonu ile harcanan yakıt plazma haline dönüşüp plazmadan yüksek enerjili füzyon nötronları, gamma ışını ve yüklü parçacıklar meydana getirmektedir.

Plazmayı saran ilk duvar, plazmadan oluşan yüksek enerjili füzyon nötronları, gamma ışını ve yüklü parçacık akılarıyla karşı karşıya kalır. Bir yapısal malzemeye (katı) yüksek enerjili nötronların uygulanması, yapısal malzemedeki atomların yer

değiştirerek malzemenin karakterinin bozulmasına yani radyasyon hasarına sebep olur. İlk duvar yapısal malzeme olursa, en büyük hasar burada olduğundan yapısal malzemenin zarar görmesine ve reaktör ömrünün azalmasına sebep olabilir. Bu olumsuzlukları azaltmak için plazmayı çevreleyen ilk duvarın katı duvar olması yerine sıvı duvar olması fikri ilk kez 1971’de Christofilos tarafından teklif edilmiştir [21,22,30-38].

A.B.D.’de 1998’in başlarında füzyon enerjisi teknolojisinin incelenmesi için APEX (Advanced Power Extraction) hibrit reaktörü geliştirilmiştir. APEX’te Christofilos tarafından teklif edilen sıvı duvar kavramı kullanılmıştır. Böylece APEX’te plazmayı çevreleyen geleneksel ilk katı duvar yerine akışkan duvar katmanı kullanılmıştır. Akışkan duvar, APEX hibrit reaktörünün performansının düzenlenmesi, enerji transferi ve trityum üretimi için kullanılmıştır. APEX hibrit reaktöründe nötron duvar yükü ve yüzey akısı için en verimli elde etme yöntemleri geliştirilmiştir [21,22,30-41]. Şekil 3.2.’de APEX hibrit reaktörü gösterilmiştir.

APEX hibrit reaktörünün hedefi; füzyon ve fisyon reaksiyonu gerçekleştirerek, füzyon enerjisini cazip hale getirmek ve füzyon reaksiyonu ile yüksek enerji elde edip enerji ihtiyacını karşılamaktır. Hibrit reaktörlerde olduğu gibi APEX’te de amaç, fertil malzemelere transformasyon ve fisyon yaptırarak radyoaktif ürünlerden fisyon reaktörlerinde yakıt ham maddesi olan fisil malzemeler üretmek ve fisyon nötronları ile de reaktör için lazım olan enerji üretimini sağlamak. Diğer reaktörlerden farklı olarak APEX hibrit reaktöründe ilk katı duvar yerine akışkan duvar yer almıştır.

Diğer reaktörlerden ayrı olarak APEX’te geleneksel ilk katı duvar yerine akışkan duvar kullanılmasının yararları;

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/m^2

Yüzey ısı akısı 2 MW/ m^2

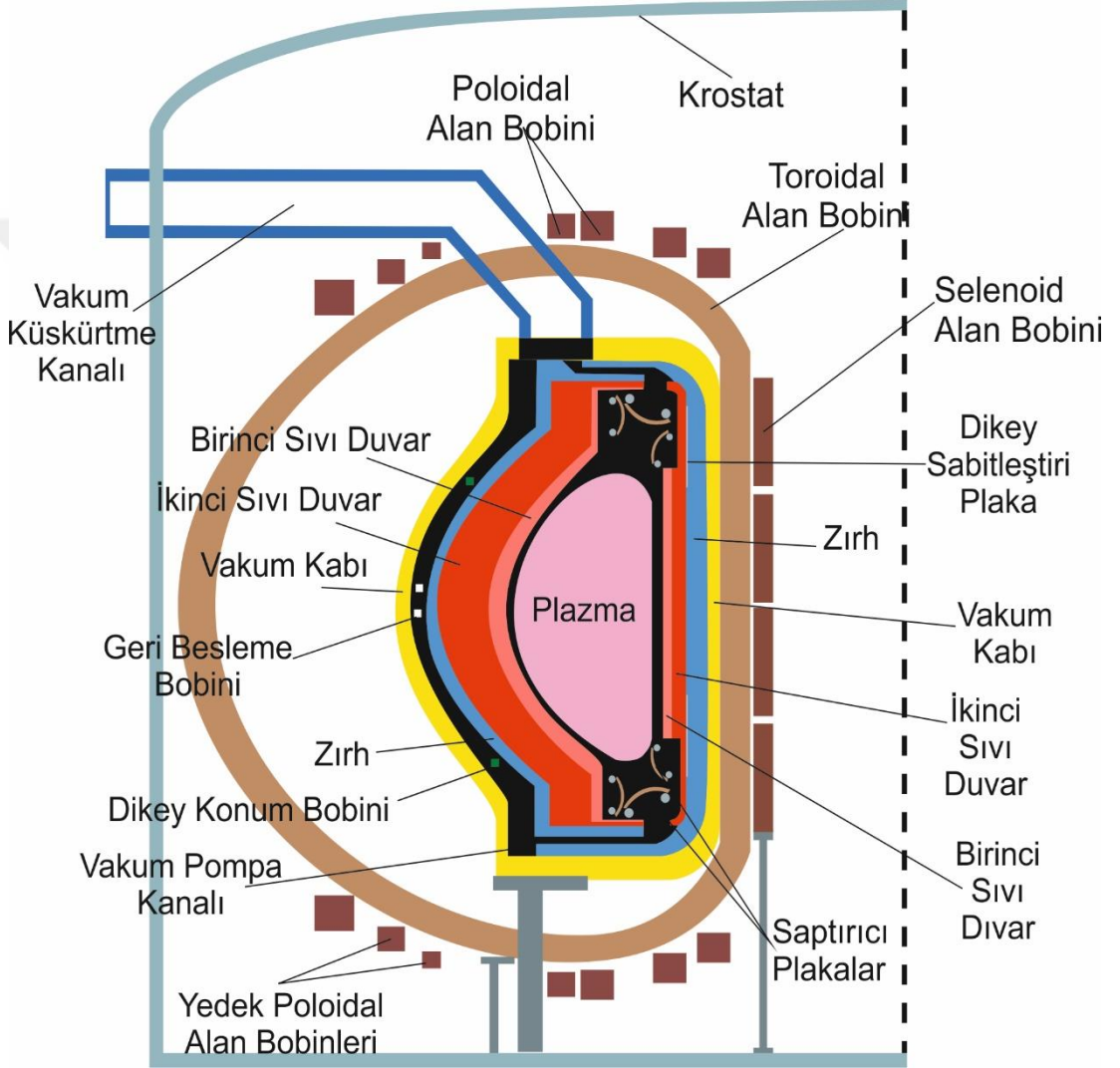
3. Yapısal malzemelerdeki radyasyon hasarı ve aktivasyonu büyük oranda azaltması ve yapısal malzemelerin ömrünün uzatılması,

4. Reaktör kabı içerisindeki malzemelerin bakımının kolaylaşması,

5. Yüksek termodinamik verim (%40) sağlanması,

$$\text{Termodinamik verim} = (\text{Yüksek sıcaklık} - \text{Düşük sıcaklık}) / \text{Yüksek sıcaklık}$$

6. Trityum üretiminin daha iyi elde edilmesidir [21,22,35-44].



Şekil 3.2. APEX hibrit reaktörü gösterimi [45]

APEX'te ilk (ince) akışkan duvar ve ikinci (kalın) akışkan duvar olmak üzere iki akışkan duvar yer alır. İlk akışkan duvar plazmadan sonra, ikinci akışkan duvar ilk akışkan duvardan sonra yer alır. İnce ve kalın akışkan duvarlar, yüksek yüzey ısı akışını yok etmeye uygundur. Reaktör içerisindeki ilk ince akışkan duvar 2 cm

kalınlığına, 20 m/s hızına sahiptir ve yüklü parçacıkları tutar. Ardında biraz daha yavaş hareket eden kalın akışkan duvar ise 40 cm kalınlığında ve 8 m/s hızında olup yapısal malzemede radyasyon hasarını büyük ölçüde düşürür ve nötronlardan dolayı açığa çıkan radyasyon enerjisini tutarak ısıya çevirir [21,22,35-44].

APEX hibrit reaktörünü diğer reaktörlerden ayıran, akışkan duvar tasarımı yer almıştır. Kullanılan akışkan duvar plazmadan sonra yer alıp, yüksek yüzey ısı akışını yok etmeye, yüklü parçacıkları tutarak yapısal malzemede radyasyon hasarını büyük ölçüde düşürmeye ve radyasyon enerjisini ısı enerjisine dönüştürmeye uygundur. Fakat akışkan duvarın plazmaya ve diğer tabakalara zarar vermesini engellemek için reaktör içerisinde belli bir düzende akması gereklidir. Bu sebeple, akışkan duvarın sıvı akışını tetikleyen ve akışkan duvarı bir arka katı duvara yerleştirmek için çeşitli kuvvetlerin uygulanması ile bazı farklı akışkan duvar kavramları tasarlanmıştır [21,22,35-44]. Bu akışkan duvar tasarımları;

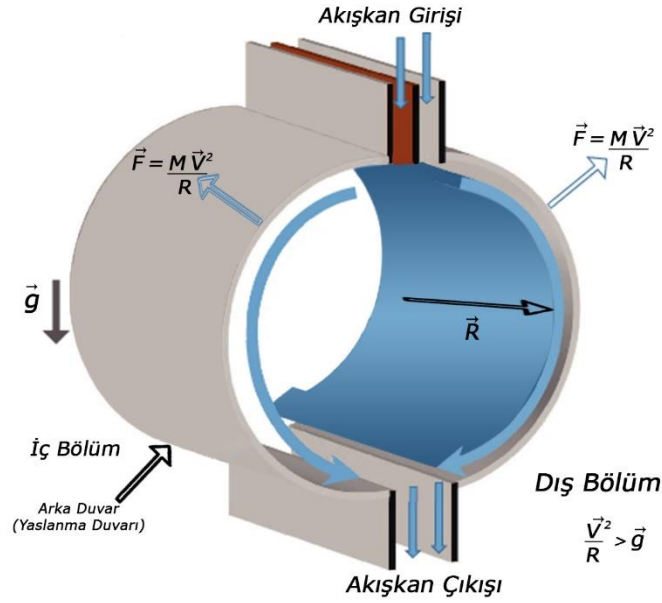
- a. Yerçekimi-Momentum Tahrikli (GMD),
- b. Girdap Akışı ile GMD,
- c. Elektromanyetik Olarak Tutma (EMR),
- d. Manyetik İtme akışkan duvar kavramlarıdır

Geliştirilen akışkan duvar kavramlarından yalnızca manyetik itme akışkan duvar tasarımı, hala APEX hibrit reaktörü için araştırılmamıştır. Diğer sıvı duvar tasarımları APEX ile birlikte tokamaklar, küresel torus ve manyetik alan sınırlamalı konfigürasyonlar için gözlemlenmiştir.

Yerçekimi-Momentum Tahrikli (Gravity-Momentum Driven (GMD)) akışkan duvar tasarımında; akışkan duvarı oluşturan tabakanın üstünden arka katı duvara doğru teğet şekilde yerleştirilir. Bu şekilde akışkan Şekil 3.3.'te de gözlemlendiği gibi, merkezkaç kuvvetiyle arka katı duvara yerleşerek tabakanın altına doğru sızmaktadır. APEX'te reaktörün verimli işleyebilmesi için akışkan duvarın devamlı olması gereklidir. Akışkan duvarın devamlılığı ve kararlılığı için, akışkanı arka katı duvara iten merkezci kuvvetin yerçekimi kuvvetinden büyük olması gereklidir.

Girdap Akışı ile GMD akışkan duvar tasarımında; duvarı meydana getiren akışkana dönme hareketi oluşturmak için açıl hız verilir. Açıl hız ile dönen

akışkan, girdap akışı şeklinde arka katı duvara yapışmaktadır. Girdap akışı merkezkaç ivmelendirilmesini artırıp, akışkanı duvara daha iyi yapıştırır.

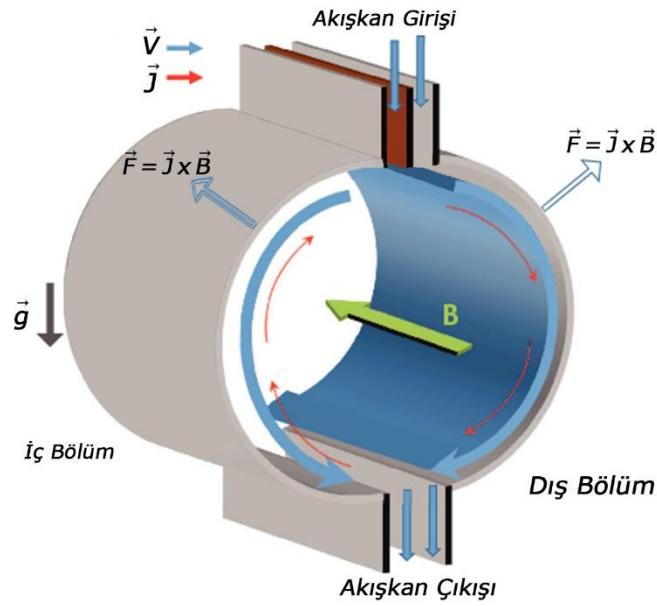


Şekil 3.3. Yerçekimi momentümleriyle (GMD) akışkan duvar kavramı gösterimi (\vec{R} =Eğrinin yarıçapı, \vec{V} =Akışkan hızı, \vec{g} =Yerçekimi ivmesi, \vec{F} =Merkezcil kuvvet) [46]

Elektromanyetik olarak tutma (Electromagnetically Restrained (EMR)) akışkan duvar tasarımında; duvarı oluşturan akışkan, tabakanın üstünden arka katı duvara doğru poloidal yönde yerleştirilir. Akışkanın poloidal yönde yerleştirilmesi ile bir poloidal akım (\vec{j}) üretilir. Şekil 3.4.'te de görüldüğü gibi, üretilen poloidal akım, akışkanın arka duvara yapışmasını sağlayan elektriksel kuvveti ($\vec{F}=\vec{j}\times\vec{B}$) üretmek için toroidal manyetik alan (\vec{B}) ile aktifleşir.

Manyetik itme (Magnetic Propulsion) akışkan duvar tasarımında; duvarı oluşturan akışkan, bir elektrik akımı ile beraber tabakanın üstünden arka katı duvara doğru yerleştirilir. Toroidal manyetik alan, elektrik akımının uygulanması ile bir basınç tahrik kuvveti oluşturur. Oluşan basınç farkıyla, akışın manyetik alan kuvvetinin olduğu iç bölgeden dış bölgeye doğru ivmelenmesini gerçekleştirir. Öte yandan toroidal manyetik alanın kararsızlığı ile kararsız bir Lorentz kuvveti meydana gelir. Meydana gelen Lorentz kuvveti ise akışkanı katı duvara yapışık tutarken akışı kararlı hale getirmek için aktif bir geri besleme mekanizması sağlar. L. Zakhorov'un

öne sürdüğü bu akışkan duvar tasarımı henüz APEX için gözlemlenmemiştir [21,22,35-44].



Şekil 3.4. Elektromanyetik olarak tutma (EMR) akışkan duvar kavramı gösterimi (\vec{B} =Toroidal manyetik alan, \vec{j} = Poloidal akım yoğunluğu, \vec{V} = Akışkan hızı, $\vec{F}=\vec{j} \times \vec{B}$) [21,22,30,36,46].

APEX hibrit reaktöründe yeterli enerji, fisil yakıt, trityum üretimi için yakıt, soğutucu ve yapısal malzeme için doğru seçimler yapılmalıdır.

3.1.1. APEX Reaktörünün Bileşenleri

APEX hibrit reaktöründe yakıt, akışkan ve yapısal malzeme için doğru seçimler yapılması önemlidir. Yakıt, akışkan ve yapısal malzeme; gerekli ve yeterli enerji üretilmesi, fisil yakıt ve trityum üretimi için önemli etkenlerdir.

3.1.1.1. Yakıt

Yüksek enerjinin elde edildiği diğer reaksiyonların yapılabilmesi için yakıt olarak, füzyon reaksiyonunu oluşturan D-D ya da D-T füzyon yakıtları kullanılır. D-T yakıtının yanması ile meydana gelen enerji D-D yakıtına göre daha büyük olduğundan APEX hibrit reaktöründe yakıt olarak çoğunlukla D-T füzyon yakıtı tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta D-T füzyon reaksiyonunun meydana gelmesi için bir araya gelen döteryum ve trityum çekirdeklerinin füzyonu ile plazma oluşur. Plazmadan 14,1 MeV enerjiye sahip füzyon nötronları ve 3,5 MeV enerjiye sahip

alfa parçacığı meydana gelmektedir. Alfa parçacığı, füzyon reaksiyonunun devamlılığı ve plazmanın ısıtılması için içerisinde bulunan enerjiyi plazmaya devreder. 14,1 MeV enerjili füzyon nötronları ise fertil yakıtlara transformasyon ve fisyon reaksiyonu gerçekleştirerek fisil yakıt, enerji ve fisyon nötronları üretimini elde etmek amacıyla kullanılır. D-T füzyon reaksiyonu ile plazmadan çıkıp diğer nükleer reaksiyonlar ile oluşturulan nötronlar, lityumlu bölge ile reaksiyonu sonucunda D-T füzyonunun sürekliliği için gereksinim duyulan trityum üretimini sağlar.

APEX hibrit reaktöründe; D-T yakıtı kullanımı ile gerekli olan yüksek enerji, fisyon reaktörlerinde yakıt hammaddesi olan fisil yakıt üretimi, reaktörün çalışması ve D-T füzyon reaksiyonunun sürekliliği için gerek duyulan trityum üretimi sağlanır [21,22,32,35,47-57].

3.1.1.2. Akışkanlar

Reaktör korunun erimesini engellemek ve meydana gelen ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirmek amacıyla ısı aktarımını gerçekleştiren enerji taşıyıcı malzemelere **akışkan** denir. Akışkan olarak sıvı ve gaz soğutucular kullanılmaktadır. APEX hibrit reaktöründe akışkan, ısı aktarımında etkili olan sıvılar kullanılır. İyi bir akışkanın tercihinde göz önünde bulundurulması gerekli özellikler;

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

D-T füzyon yakıtını tercih eden APEX hibrit reaktöründe, reaktörün ve D-T füzyon reaksiyonunun çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan trityumun sağlanması gerekir. Lityum ile reaksiyon sonucu trityum üretildiğinden enerjiyi ileten sıvı

(soğutucu), lazım olan trityum üretimini sağlamak için lityumlu bir sıvı seçilmelidir. Böylece, APEX hibrit reaktöründe D-T füzyon reaksiyonu ile plazmadan çıkan ve diğer nükleer reaksiyonların sonucunda meydana gelen nötronlar, lityumlu bölgeyle reaksiyona girip reaktör için ihtiyaç duyulan trityum üretimi sağlanmış olur.

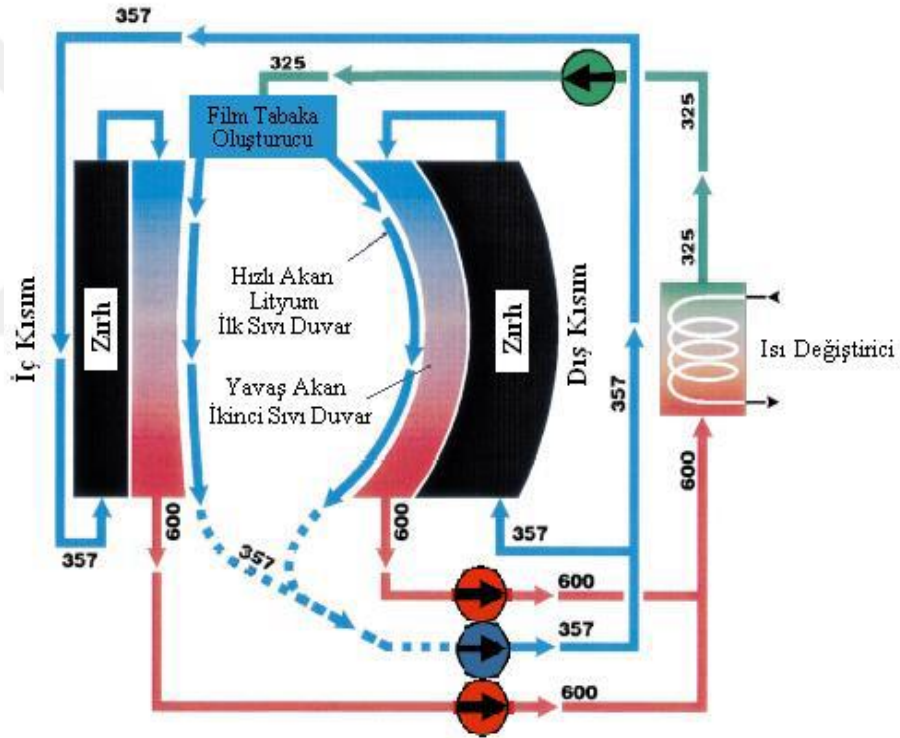
APEX hibrit reaktöründe akışkan olarak Flibe (Li_2BeF_4), Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$, Li, $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$, FLiNaK ve Li_2C_2 kullanılır [14,21,22,35-51,58-70]. Trityum üreticisi olan enerji ileten sıvıların birtakım özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Trityum üreten enerji ileten sıvıların bazı özellikleri [14,21,22, 35-51,58-69]

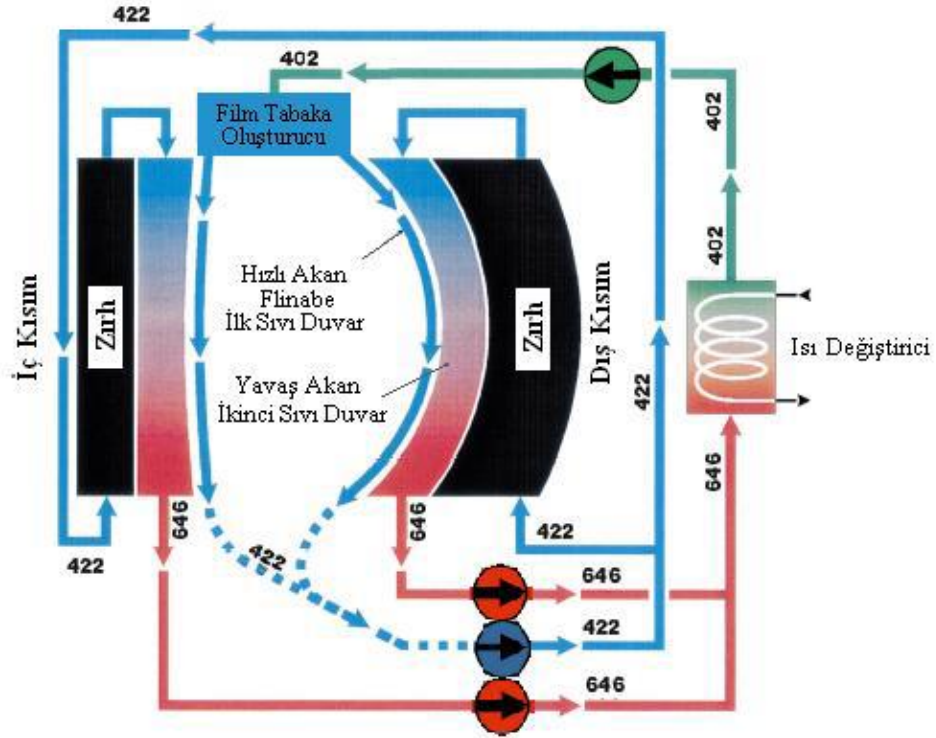
	Flibe	Flinabe	$\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$	Li	$\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$	FLiNaK	Li_2C_2
Erime Noktası (°C)	459	240	330	180	235	454	550
Yoğunluk (g/cm³)	2	2	6,2	0,48	8,98	2,02	1,65
Li Yoğunluğu (g/cm³)	0,28	0,12	0,09	0,48	0,062	0,11	0,13
Trityum Üretimi	İyi	İyi	İyi	İyi	Çok İyi	İyi	İyi
Kimyasal Kararlılık	Kararlı	Kararlı	Kararlı	Aktif	Orta	Kararlı	Kararlı
Trityum Çözünürlüğü	Çok Düşük	-	-	Yüksek	Çok Düşük	-	-

Alkali metal grubunda olan Lityum, soğutucu olarak tercih edilen sıvı metal olmasının nedeni yüksek trityum üretimi sağlamasıdır. Doğal lityumun, nötron yakalaması ve lityum atom yoğunluğu diğer soğutuculardan daha yüksektir. Trityum üretimi bu yüzden iyidir. Fakat ısı aktarımı o kadar iyi değildir. Ayrıca lityumun hava ve su ile reaksiyona girme ihtimali yüksektir. Bundan dolayı soğutucu olarak lityum dışındaki başka malzemelerin kimyasal özellikleri ve trityum üretimi incelenmiştir [14,21,22,35-51,58-70]. Şekil 3.5.'te APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak kullanılan Li sıvı metalinin reaktörün ilgili kısımlarında derece cinsinden sıcaklıkları yer almaktadır.

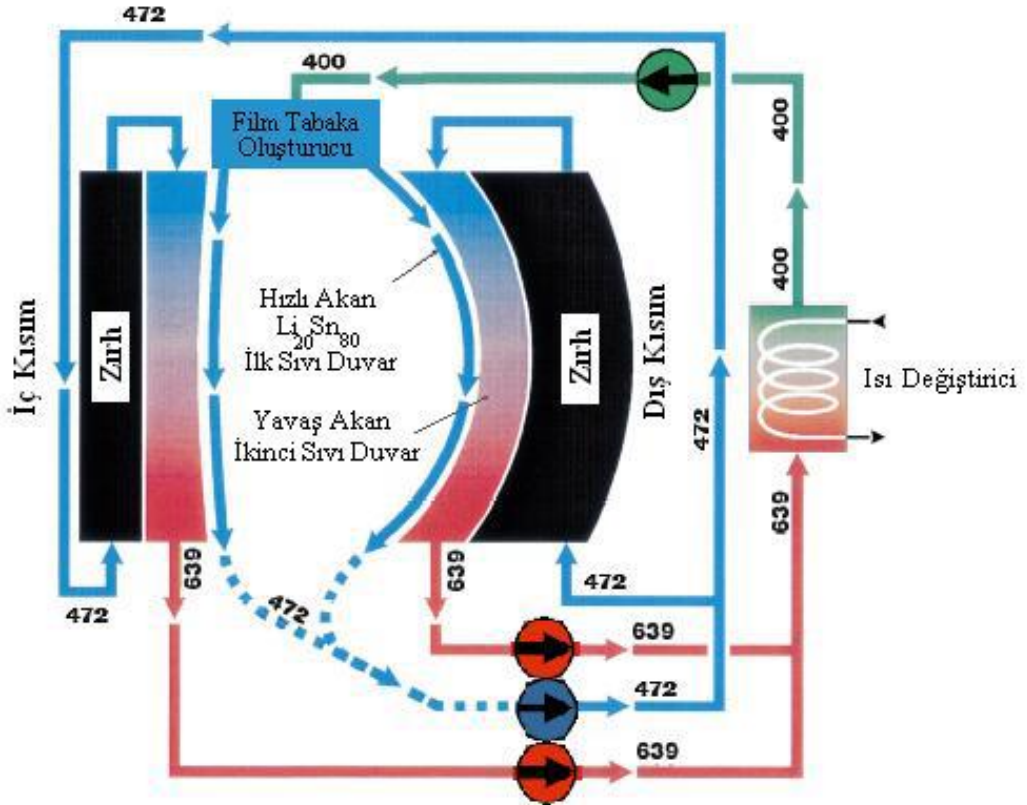
Son yıllarda Flinabe eriyik tuzu ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metali soğutucularının trityum üretimi incelenmiştir. Bu soğutucular buhar basınçları ve erime noktaları düşüklüğünden dolayı seçilmişlerdir. Çizelge 3.1.'de de görüldüğü üzere, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ 'nin lityum yoğunluğu Flinabe sıvı metalinden düşüktür. Fakat Flinabe'nin içerdiği Flor (F) elementinin nötron yakalama tesir kesiti yüksekliğinden ötürü, Flinabe ile reaksiyon sonucu meydana gelen nötronlar azalır. Flinabe ile nötronlar azaldığı için daha az sayıda nötron, lityum ile trityum üretimi için reaksiyona gireceğinden $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ 'nin trityum üretimi Flinabe sıvı metalinden daha yüksektir [14,21,22,35-51,58-70]. APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak kullanılan Flinabe eriyik tuzunun Şekil 3.6.'da $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metalinin ise Şekil 3.7.'de reaktörün ilgili kısımları için derece cinsinden sıcaklıkları yer almıştır.



Şekil 3.5. Lityum için sıcaklık akış şeması [70]



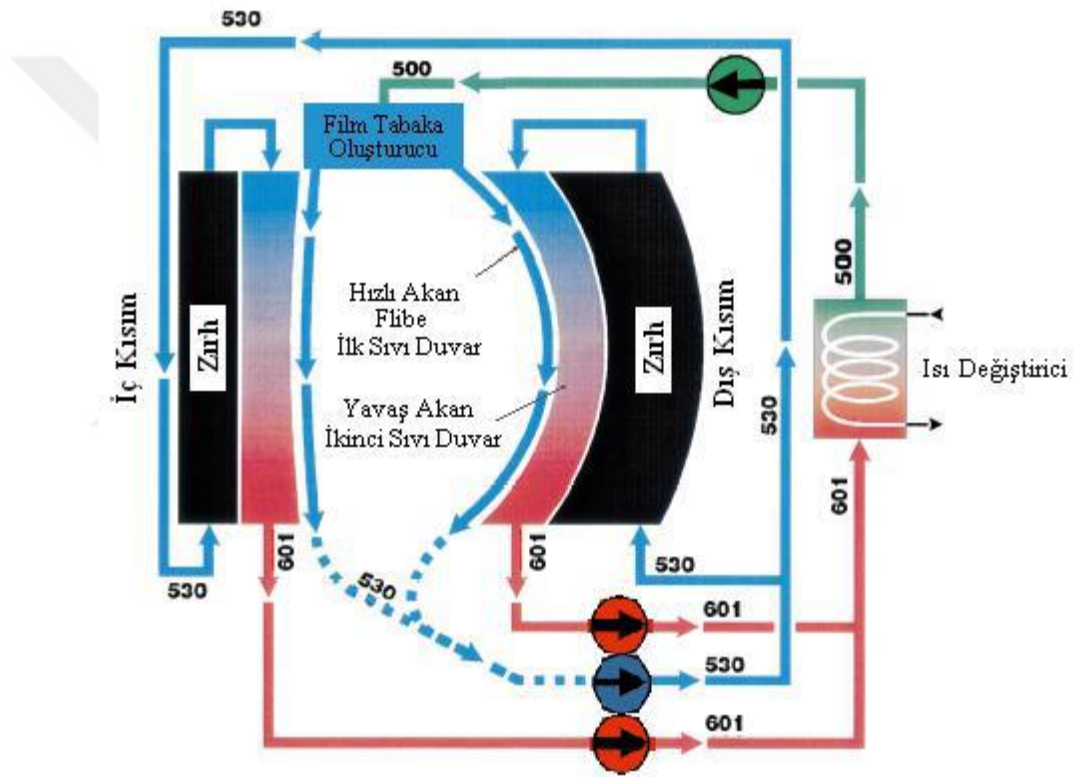
Şekil 3.6. Flinabe için sıcaklık akış şeması [70]



Şekil 3.7. $Li_{20}Sn_{80}$ için sıcaklık akış şeması [70]

C materyali APEX Hibrit Reaktöründe yansıtıcı olarak kullanılırken Li_2C_2 'de açığa çıkan nötronların ^6Li ve ^7Li ile reaksiyonu ile trityum meydana getirir. Bundan ötürü, $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ akışkanının trityum üretimi Li_2C_2 akışkanından daha düşüktür [66].

$\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ sıvı metalinin buhar basıncı, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ sıvı metalinden daha yüksektir. Plazmanın kararlılığı, enerji ileten sıvının elektriksel iletkenliği ile bağlantılı olarak değişkenlik gösterir. Flibe, düşük aktivasyon ve düşük elektriksel iletkenliğine sahip olması nedeniyle soğutucu olarak seçilir [14,21,22,35-51,58-70]. Şekil 3.8.'de APEX hibrit reaktöründe soğutucu olarak kullanılan Flibe eriyik tuzunun reaktörün ilgili kısımları için derece türünden sıcaklıkları yer almıştır.



Şekil 3.8. Flibe için sıcaklık akış şeması [70]

Genel olarak füzyon reaktörleri için kullanılan akışkanlar Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Bu soğutuculardan su; füzyon bölgesindeki yüksek basınçtan dolayı hibrit reaktörün ilk akışkan duvarının karakterini deforme etmektedir. Ayrıca, suyun kullanıldığı hibrit reaktörün kendi yakıtı olan trityumun üretilmesi oldukça zordur. Bundan dolayı füzyon reaktöründe akışkan olarak seçilen su, hibrit reaktöründe akışkan olarak fazla seçilmemektedir. Çizelge 3.2.'de yer alan diğer bir akışkan He kararlı yapısı nedeniyle füzyon reaktörünün katı duvarları için daha uyumlu bir akışkandır. He'nin kararlı ve yüksek basıncından dolayı akışkan duvarlarda

depolanan ısıyı uygun olarak aktarması sebebiyle Hibrit reaktöründe tercih edilir [68].

Çizelge 3.2. Füzyon reaktörlerinde genelde kullanılan akışkanlar [68]

	H₂O	He
Erime Noktası (°K)	273	400
Yoğunluk (kg/m³)	960	5,6

3.1.1.3. Yapısal Malzeme

Yüksek nötron duvar yükü kullanarak hibrit reaktörün güç yoğunluğunun artırılması sonucu reaktörlerin nötronik performansı yükselir. Reaktörde yapısal malzeme kullanılarak yüksek nötron duvar yüküne ulaşılır. İyi bir yapısal malzeme seçiminde dikkat edilecek özellikler;

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

Yansıtıcı metaller ve alaşımlar yapısal malzeme olarak kullanılır. Niobium (Nb), Tantalium (Ta), Krom (Cr), Molibden (Mo) ve Tungsten(W) alaşım olarak kullanılır. Ferritic Steel (9Cr-2WVTa), Vanadium Alaşımları (V-4Cr-4Ti) ve SiC Yansıtıcı metal olarak kullanılır.

Tavsiye edilen yapısal malzemelerin yüksek nötron duvar yükü, yüksek sıcaklık ve düşük aktivasyon özellikleri bulunur. Yansıtıcı metaller sahip olduğu iyi ısı aktarımı, yüksek sıcaklık, düşük aktivasyon özellikleri sebebiyle füzyon reaktörlerinde soğutucu olarak da tercih edilebilir [21,22,30,39,44,58,61,62,67,69,71-75].

4. MONTE CARLO YÖNTEMİ

Monte Carlo Yöntemi, nükleer silah geliştirme projesinde yer alan bilim insanlarının çalışmalarıyla Los Alamos laboratuvarında meydana çıkartılmıştır. 1930'lardan sonra Monte Carlo Yöntemi hızla ilerlemiştir. 1940'ın sonlarına doğru Stanislaw Ulam ve John Von Neumann'ın araştırmalarını Monte Carlo Simülasyonu ile tanımlamaları, Monte Carlo şehrinde rastgele sayılarla oynanan rulet ve diğer oyunlara benzerliği nedeniyle Simülasyon kelimesi modern anlamda kullanılmıştır [76-78].

Bu yöntem kompleks bir olayı veya deneyi istatistik yöntemler kullanarak modelleme yapan bir bilgisayar programıdır. Güçlü bir yöntem olduğu için çok elemanlı sistemlerin özelliklerinin hesaplanmasında kullanılır. Monte Carlo yöntemi rastgele sayıları üretildiği ve buna bağlı olarak tahmini süreçlerin canlandırılmasının istendiği bir yöntemdir. Olasılıklar göz önüne alınarak problemin çözülebilmesi için benzerlikler kurulmaya uğraşılır.

Günümüzde matematikte ve sosyal bilimlerde Monte Carlo yöntemi tercih edilir. Deneysel örneklem aracılığı ile model kurma amacı bu yöntemin fizik alanına uyumluluğu arttırılır. Fizikte Monte Carlo yöntemi; istatistik fizik, katı hal fiziği ve nükleer fizikte kullanılır.

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

Teorik fizik için geliştirilen MCNP; Los Alamos laboratuvarında Monte Carlo ekibi, 40000 satır fortran ve yorum bulunduran 1000 satır C kaynak kodlayıcı ve programı yürüten bütünsel yapısı vardır. Bu kod nükleer silahlar ve nükleer savunma amaçlı 1940 yıllarında geliştirilmiştir. İlk atom bombası 2.Dünya Savaşı'nda Los Alamos'da bu kod yardımıyla yapılmıştır [76,79-81].

MCNP; üç boyutlu geometride elektron, foton ve nötronların zamana bağlı devamlı enerji geçişini çözümleyen bir koddur. Bu kod belli kaynakları ve kritik altı problemleri çözecek yapıdadır. Kompleks parçacık geçişini modellemede oldukça iyi uygulanmasının nedeni MCNP kodu tesir kesiti verilerini kullanmasıdır. Hesaplamalarda yer alan nötronun enerjisi 10^{-11} MeV ile 25 MeV aralığındadır [76,79-81].

Sağlık fiziği, radyoterapi, hedef hızlandırıcı dizaynı, nükleer güvenlik, radyasyon koruması, dedektör analiz ve dizaynı, fisyon ve füzyon reaktör tasarımı MCNP'nin kullanıldığı bazı uygulama alanlarıdır.

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

Nükleer mühendislikte düşük enerjilerde radyasyon iletiminde başarılı olan MCNP kodu ile yüksek enerjili radyasyon iletiminde kullanılan LAHET (Los Alamos High Energy Transport) kodu ile birleştirildiğinde parçacıklar neredeyse tüm enerjilerde tam olarak iletilebilir. MCNPX; MCNP ve LAHET kodlarının birleştirilmesi ile geliştirilerek meydana çıkmıştır. İki kodun birleşimi olan MCNPX nükleer mühendislikte yüksek enerji uygulamalarında tam olarak radyasyon iletimine olanak vermiştir. MCNPX yeni kodunda geliştirme ve sürekli doğrulama çalışmaları devam etmektedir. MCNPX kod gelişiminin kalite, değer ve özellik olmak üzere önemli üç özelliği bulunur.

MCNP-4B ve LAHET-2.8'in birleşmiş kodu 1994'te MCNPX yüksek enerjili taşınım kodu, olarak kullanılmaya başlanmıştır. MCNPX-2.1.5 sürümü ilk olarak 1999'da yayımlanmıştır. MCNP-4C ve Fortran 90 ile 12 yeni özellik geliştirilerek 2002'de MCNPX-2.4.0 sürümü yayımlanmıştır. 2005'te MCNPX-2.5.0, 2008'de MCNPX-2.6.0 sürümü, 2011'de son sürümü MCNPX-2.7.0 ve yayımlanmıştır [76,79-81]. Çalışmada 2011'de yayımlanan MCNPX-2.7.0 sürümü kullanılmıştır.

MCNPX kodu, proton ve nükleer etkileşimler için 1-150 MeV ve nötronlar için 20-150 MeV arasındaki enerjilerde kullanılan yeni nükleer verileri kapsar. MCNPX programının kullanıldığı yerler;

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 araştırmalarında,
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 tasarımımda

MCNPX-2.7.0'da nötronlar için özel bir tesir kesiti hesaplamasında ENDF/B-VIII.0 gibi bir kütüphanede verilen tüm reaksiyonlar dikkate alınır [80,81].

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
- Kütlesele yoğunluklar g/cm^3 cinsinden
- Tesir kesiti barn (10^{-24} cm^2) cinsinden,
- Isıtma sayısı MeV/çarpışma cinsinden
- Avagadro sayısı= $6,025 \times 10^{23}$

MCNPX kodunun kullanılmasının yararları; simülasyonların sağlamış olduğu genel yararları sağlar. Esnek bir çözüm yöntemidir. Kademeli ve sistemli olarak yürütme olanağına sahiptir. Klasik çözüm yöntemlerinin uygulanamadığı büyük kompleks problemlerin çözümünde etkisi oldukça yüksektir. Başka bir yöntemde gözlemlenmesi imkansız olan şartlar ve kısıtlar simülasyon ile daha kolay modellenir. Simülasyon ile sonuçları aylar, yıllar sonra elde edilecek durumlar daha kısa zamanda analiz edilir. Simülasyon, tasarlanan yapıyı değışikliğe uğratmadan ileri politika veya fikirlerin tasarımımda daha kolay uygulanabilir olmasına imkân sağlar. Simülasyonu kontrol eden istediğı zaman durdurup kaldığı yerden devam edebileceğinden deney koşulları üstünde mutlak hâkimiyeti vardır [79-81].

4.3. ENDF/BKütüphanesi

A.B.D.’de geliştirilen değerlendirilmiş nükleer veri dosyası “Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B)” Temel nükleer bilim ve uygulamalarında kullanmak içindir. 1966 yılında “Cross Section Evaluation Working Group (CSEWG)”tesir kesiti değerlendirme çalışma grubu ENDF/B nükleer reaksiyon tesir kesiti kütüphanesinin geliştirilmesi için kurulmuştur. Sanayi, Üniversite ve ulusal laboratuvarlarda üyelerin katılımı ile CSEWG kurulmuştur. 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 işbirliğinden yararlanmıştır. Çizelge 4.1.’de ENDF/B kütüphanesinin sürümü yayınlanma yılları verilmiştir. 1966’dan iki yıl sonra ilk ENDF/B sürümü yayımlanmıştır. Yeni sürümü geniş çaplı araştırmalar ve eklentiler sonucunda belli aralıklarla yayımlanmıştır [82-85]. ENDF/B Kütüphanesi genellikle MCNP ile kullanılır.

Çizelge 4.1. ENDF/B kütüphanesinin sürümleri

ENDF/B	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Yıl	1968	1970	1972	1974	1978	1990	2006	2018

4.3.1. ENDF/B-VI Kütüphanesi

Nötron, proton, döteron, triton, He-3 ve atomik veriler olmak üzere 6 alt kütüphaneden oluşur.

4.3.2. ENDF/B-VII Kütüphanesi

Nötron, termal saçılma, proton ve foto nükleer verilerinden oluşur. ENDF/B-VII Kütüphanesi; foto nükleer, foto atomik, bozunma verisi, kendiliğinden fisyon ürünleri, atomik reaksiyon, nötron reaksiyon, nötron fisyon ürünleri, termal nötron saçılması, nötron tesir kesiti standartları, elektro atomik, proton etkileşim reaksiyonları, döteron etkileşim reaksiyonları, triton etkileşim reaksiyonları, He-3 etkileşim reaksiyonları olmak üzere 14 alt kütüphaneden oluşur [84,85].

4.3.3. ENDF/B-VIII Kütüphanesi

ENDF / B-VIII tamamen yeni nötron veri standartlarını içerir, geliştirilmiş termal nötron saçılma verilerini içerirse ^1H , ^{16}O , ^{56}Fe ^{235}U nötron reaksiyonları için “Coordinated International Evaluation Library Organization (CIELO)” pilot projesinden yeni değerlendirilmiş verileri kullanır. ^{238}U ve ^{239}Pu için değerlendirmeler, ABD ve Avrupa'da elde edilen son deneysel verilerden ve teori ve simülasyondaki gelişmelerden yararlanmaktadır. Önemli gelişmeler; hafif çekirdekler, yapısal malzemeler, aktinitler, fisyon enerji salınımı, hızlı fisyon nötron ve gama ışını spektrumları, termal nötron saçılma verileri ve yüklü parçacık reaksiyonları için güncellenmiş değerlendirilmiş verileri içerir [86,87].



5. HESAPLAMALAR

Bu çalışmada yeni bir APEX hibrit reaktör modeli, APEX füzyon reaktör teknolojisinden faydalanarak tasarlandı. Tasarlanmış APEX hibrit modeli büyük yarıçapı 552 cm olan bir torus şeklinde olup Şekil 5.1.'de yer verilmiştir. Şekil 5.2.'de çalışmada kullanılan APEX hibrit reaktör tasarımında bölge, bölge yarıçapları ve bölge kalınlıkları yer verilmiştir. İlk kesit torusun merkezinden plazmaya kadar olan iç kısmı, ikinci kesit ise plazmanın merkezinden reaktörün dış bölgesine kadar olan dış kısmı meydana getirir. APEX hibrit reaktör tasarımında kullanılmış yapı malzemeleri ve bölgelerin sıralaması şu şekildedir;

Torusun merkezi: Torusun merkezinde 230 cm çapı olan manyetik alan veya eylemsiz olarak sınırlandırılmış plazma bulunmaktadır. Füzyon reaksiyonunun meydana geldiği bölgedir ve D-T yakıtı kullanılır.

1. Bölge: Plazma ile ilk sıvı duvar arasında yer alan boşluk bölgesidir. İç ve dış kısımlarda çapı 28 cm olan bu boşluk, plazmanın ilk sıvı duvara değmesini engeller. Bu boşluğun plazmanın kirlenmesini engellemesinin yanı sıra ilk duvarın yüksek plazma sıcaklığının etkisinin çok daha az olmasını sağlar.

2. Bölge: İlk sıvı duvar bölgesidir, boşluk ile ikinci sıvı duvar arasında yer alır. İç ve dış kısımlarda çapı 2 cm olan bu duvarda sıvı hızlı akmaktadır. Plazmanın çevresinde füzyon reaksiyonu ile meydana gelen 14,1 MeV'lik yüksek enerjili nötronların en fazla hasarı oluşturduğu bölgedir. Plazmadan oluşan yüklü parçacıkları bu bölgede hapsedilir. Bu bölgede oluşan hasarın daha az olmasını sebebi sıvı duvar olmasıdır. Sıvı duvarın bir avantajıda sürekli yenilenebilir yapıda olması ve devamlı yeni bir duvar oluşmasını zemin sağlamasıdır.

3. Bölge: Berilyum bölgesidir. Reflektör (yansıtıcı) olarak 3 cm olarak ilk sıvı duvarın arkasında yer alır.

4. Bölge: ikinci sıvı (blanket) duvar bölgesidir. Berilyum bölgesinin hemen arkasında yer alır. Yavaş akan bu duvarın çapı iç ve dış kısımlarda 50 cm'dir. Nötronlardan dolayı meydana gelen radyasyon enerjisini tutarak ısıya çevirir ve plazmada oluşan yüksek enerjili nötronları soğurarak yapısal malzemedeki radyasyon hasarının büyük ölçüde azaltır.

5. Bölge: İkinci sıvı duvarın temas ettiği yapısal malzemedir. İç ve dış kısımlarda çapı 4 cm'dir. Bu çalışmada yapısal malzeme olarak Ferritic Steel (9Cr-2WVTa) tercih edilmiştir. Bu bölge; ikinci sıvı duvardan geçen nötronların etkisinde kalır, zırh ve ikinci sıvı duvar arasında bir köprü oluşturur.

6. Bölge: Çelik duvarın arkasında bulunan koruyucu (zırh) bölgesidir. %60 yapısal malzeme ve %40 üretici/soğutucu akışkan içeren bu bölge iç kısımda 49 cm ve dış kısımda 50 cm çapında olan koruyucu bölgedir. Bu bölge, ikinci sıvı duvarı aşan nötronların reaktörün dışına ilerlemesini engelleyerek reaktörün zarar görmesini önler.

7. Bölge: Zırh bölgesinin hemen arkasında yer alan boşluk bölgesidir. İç kısımda 5 cm ve dış kısımda 34 cm çapındadır. Yalıtım görevi yapan bu bölge, Zırhta biriken füzyon enerjisinin ısı transferiyle reaktörün dış kısmına geçmesini engeller.

8. Bölge: İç ve dış kısımlarda 2 cm çapın olan çelik (SS316LN) bölgesidir. Boşluktan sonra gelir. Füzyon için gereken düşük basınç bu bölgede oluşur. Farklı yüzdelere sahip Fe, Cr, ⁵⁵Mn, Si, Ni, Mo, ⁹³Nb, ⁵⁹Co, Cu elementleri çelik (SS316LN) içerisinde bulunur.

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

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

Tasarlanan APEX hibrit reaktör modelinin bölgelerinde yer alan malzemeler, bölgelerin içerdiği izotoplar ve izotopların bulunma oranları, bölgelerin kütle ve atomik yoğunlukları Çizelge 5.1.-5.18.'de gösterilmiştir. Çalışmada enerji taşıyıcı sıvı olarak Li₂₀Sn₈₀ kullanıldı. Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuzu için sıcaklık akış şeması Şekil 3.5.'de verilmiştir. Li₂₀Sn₈₀ sıvı tabakası; radyasyon ve aktivasyon gibi yapısal malzemelere hasar veren parametreleri önemli ölçüde azaltması nedeniyle tercih edilmektedir [21,22,34,36,44,60].

Bu çalışmada ilk sıvı duvar kalınlığı 2 cm, ikinci sıvı duvar kalınlığı 50 cm'dir.

Bu çalışmanın amacı, tasarlanan APEX hibrit reaktöründe seçilen akışkanların (UC_2 , ThC_2 , AmF_3 , CmF_3 , NpF_4 ve $Li_{20}Sn_{80}$) farklı oranlarda karışımı, reaktörün ilgili kısımlarında nötronik sonuçların nasıl değiştiğini incelemektir. İki çalışmada da yapısal malzeme olarak 9Cr2WVTa Ferritic Steel alaşımı, yansıtıcı (Reflektör) Berilyum kullanılmıştır. Bu çalışma iki bölümde incelenmiştir;

Birinci bölümde; ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %10 UC_2 + %0.1-1 AmF_3 , %10 UC_2 + %0.1-1 CmF_3 , %10 UC_2 + % 0.1-1 NpF_4 'dan oluşan ağır metal ve %89.9-89 $Li_{20}Sn_{80}$ eriyik tuz karışımları akışkan olarak; İkinci bölümde ise ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %10 ThC_2 + %0.1-1 AmF_3 , %10 ThC_2 + %0.1-1 CmF_3 , %10 ThC_2 + %0.1-1 NpF_4 'dan oluşan ağır metal ve %89.9-89 $Li_{20}Sn_{80}$ eriyik tuz karışımları akışkan olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada yakıtlarda (UC_2 ve ThC_2) karbonun (grafit) kullanılmasının nedeni; yansıtıcı özelliği olmasındandır. Plazmadan çıkan parçacıklar karbonla inelastik çarpışma yaparak tekrar kor bölgesine dönmektedir. Böylelikle nötron kaçağı azaltmakta ve nötron verimliliği artırmaktadır. Karbon; yavaşlatma oranı büyük, radyasyona dayanıklı, erime sıcaklığı düşük kaynama sıcaklığı yüksek, yapısal malzeme üzerinde aşınmaya neden olmayan bir elementtir.

Minör aktidinid florid; günümüzde kullanılan nükleer enerji santralleri fisyon sonrası uzun ömürlü fisyon ürünleri (^{99}Tc , ^{129}I , ^{135}Cs , v.s.) ve atık meydana getirmektedir. Çizelge 1.1.'de fisyon ürünleri ve atıklar gösterilmiştir. Plütonyum dışındakiler minör aktinit (Am , Cm , Np) olarak sınıflandırılan uranyum ötesi elementlerdir. Çalışmada seçilen AmF_3 , CmF_3 ve NpF_4 hızlı nötronlarda fisyonla girebilmektedirler. Flor (F) ayrıca yavaşlatıcı (reflektör) olduğundan plazmadan çıkan parçacıklarla çarpışarak nötron kaçaklarını önlemektedir.

Nötron akısı, trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltma faktörü (M), ısı enerjisi (heating), proton üretimi, döteryum üretimi, trityum üretimi, 3He üretimi, 4He üretimi, DPA (atomların yer değiştirmesi), fisil yakıt üretimi ve fisyon reaksiyon sayısı tasarımın ilgili bölgelerinde akışkanların oranına, reaktörün radyal kısımlarına, enerji spektrumuna ve yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre incelenmiştir.

Bu çalışma, 10 MW/m² nötron duvar yükü ve 4000 MW füzyon gücü ile yapılmıştır. Üç boyutlu tasarım ve hesaplamalar MCNPX-2.7.0 Monte Carlo kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MCNPX-2.7.0'da yapılan hesaplamalar 300 °K'deki sıcaklık için yapılmıştır. Hesaplamalarda Monte Carlo metodunda sonuçların hata payının kabul edilebilir mertebelerde olabilmesi için ENDF/B-VIII.0 kütüphanesi için hazırlanan 18 input için bilgisayarda hesaplama süresi 180 dakika olarak tutulmuştur.

5.1. Nötron Akısı

Bir yönde birim zamanda birim alandan geçen nötron sayısına **Nötron Akısı** denir. Bir reaktör korunda nötronlar tüm yönlerde hareket ederler. Nötron akısının birimi nötron/s.cm² olup, hıza ve enerjiye bağlıdır.

Çalışmada nötron akısı, Uranyum ve Toryum'un izotoplarının fisyon reaksiyonu, Li₂₀Sn₈₀ erimiş tuzundaki ⁷Li'nin inelastik çarpışması ve ⁶Li'nin ekzotermik ³T(n,α) reaksiyonu, berilyumun elastik (n, 2n) reaksiyonu ve diğer nükleer reaksiyonlarıyla hesaplanmaktadır.

Çalışmada %10 UC₂, %10 ThC₂ ve %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ile %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan, Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle ve ENDF/B-VIII.0 kütüphanesiyle ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde nötron akısı hesaplanmıştır.

Çizelge 5.19.'da %10 UC₂, Çizelge 5.20'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama nötron akısı ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.19. incelendiğinde Seçilen akışkanlarda Minör Aktinit oranı artırılıp eriyik tuz oranı düşürüldüğünde nötron akısının arttığı gözlemlenmiştir. En iyi akı değerinin %10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.20. incelendiğinde Seçilen akışkanlarda Minör aktinit oranı artırılıp eriyik tuz oranı düşürüldüğünde nötron akısının Am ve Cm'li akışkanlarda arttığı, Np'li akışkanda düştüğü gözlemlenmiştir. En iyi akı değerinin %10 ThC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.3-5.4.'da reaktör sisteminin iç ve dış kısımlar için seçilen akışkanlar için plazmaya olan mesafe ile ortalama nötron akısı incelenmiştir. Şekil 5.3.-5.4. incelendiğinde nötron akı dağılımının reaktör sisteminin iç ve dış yüzeyinde seçilen akışkanlar için plazmaya olan mesafe ile neredeyse üstel olarak azaldığı gözlenmiştir.

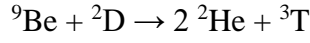
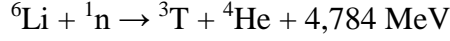
Şekil 5.5.-5.6.'de ortalama nötron akı dağılımı, seçilen akışkanlar için sistemdeki nötron enerji spektrumuna (0-20 MeV) göre incelenmiştir. Nötron spektrumu, 5-10 MeV aralığında (n, γ) reaksiyonlar, 2 MeV fisyon nötronları ve 14.6 MeV füzyon nötronları arasında yüksek enerji γ ışınları üretir. Hesaplama, fisyon, füzyon ve diğer nükleer reaksiyonlara bağlı ortalama nötron akı dağılımının olduğu ve bundan sonra azalan yaklaşık 14-15 MeV'lik bir zirveye sahip olduğu görülmüştür. 0-20 MeV enerji boşluğu arasındaki değerler, seçilen akışkanlar için sistemdeki enerjiye göre nötron akı dağılımının yaklaşık olarak aynı değerle olduğu gözlemlenmiştir.

5.2. Tritiyum Üretim Oranı (Tritium Breeding Rate)

Tritiyum üretim oranı (TBR); Sistemdeki trityumun üretim oranının plazmadaki trityumun yanma miktarına oranı şeklinde tanımlanır. D-T yakıtı kullanan reaktörde, reaksiyonunun devamlılığı için gerekli trityumu üretebilmelidir. Bu sebeple böyle bir reaktörün ihtiyaç duyduğu trityumun reaktöre yeterli olması için trityumun TBR değerine eşit veya daha büyük olması gerekir. Bu sebepten D-T yakıtı kullanan bir reaktörde TBR>1,1 olması gerekir. Lityum içeren bölgelerde reaktör trityum üretebilir. Tabii lityum ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ izotoplarından meydana gelir. ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ 'nin nötronlarla reaksiyonu ile trityum üretilir [14,21,22,58-60].

Çalışmada trityum üretiminin sağlanabilmesi için ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde lityum içeren $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ 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.

Tritiyum üretimi için nükleer reaksiyonlar;



$\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ 'daki 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 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuzunun bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde TBR değeri hesaplandı. Çizelge 5.21.-5.21.'de TBR'nin; %10 UC_2 + %0.1-1 AmF_3 , %10 UC_2 + %0.1-1 CmF_3 , %10 UC_2 + %0.1-1 NpF_4 ve %10 ThC_2 + %0.1-1 AmF_3 , %10 ThC_2 + %0.1-1 CmF_3 , %10 ThC_2 + %0.1-1 NpF_4 ağır metalleri ile %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve yapısal malzemeye 9Cr2WVTa Ferritic Steel göre ENDF/B-VIII.0 kütüphanesi sonuçları gösterilmiştir.

ENDF/B-VIII.0 kütüphanesinin kullanımı ile reaktörün ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde trityumun kendi kendine yetebilmesi şartı olan $\text{TBR} > 1,1$ değeri sağlanmıştır. 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.

Çalışmada $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuzu %89.9-89 arasında incelenmiştir. Çizelge 5.21.-5.22.'de gösterdiği üzere %10 UC_2 + %0.1-1 AmF_3 , %10 UC_2 + %0.1-1 NpF_4 , %10 ThC_2 + %0.1-1 AmF_3 ve %10 ThC_2 + %0.1-1 NpF_4 ağır metal %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuzu akışkanında $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ oranı azaldıkça TBR değeri azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni akışkandaki Li zenginliğinin 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 verdiğinden plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlar lityumlu bölgede ${}^7\text{Li}$ ile reaksiyon verir.

Çizelge 5.21.-5.22.'de gösterildiği gibi %10 UC_2 + %0.1-1 CmF_3 ve %10 ThC_2 + %0.1-1 CmF_3 ağır metal ve %89.9-89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuzu akışkanında $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ oranı azaldıkça TBR değeri artmaktadır. Bu artma CmF_3 'ün plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlarla çarpışmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışmada, TBR'nin en iyi değerleri % 10 UC₂ + % 89 Li₂₀Sn₈₀ + % 1 CmF₃ ve % 10 ThC₂ + % 89 Li₂₀Sn₈₀ + % 1 CmF₃ akışkanlarında olduğu gözlemlenmiştir.

5.3. Enerji Çoğaltma Faktörü (Energy Multiplication Factor)

Nötron kinetik enerjisinin, sistemdeki toplam depolanma enerjisine oranı enerji çoğaltma faktörü (M) şeklinde tanımlanır. Bir reaktör, D-T yakıtı kullanarak enerji meydana getiriyorsa oluşan enerji plazmanın ürettiği enerjiden yüksek olması gerekir. M değeri, termal güç üretebilmek için yüksek değere sahip olmalıdır. Bu sebeple D-T yakıtı kullanan bir reaktörde M>1,2 olması gerekir [14,21,22,58-60].

M'nin hesaplanması;

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

Çizelge 5.23.-5.24.'de ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde hesaplanan toplam M değeri gösterilmiştir. Çizelge 5.23.-5.24.'de M'nin % 10 UC₂ + % 0.1-1 AmF₃, % 10 UC₂ + % 0.1-1 CmF₃, % 10 UC₂ + % 0.1-1 NpF₄ ve % 10 ThC₂ + % 0.1-1 AmF₃, % 10 ThC₂ + % 0.1-1 CmF₃, % 10 ThC₂ + % 0.1-1 NpF₄ ağır metalleri ile % 89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve yapısal malzemeye 9Cr2WVTa Ferritic Steel göre ENDF/B-VIII.0 kütüphanesi sonuçları gösterilmiştir. ENDF/B-VIII.0 kütüphanesi 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 ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde, Çizelge 5.23.'de % 10 UC₂ ve Çizelge 5.24.'de % 10 UC₂ yakıtları için % 0.1-1 AmF₃, % 0.1-1 CmF₃, % 0.1-1 NpF₄ minör aktinid florid ve % 89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme kullanarak elde edilmiştir. Çizelge 5.23.-5.24. incelendiğinde Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz oranı azaltılıp ağır metal karışımı arttırıldığında M değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Seçilen akışkanlarda flor oranı arttıkça M değeride artmaktadır. Bu artışın nedeni seçilen akışkanlardaki Flor elementinin plazmadan çıkan nötron ile inelastik saçılma yapıp nötronun sahip olduğu enerjiyi değiştirmesidir.

Çizelge 5.23.-5.24. incelendiğinde M değerleri ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde AmF₃, NpF₄ akışkanlarında benzer olarak gözlemlenmiştir.

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 seçilen akışkanlarda %10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiş ve M>1,2 şartını sağlamıştır.

5.4. Isı Enerjisi (Heating)

Çalışmada %10 UC₂, %10 ThC₂ ve %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ile %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan, Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle ve ENDF/B-VIII.0 kütüphanesiyle 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, depolanan ısı enerjisi W/cm³ birimi cinsinden hesaplandı.

Depolanan ısı enerjisi değerleri ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde, Çizelge 5.25.'de %10 UC₂ ve Çizelge 5.26.'da %10 UC₂ yakıtları için %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ minör aktinid florid ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.25.-5.26. incelendiğinde Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz oranının azaltılıp AmF₃, CmF₃, NpF₄ minör aktinid florid oranı artırıldığında hesaplanan toplam ısı enerjisinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın Li₂₀Sn₈₀ 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 olması kaynaklıdır. UC₂ ve ThC₂ ağır metalindeki ²³⁸U, ²³⁵U ve ²³²Th'un fisyon reaksiyonu yapması ısı enerjisi üretimi üzerinde etkili olmuştur. %10 UC₂, %10 ThC₂ ve %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ile %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarında ısı enerjisi en fazla %10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında elde edilmiştir.

Şekil 5.7.'de %10 UC₂, Şekil 5.8.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından

oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen depolanan ısı enerjisi ile reaktörün iç ve dış kısımlarında (radyal) gösterilmiştir. Şekil 5.7.-5.8. incelendiğinde $Li_{20}Sn_{80}$ eriyik tuz oranının azaltılıp AmF_3 , CmF_3 , NpF_4 minör aktinid florid oranı artırıldığında reaktörün iç ve dış kısımlarında (Radyal) hesaplanan toplam ısı enerjisinin plazmaya doğru gidildikçe arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.9.'da %10 UC_2 , Şekil 5.10.'da %10 ThC_2 ile %0.1-1 AmF_3 , %0.1-1 CmF_3 ağır metali ve %89.9-89 $Li_{20}Sn_{80}$ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen depolanan ısı enerjisi ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.9.-5.10. incelendiğinde depolanan ısı enerjisi 14-15 MeV enerji aralığında artış, 16-20 MeV enerji aralığında düşüş gözlemlenmektedir.

5.5. Radyasyon Hasarı

Radyasyon hasarı; yapısal malzemelere yüksek enerji uygulanması sonucu malzeme karakteristiğinin bozulması şeklinde tanımlanır. Plazmaya yakın olan duvarlarda radyasyon hasarına yüksek enerjili nötronlar sebep olmakta ve reaktörün ömrünü kısaltmaktadır. Bu sebeple radyasyon hasarını minimuma indirmek için APEX reaktöründe kullanılan ilk sıvı duvar yüklü parçacıkları tutarken, ikinci sıvı duvar ise nötronların meydana getirdiği radyasyon enerjisini tutarak ısıya çevirir ve yapısal malzemelerin radyasyon hasarını ve aktivasyonu azaltır. Yapısal malzemede oluşan proton, döteryum, trityum, 3He , 4He ve DPA üretim oranı değerleri radyasyon hasarı parametreleridir. Hidrojen izotopları olan proton, döteryum ve trityum yapısal malzeme dışına yayılırken, 3He ve 4He gazları yapısal malzeme içinde depo edilir [14,21,22,49,51,58-60].

Çalışmada radyasyon hasarı parametreleri 30 tam güç yılı (Full PowerYear = FPY) üzerinden hesaplanmıştır. Radyasyon hasarı değerleri ENDF/B-VIII.0 kütüphanesi ile Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme kullanarak elde edilmiştir. İlk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde %10 UC_2 , %10 ThC_2 ve %0.1-1 AmF_3 , %0.1-1 CmF_3 , %0.1-1 NpF_4 ağır metali ile %89.9-89 $Li_{20}Sn_{80}$ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar kullanılmıştır.

5.5.1. Proton Üretimi

Çizelge 5.27.'de %10 UC₂, Çizelge 5.28.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama proton üretimi ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.27.'de %10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük proton üretimi %10 UC₂ + %0.1 AmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀ en yüksek proton üretimi ise %10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.28.'de %10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük proton üretimi %10 ThC₂ + %0.1 CmF₃ + %89.8 Li₂₀Sn₈₀ en yüksek proton üretimi ise %10 ThC₂ + %1 AmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Şekil 5.11.'de %10 UC₂, Şekil 5.12.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama proton üretimi ile yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre gösterilmiştir. Şekil 5.11.-5.12.'de gözlemlen değerlere göre yapısal malzemenin duvar kalınlıkları arttıkça ortalama proton üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.13.'de %10 UC₂, Şekil 5.14.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama proton üretimi ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.13.-5.14. incelendiğinde ortalama proton üretimi 0-15 MeV enerji aralığında artış, 16-20 MeV enerji aralığında düşüş gözlemlenmektedir.

5.5.2. Döteryum Üretimi

Çizelge 5.29.'da %10 UC₂, Çizelge 5.30.'da %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz

karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama döteryum üretimi ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.29.'da %10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük döteryum üretimi %10 UC₂ + %0.1 AmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀ en yüksek döteryum üretimi ise %10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.30.'da %10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük döteryum üretimi %10 ThC₂ + %0.1 CmF₃ + %89.8 Li₂₀Sn₈₀ en yüksek döteryum üretimi ise %10 ThC₂ + %1 AmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Şekil 5.15.'de %10 UC₂, Şekil 5.16.'da %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama döteryum üretimi ile yapısal malzemenin kalınlıklarına göre gösterilmiştir. Şekil 5.15.-5.16.'de gözlemlen değerlere göre yapısal malzemenin duvar kalınlıkları artıkça ortalama döteryum üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.17.'de %10 UC₂, Şekil 5.18.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama döteryum üretimi ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.17.-5.18.'de incelendiğinde ortalama döteryum üretimi 13-15 MeV enerji aralığında artış, 16-20 MeV enerji aralığında düşüş gözlemlenmiştir.

5.5.3. Tritiyum Üretimi

Çizelge 5.31.'de %10 UC₂, Çizelge 5.32.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama trityum üretimi ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.31.'de % 10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük trityum üretimi % 10 UC₂ + %0.1 AmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek trityum üretimi ise % 10 UC₂ + % 1 CmF₃ + % 89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.32.'de % 10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük trityum üretimi % 10 ThC₂ + %0.1 CmF₃ + %89.8 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek trityum üretimi ise % 10 ThC₂ + % 1 AmF₃ + % 89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Şekil 5.19.'da % 10 UC₂, Şekil 5.20.'de % 10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama trityum üretimi ile yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre gösterilmiştir. Şekil 5.19.-5.20'de gözlemlen değerlere göre yapısal malzemenin duvar kalınlıkları artıkça ortalama trityum üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.21.'de % 10 UC₂, Şekil 5.22.'de % 10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama trityum üretimi ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.21.-5.22. incelendiğinde ortalama trityum üretimi 14-16 MeV enerji aralığında artış, 17-20 MeV enerji aralığında düşüş gözlemlenmiştir.

5.5.4. ³He Üretimi

Çizelge 5.33.'de % 10 UC₂, Çizelge 5.34.'de % 10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama ³He üretimi ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.33.'de % 10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük ³He üretimi

% 10 UC₂ + %0.1 AmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek ³He üretimi ise % 10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.34.'de % 10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük ³He üretimi % 10 ThC₂ + %0.1 CmF₃ + %89.8 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek ³He üretimi ise % 10 ThC₂ + %1 AmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Şekil 5.23.'de % 10 UC₂, Şekil 5.24.'de % 10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama ³He üretimi ile yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre gösterilmiştir. Şekil 5.23.-5.24.'da gözlemlen değerlere göre yapısal malzemenin duvar kalınlıkları artıkça ortalama ³He üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.25.'de % 10 UC₂, Şekil 5.26.'da % 10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama ³He üretimi ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.25.-5.26.'da incelendiğinde ortalama ³He üretimi 13-16 MeV enerji aralığında artış, 17-20 MeV enerji aralığında düşüş gözlemlenmiştir.

5.5.5. ⁴He Üretimi

Çizelge 5.35.'de % 10 UC₂, Çizelge5.36.'da % 10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama ⁴He üretimi ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.35.'de % 10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük ⁴He üretimi % 10 UC₂ + %0.1 AmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek ⁴He üretimi ise % 10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.36.'da %10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük ⁴He üretimi %10 ThC₂ + %0.1 CmF₃ + %89.8 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek ⁴He üretimi ise %10 ThC₂ + %1 AmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Şekil 5.27.'de %10 UC₂, Şekil 5.28.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama ⁴He üretimi ile yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre gösterilmiştir. Şekil5.27.-5.28.'de gözlemlen değerlere göre yapısal malzemenin duvar kalınlıkları artıkça ortalama ⁴He üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.29.'da %10 UC₂, Şekil 5.30.'da %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama ⁴He üretimi ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.29.-5.30.'de incelendiğinde ortalama ⁴He üretimi 6-15 MeV enerji aralığında artış, 17-20 MeV enerji aralığında düşüş gözlemlenmiştir.

5.5.6. DPA Üretimi

Çizelge 5.37.'de %10 UC₂, Çizelge 5.38.'de %10 ThC₂ ile %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama DPA ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.37.'de %10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük DPA'nın %10 UC₂ + %0.1 NpF₄ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀, en yüksek DPA'nın ise %10 UC₂ + %1CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.38.'de %10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %0.1-1 CmF₃, %0.1-1 NpF₄ ağır metali ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkan ve Ferritic Steel (9Cr2WVTa) alaşımlı yapısal malzeme ile elde edilen en düşük DPA'nın %10

$\text{ThC}_2 + \%0.1 \text{ CmF}_3 + \%89.8 \text{ Li}_{20}\text{Sn}_{80}$, en yüksek DPA'nın ise $\%10 \text{ ThC}_2 + \%1 \text{ CmF}_3 + \%89 \text{ Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ akışkanında gözlemlenmiştir.

Şekil 5.31.'de $\%10 \text{ UC}_2$, Şekil 5.32.'de $\%10 \text{ ThC}_2$ ile $\%0.1-1 \text{ AmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ CmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ NpF}_4$ ağır metali ve $\%89.9-89 \text{ Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama DPA ile yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre gösterilmiştir. Şekil 5.31.-5.32.'de gözlemlen değerlere göre ikinci sıvı duvar kalınlıkları artıkça ortalama DPA'nın azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.33.'de $\%10 \text{ UC}_2$, Şekil 5.34.'de $\%10 \text{ ThC}_2$ ile $\%0.1-1 \text{ AmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ CmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ NpF}_4$ ağır metali ve $\%89.9-89 \text{ Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle elde edilen ortalama DPA ile enerji spektrumuna göre gösterilmiştir. Şekil 5.33.-5.34.'de incelendiğinde ortalama DPA'nın 0-1 MeV enerji aralığında maksimum değerinde, 2-20 MeV aralığında hemen hemen sıfır değerine olduğu gözlemlenmiştir.

5.6. Fiyon Reaksiyon Sayısı

Çalışmada $\%10 \text{ UC}_2$, $\%10 \text{ ThC}_2$ ve $\%0.1-1 \text{ AmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ CmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ NpF}_4$ ağır metali ile $\%89.9-89 \text{ Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuz karışımından oluşan akışkan Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle ve ENDF/B-VIII.0 kütüphanesiyle ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde ortalama fiyon reaksiyon sayısı hesaplandı.

Plazmada D-T füzyon reaksiyonuyla meydana çıkan 14,1 MeV'lik yüksek enerjili nötronlar önce plazmaya en yakın ilk sıvı duvara çarpar. Bu bölgede $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuzu ile akışkan oluşturan UC_2 , ThC_2 , AmF_3 , CmF_3 ve NpF_4 ağır metallerdeki Uranyum, Toryum, Amerisyum, Küriyum ve Neptünyum plazmadan çıkan hızlı nötronlarla fiyon reaksiyonu verir. UC_2 , ThC_2 , AmF_3 , CmF_3 ve NpF_4 ağır metalleri çalışmada ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde bulunduğundan bu bölgelerde fiyon reaksiyonu oluşmaktadır.

Çizelge 5.39.'da $\%10 \text{ UC}_2$, Çizelge 5.40.'da $\%10 \text{ ThC}_2$ ile $\%0.1-1 \text{ AmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ CmF}_3$, $\%0.1-1 \text{ NpF}_4$ ağır metali ve $\%89.9-89 \text{ Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ eriyik tuz karışımlarından oluşan akışkanlar Ferritic Steel (9Cr2WVTa) yapısal malzemesiyle

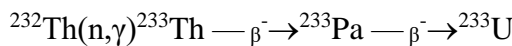
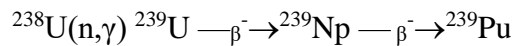
elde edilen ortalama ortalama fisyon reaksiyon sayısı ile ağır metal oranlarına göre gösterilmiştir.

Çizelge 5.39.-5.40. incelendiğinde AmF_3 ve NpF_4 'un oranları artıkça ortalama fisyon sayılarında pek bir değişme gözlemlenmemiştir, CmF_3 'un oranı artıkça ortalama fisyon sayısının oldukça arttığı görülmektedir. Bu artış CmF_3 ile plazmadan çıkan nötronlarla gerçekleştirdiği inelastik çarpışmalardan kaynaklanmaktadır.

5.7. Fisil Yakıt Üretimi

Geleneksel nükleer reaktörlerde enerji üretimi için kullanılan yakıt malzemesi fisil yakıtlardır. Fisil yakıtlar; düşük enerjili nötronlar ile fisyon reaksiyona giren çekirdeklerdir. Bunlar ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu 'dur. Yüksek enerjili nötronlar ile fisyon reaksiyona giren maddeler fertil çekirdeklerdir. Bunlar ^{232}Th ve ^{238}U 'dur. Doğada bulunan ^{232}Th ve ^{238}U elementlerinin termal nötronlarla fisyon tesir kesitleri çok küçüktür. ^{232}Th ve ^{238}U elementleri fisyon nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılamamaktadır. Düşük enerjilerdeki nötronlarla fisyon yapabilen ^{235}U , ^{233}U ve ^{239}Pu izotopları, ^{232}Th ve ^{238}U 'dan üretilmektedir. Fisyon nükleer reaktörlerinde yakıt olarak kullanılan ^{235}U izotopu, termal nötronlarla yüksek oranda fisyon meydana getirerek enerji ve yeni nötronlar üretir. Bu yakıt doğada çok az oranda bulunması sebebiyle mevcut fisyon reaktörleri uranyumun sadece küçük bir bölümünü kullanmaktadırlar. Doğada fazla miktarda bulunan ^{238}U izotopu (n,γ) reaksiyonuyla çok düşük bir verimle, ^{239}Pu 'a dönüşür. Oluşan plütonyumun reaktörün tipine ve çalışma şekline bağlı olarak bir kısmı yanar bir kısmı da depo edilir [21,22,48,49,69,71].

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. Şekil 5.35.'de Th ve U'un takip ettikleri yarı ömür ve gerçekleştirdikleri reaksiyonlar gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 AmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 AmF_3	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Am-243 F-19	1,348500 16,63150 71,92000 0,000725 0,992750 0,200000 0,000100 0,000300	6,75133	$3,75322211 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 AmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Am-243 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,539400 6,652600 28,76800 0,000290 0,039710 0,000400 0,001200	7,519282	$6,50343017 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.2. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 AmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 AmF_3	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Am-243 F-19	1,342500 16,55750 71,60000 0,000725 0,099275 0,005000 0,200000 0,015000	6,76465	$3,745373057.10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577.10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S) $9\text{Cr}2\text{WVTa}+$ %40 (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 AmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Am-243 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,537000 6,623000 28,64000 0,000290 0,397100 0,002000 0,006000	7,52461	$6,500290543.10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357.10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296.10^{-2}$

Çizelge 5.3. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 Li₂₀Sn₈₀ + %10 UC₂ + %1 AmF₃ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan)%89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10UC ₂ + %1 AmF ₃	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Am-243 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,000725 0,099275 0,200000 0,010000 0,030000	6,7813	3,735561745.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa+ %40 (Akışkan)%89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10UC ₂ + %1 AmF ₃	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Am-243 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,000290 0,039710 0,004000 0,012000	7,53127	6,496366018.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.4. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 CmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 +%0.1 CmF_3	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Cm-247 F-19	1,348500 16,63150 71,92000 0,000725 0,099275 0,200000 0,001000 0,003000	6,75165	$3,753260257 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 +%0.1 CmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Cm-247 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,539400 6,652600 28,76800 0,002900 0,039710 0,000400 0,001200	7,51941	$6,503445423 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.5. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 CmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 CmF_3	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Cm-247 F-19	1,342500 16,55750 71,60000 0,000725 0,099275 0,200000 0,005000 0,015000	6,76625	$3,745551384 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 CmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Cm-247 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,537000 6,623000 28,64000 0,000290 0,039710 0,002000 0,006000	7,52525	$6,500361874 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.6. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 Li₂₀Sn₈₀ + % 10UC₂ + %1 CmF₃ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 UC ₂ + %1 CmF ₃	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Cm-247 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,000725 0,099275 0,200000 0,010000 0,030000	6,7845	3,735943205.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh9Cr2WVTa (F.S) + %40 (Akışkan) %89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 UC ₂ + %1 CmF ₃	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Cm-247 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,000290 0,039710 0,004000 0,012000	7,53255	6,496518602.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.7. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 NpF_4 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 NpF_4	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Np-237 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,000725 0,099275 0,200000 0,010000 0,040000	6,750445	$3,748664079 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S) $9\text{Cr}2\text{WVTa}$ + %40 (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.1 NpF_4	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Np-237 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,000290 0,039710 0,004000 0,016000	7,518928	$6,501606952 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.8. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 NpF_4 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 NpF_4	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Np-237 F-19	1,342500 16,55750 71,60000 0,000725 0,099275 0,200000 0,005000 0,020000	6,750445	$3,744223239.10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577.10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %0.5 NpF_4	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Np-237 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,537000 6,623000 28,64000 0,000290 0,039710 0,002000 0,008000	7,518928	$6,499034274.10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357.10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296.10^{-2}$

Çizelge 5.9. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %1 NpF_4 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %1 NpF_4	Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 C-12 Np-237 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,000725 0,099275 0,200000 0,010000 0,040000	7,519906	$3,748664079 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 UC_2 + %1 NpF_4	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn U-235 U-238 Np-237 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,000290 0,039710 0,004000 0,016000	6,75289	$6,501606952 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.10. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 AmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 AmF_3	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Am-243 F-19	1,348500 16,63150 71,92000 0,100000 0,200000 0,000100 0,000300	6,48933	$3,697887143 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S) $9\text{Cr}2\text{WVTa}$ + %40 (Akışkan)%89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 AmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Am-243 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,539400 6,652600 28,76800 0,040000 0,000400 0,001200	7,414482	$6,481296177^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.11. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.5 AmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 +%0.5 AmF_3	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Am-243 F-19	1,342500 16,55750 71,60000 0,100000 0,005000 0,200000 0,015000	6,50265	$3,690025686.10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577.10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan) %89.5 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 +%0.5 AmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Am-243 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,537000 6,623000 28,64000 0,040000 0,002000 0,006000	7,41981	$6,478151594.10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357.10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H_2O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296.10^{-2}$

Çizelge 5.12. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 Li₂₀Sn₈₀ + %10 ThC₂ + %1 AmF₃ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %1 AmF ₃	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Am-243 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,100000 0,200000 0,010000 0,030000	6,5193	3,680226777.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan) %89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %1 AmF ₃	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Am-243 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,040000 0,004000 0,012000	7,42647	6,474232031.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.13. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 CmF_3 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 CmF_3	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Cm-247 F-19	1,348500 16,63150 71,92000 0,100000 0,200000 0,001000 0,003000	6,48965	$3,697925289 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 CmF_3	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Cm-247 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,539400 6,652600 28,76800 0,040000 0,000400 0,001200	7,41461	$6,481311435 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.14. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5Li₂₀Sn₈₀ + %10 ThC₂ + %0.5 CmF₃ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.5 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %0.5 CmF ₃	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Cm-247 F-19	1,342500 16,55750 71,60000 0,100000 0,200000 0,005000 0,015000	6,50425	3,690216416.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan) %89.5 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %0.5 CmF ₃	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Cm-247 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,537000 6,623000 28,64000 0,040000 0,002000 0,006000	7,42045	6,478227886.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.15. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 Li₂₀Sn₈₀ + %10 ThC₂ + %1 CmF₃ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %1 CmF ₃	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Cm-247 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,100000 0,200000 0,010000 0,030000	6,5225	3,715476537.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %1 CmF ₃	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Cm-247 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,040000 0,004000 0,012000	7,42775	6,488331935.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.16. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 NpF_4 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 NpF_4	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Np-237 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,100000 0,200000 0,010000 0,040000	6,486489	$3,697261489 \cdot 10^{-2}$
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	$1,23577 \cdot 10^{-01}$
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan) %89.9 $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ + %10 ThC_2 + %0.1 NpF_4	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Np-237 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,040000 0,004000 0,016000	7,4133456	$6,481046915 \cdot 10^{-2}$
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	$8,54357 \cdot 10^{-2}$
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	$9,12296 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 5.17. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89.5 Li₂₀Sn₈₀ + %10 ThC₂ + %0.5 NpF₄ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89.5 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10ThC ₂ + %0.5 NpF ₄	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Np-237 F-19	1,342500 16,55750 71,60000 0,100000 0,200000 0,005000 0,020000	6,488445	3,702406844.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan) %89.5 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10ThC ₂ + %0.5 NpF ₄	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Np-237 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,537000 6,623000 28,64000 0,040000 0,002000 0,008000	7,414128	6,483104058.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.18. Çalışmada kullanılan APEX modelinde %89 Li₂₀Sn₈₀ + %10 ThC₂ + %1 NpF₄ 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				
2-4-22-44. Bölge	Sıvı Duvar (Akışkan) %89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %1 NpF ₄	Li-6 Li-7 Sn Th-232 C-12 Np-237 F-19	1,335000 16,46500 71,20000 0,100000 0,200000 0,010000 0,040000	6,49089	3,708838538.10 ⁻²
3-33. Bölge	%100 Berilyum	Be	1	1.690	1,23577.10 ⁻⁰¹
6-66. Bölge	%60 Zırh (F.S)9Cr2WVTa + %40 (Akışkan)%89 Li ₂₀ Sn ₈₀ + %10 ThC ₂ + %1 NpF ₄	C-12 Si V Cr Mn Fe Ta W Li-6 Li-7 Sn Th-232 Np-237 F-19	0,080600 0,001800 0,015000 0,054000 0,002400 0,527280 0,000420 0,012000 0,534000 6,586000 28,48000 0,040000 0,004000 0,016000	7,415106	6,485676735.10 ⁻²
8-10-88-101. 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 0,120055 0,001501 0,002501 0,002524	8,01773	8,54357.10 ⁻²
9-99. Bölge	Vakum Odası (%80 SS316LN + %20 H ₂ O)	Fe Cr Mn-55 Si Ni Mo Nb-93 Co-59 Cu H-1 O-16	0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,096044 0,020009 0,001201 0,002001 0,002019 0,400000 0,200000	5,28204	9,12296.10 ⁻²

Çizelge 5.19. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Nötron Akısı (n/cm³.s).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,424914.10 ¹⁵	1,429241.10 ¹⁵	1,425176.10 ¹⁵
%0,5	1,425681.10 ¹⁵	1,445592.10 ¹⁵	1,427300.10 ¹⁵
%1	1,427626.10 ¹⁵	1,465788.10 ¹⁵	1,424930.10 ¹⁵

Çizelge 5.20. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Nötron Akısı (n/cm³.s).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,437717.10 ¹⁵	1,423224.10 ¹⁵	1,438993.10 ¹⁵
%0,5	1,438280.10 ¹⁵	1,460236.10 ¹⁵	1,436402.10 ¹⁵
%1	1,441635.10 ¹⁵	1,470684.10 ¹⁵	1,434041.10 ¹⁵

Çizelge 5.21. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritiyum Üretim Oranı) değeri.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,53906	1,54184	1,53784
%0,5	1,53343	1,54587	1,53377
%1	1,52677	1,55815	1,52740

Çizelge 5.22. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam TBR (Tritiyum Üretim Oranı) değeri.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,5436	1,5491	1,5443
%0,5	1,5376	1,5562	1,5398
%1	1,5303	1,5660	1,5345

Çizelge 5.23. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,37337	1,39180	1,37349
%0,5	1,37513	1,46708	1,37691
%1	1,37742	1,56470	1,38113

Çizelge 5.24. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam M (Enerji Çoğaltma Faktörü) değeri.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,35544	1,37443	1,35587
%0,5	1,35706	1,45062	1,35892
%1	1,35919	1,54762	1,36335

Çizelge 5.25. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi (W/cm³) değeri.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	55,90728	58,06999	55,69384
%0,5	56,01182	68,21898	56,05516
%1	56,06528	81,30495	56,43567

Çizelge 5.26. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde kullanılması ile elde edilen toplam Isı Enerjisi (W/cm³) değeri.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	52,63221	55,97218	52,82709
%0,5	52,71627	65,87144	53,09476
%1	52,95051	79,20509	53,61815

Çizelge 5.27. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Proton üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	370,363	371,146	370,759
%0,5	375,096	376,450	376,512
%1	380,270	385,025E	374,504

Çizelge 5.28. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Proton üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	397,263	362,807	398,263
%0,5	401,056	404,524	394,389
%1	406,414	393,105	393,640

Çizelge 5.29. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Döteryum üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	7,31647	7,33262	7,33118
%0,5	7,41724	7,40135	7,43868
%1	7,52063	7,52724	7,40511

Çizelge 5.30. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Döteryum üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	7,87388	7,17027	7,90273
%0,5	7,94785	7,97531	7,81661
%1	8,05094	7,69334	7,80588

Çizelge 5.31. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Tritiyum üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,12618.10 ⁻⁰¹	1,13089.10 ⁻⁰¹	1,12959.10 ⁻⁰¹
%0,5	1,14262.10 ⁻⁰¹	1,14196.10 ⁻⁰¹	1,14765.10 ⁻⁰¹
%1	1,15990.10 ⁻⁰¹	1,16262.10 ⁻⁰¹	1,14304.10 ⁻⁰¹

Çizelge 5.32. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama Tritiyum üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,22213.10 ⁻⁰¹	1,10696.10 ⁻⁰¹	1,22998.10 ⁻⁰¹
%0,5	1,23540.10 ⁻⁰¹	1,24079.10 ⁻⁰¹	1,21728.10 ⁻⁰¹
%1	1,25234.10 ⁻⁰¹	1,19575.10 ⁻⁰¹	1,21585.10 ⁻⁰¹

Çizelge 5.33. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-3 üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	2,72040.10 ⁻⁰³	2,72765.10 ⁻⁰³	2,72725.10 ⁻⁰³
%0,5	2,75996.10 ⁻⁰³	2,75890.10 ⁻⁰³	2,76916.10 ⁻⁰³
%1	2,81328.10 ⁻⁰³	2,82555.10 ⁻⁰³	2,76930.10 ⁻⁰³

Çizelge 5.34. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-3 üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	2,96321.10 ⁻⁰³	2,67575.10 ⁻⁰³	2,99618.10 ⁻⁰³
%0,5	2,99833.10 ⁻⁰³	3,01807.10 ⁻⁰³	2,97083.10 ⁻⁰³
%1	3,05141.10 ⁻⁰³	2,91177.10 ⁻⁰³	2,95943.10 ⁻⁰³

Çizelge 5.35. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-4 üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	69,8573	69,9982	69,9686
%0,5	70,7663	70,8050	71,0471
%1	71,7917	72,1732	70,6741

Çizelge 5.36. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerindeki ortalama He-4 üretimi (aapm/30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	75,0132	68,4470	75,2134
%0,5	75,7178	76,1715	74,4884
%1	76,7634	73,7781	74,3352

Çizelge 5.37. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerinde elde edilen DPA değeri (30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	9,51435.10 ⁻⁰⁴	9,77361.10 ⁻⁰⁵	9,73734.10 ⁻⁰⁵
%0,5	9,78320.10 ⁻⁰⁵	9,97573.10 ⁻⁰⁵	9,79379.10 ⁻⁰⁵
%1	9,83580.10 ⁻⁰⁵	1,02353.10 ⁻⁰⁴	9,74955.10 ⁻⁰⁵

Çizelge 5.38. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemeler üzerinde elde edilen DPA değeri (30 FPY).

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,00120.10 ⁻⁰⁴	9,66033.10 ⁻⁰⁵	1,00130.10 ⁻⁰⁴
%0,5	1,00401.10 ⁻⁰⁴	1,02514.10 ⁻⁰⁴	9,97517.10 ⁻⁰⁵
%1	1,00959.10 ⁻⁰⁴	1,03290.10 ⁻⁰⁴	9,93638.10 ⁻⁰⁵

Çizelge 5.39. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fisyon Reaksiyon Sayısı.

Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	1,949541.10 ⁻⁰³	3,243374.10 ⁻⁰³	1,976906.10 ⁻⁰³
%0,5	2,160191.10 ⁻⁰³	8,644762.10 ⁻⁰³	2,301430.10 ⁻⁰³
%1	2,425515.10 ⁻⁰³	1,553396.10 ⁻⁰²	2,720755.10 ⁻⁰³

Çizelge 5.40. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fisyon Reaksiyon Sayısı.

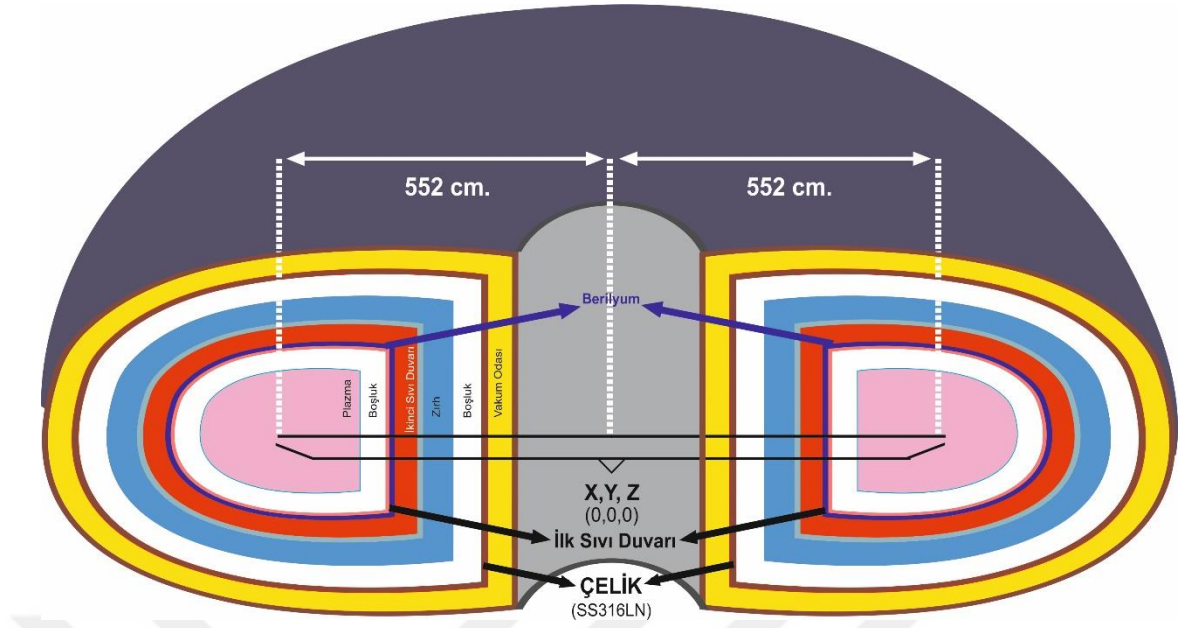
Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	3,997866.10 ⁻⁰⁴	1,695714.10 ⁻⁰³	4,278131.10 ⁻⁰⁴
%0,5	6,051240.10 ⁻⁰⁴	7,116281.10 ⁻⁰³	7,286431.10 ⁻⁰⁴
%1	8,639914.10 ⁻⁰⁴	1,399704.10 ⁻⁰²	1,148154.10 ⁻⁰³

Çizelge 5.41. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fisil Yakıt Üretimi (kg/yıl).

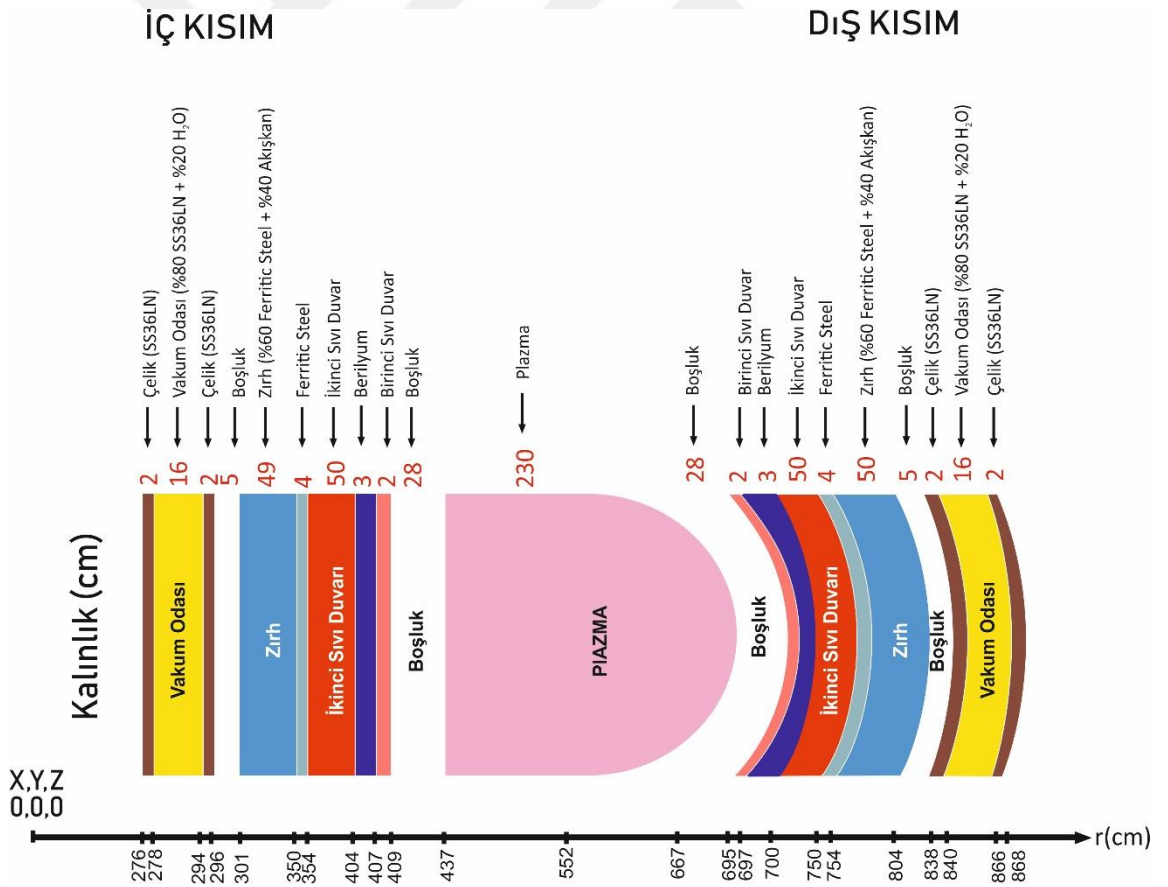
Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	501,618	499,131	499,717
%0,5	501,671	503,287	500,836
%1	501,653	509,469	502,826

Çizelge 5.42. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün ilgili bölgelerinde kullanılması ile elde edilen ortalama Fisil Yakıt Üretimi (kg/yıl).

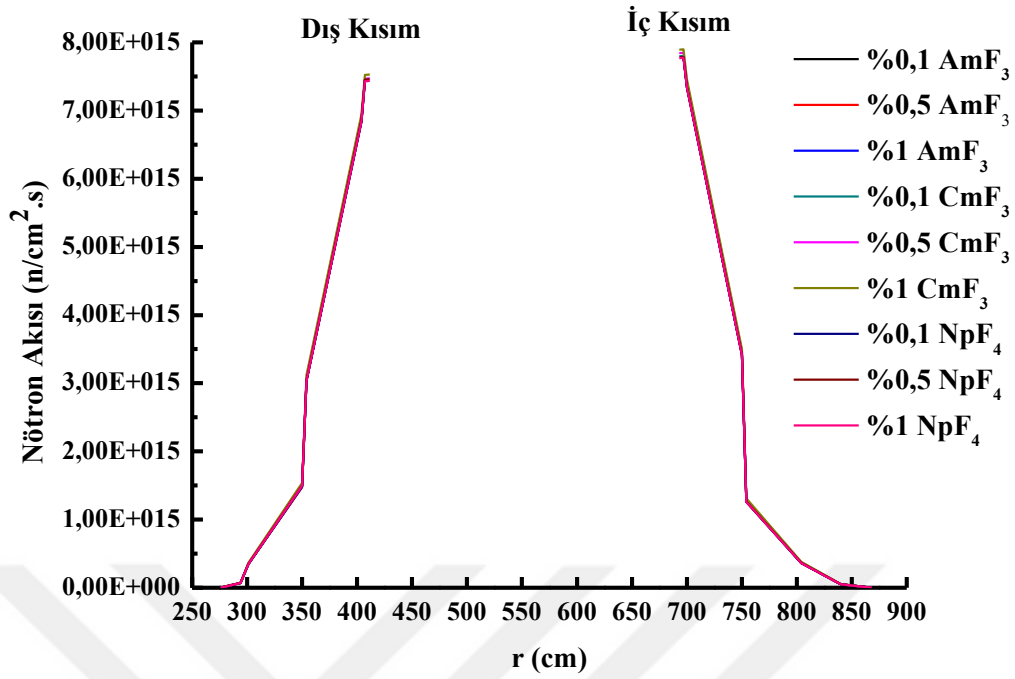
Ağır Metal Oranı	AmF ₃	CmF ₃	NpF ₄
%0,1	3,997866.10 ⁻⁰⁴	1,695714.10 ⁻⁰³	4,278131.10 ⁻⁰⁴
%0,5	6,051240.10 ⁻⁰⁴	7,116281.10 ⁻⁰³	7,286431.10 ⁻⁰⁴
%1	8,639914.10 ⁻⁰⁴	1,399704.10 ⁻⁰²	1,148154.10 ⁻⁰³



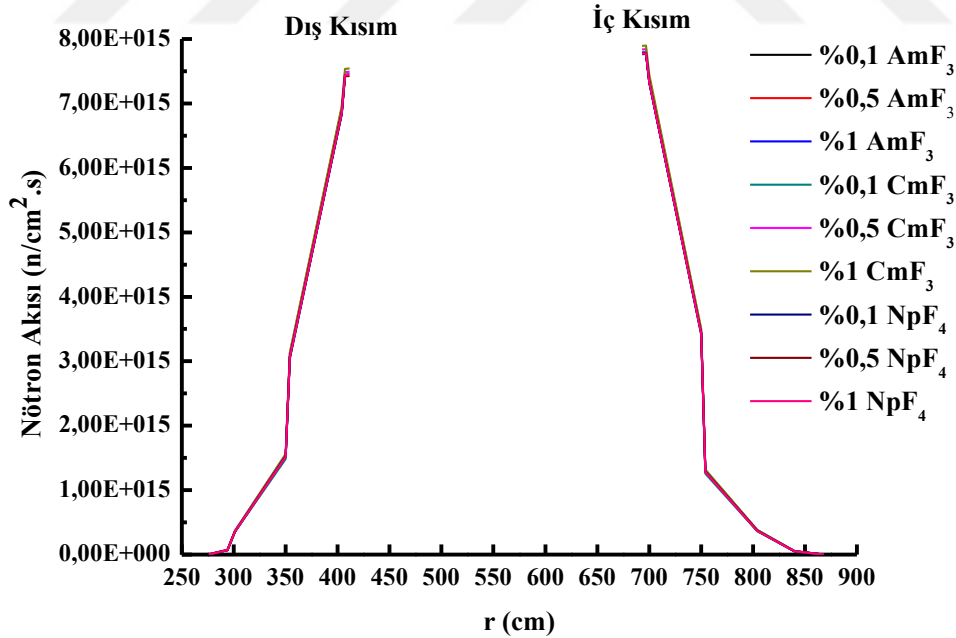
Şekil 5.1. Hesaplamalarda kullanılan APEX hibrit reaktörünün gösterimi



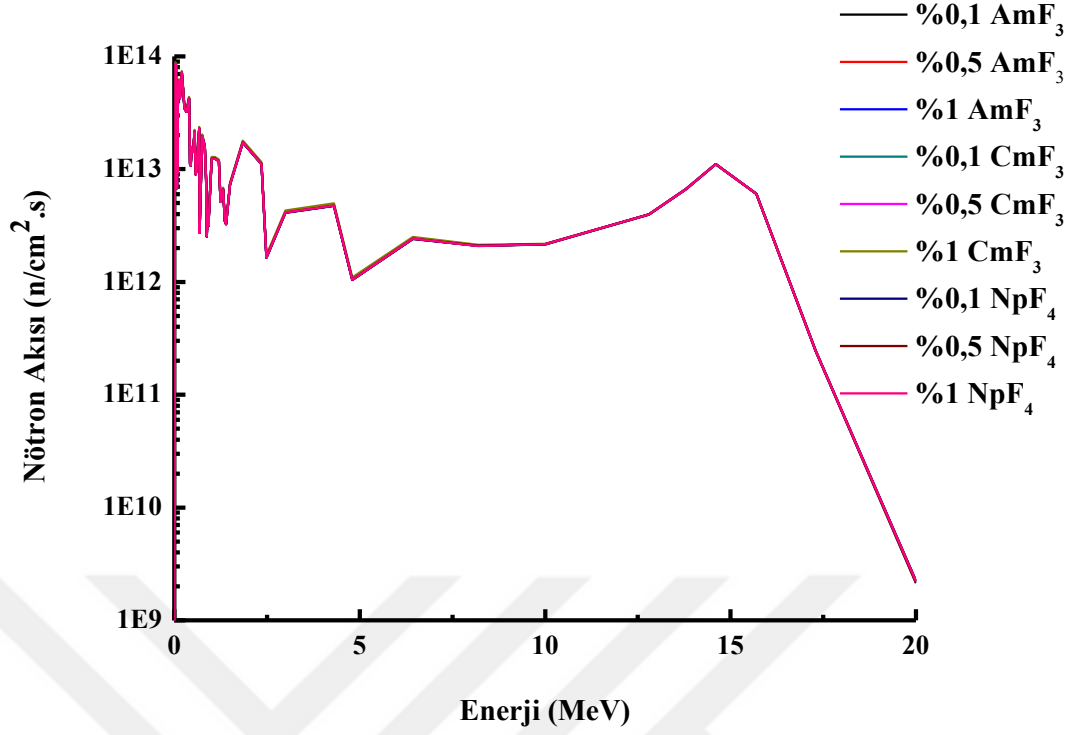
Şekil 5.2. Hesaplamada kullanılan APEX hibrit reaktörün bölge yarıçap ve kalınlıkları



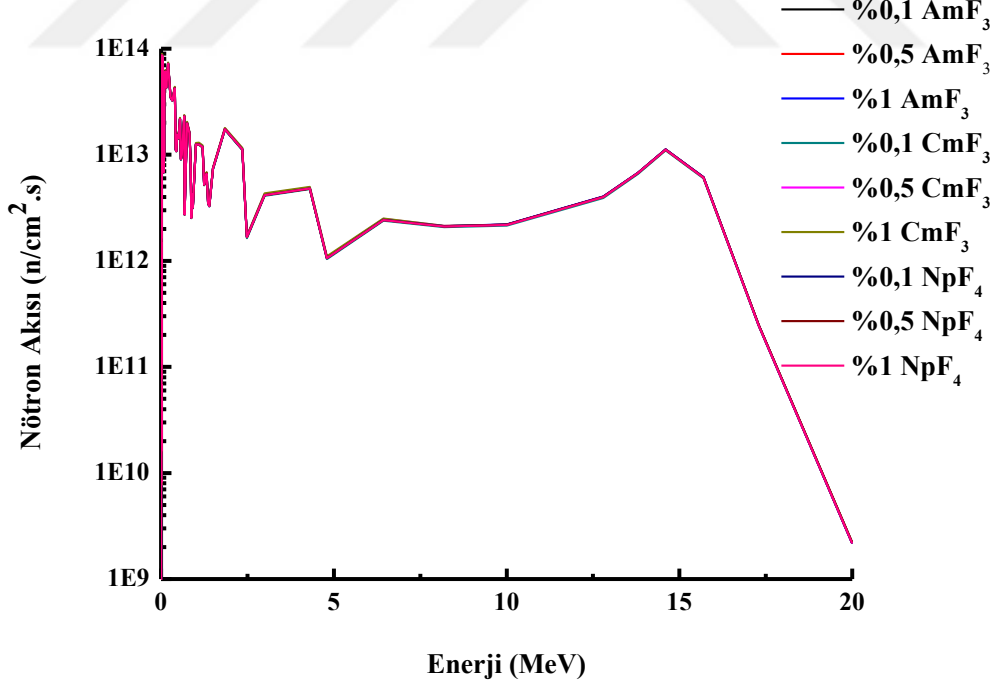
Şekil 5.3. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında ortalama Nötron Akısı.



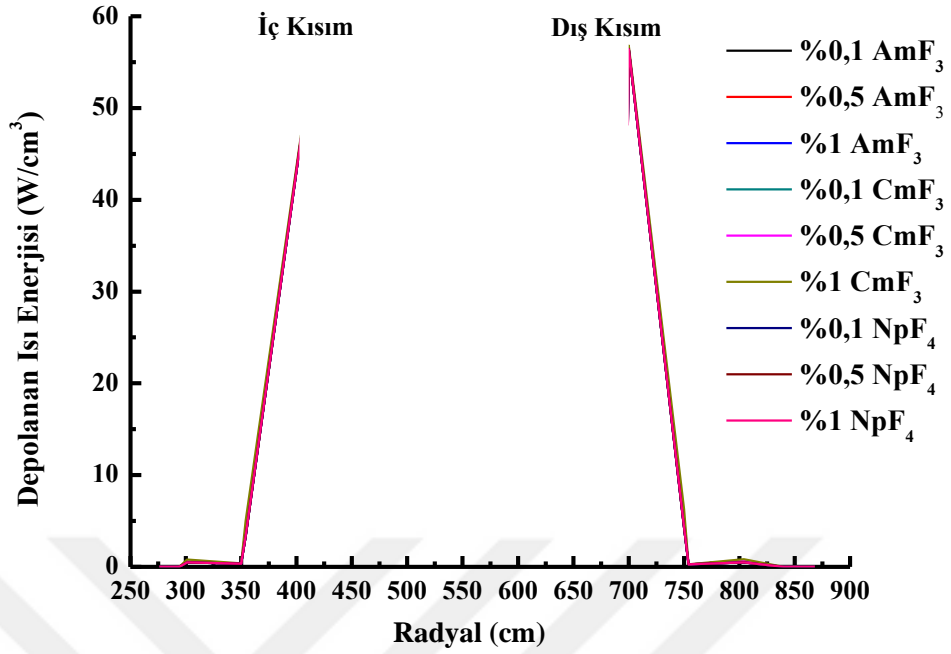
Şekil 5.4. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında ortalama Nötron Akısı.



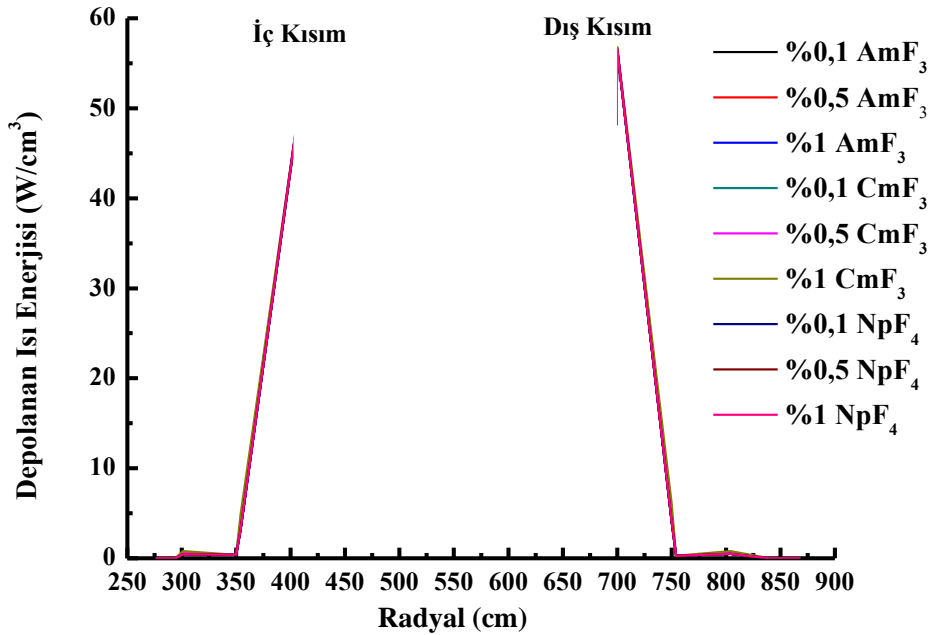
Şekil 5.5. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Nötron Akısı.



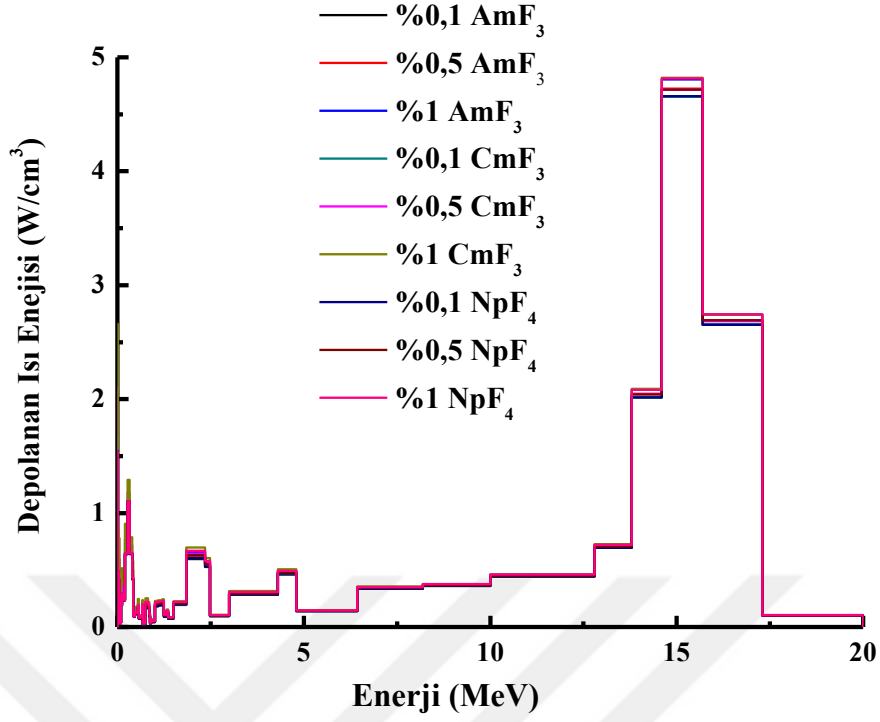
Şekil 5.6. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Nötron Akısı.



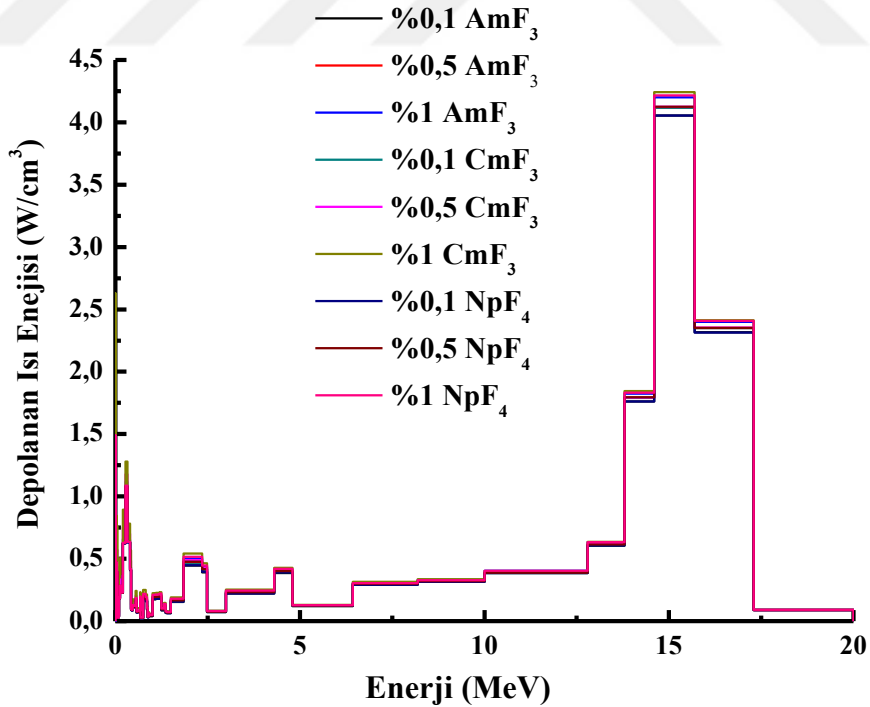
Şekil 5.7. %10 UC_2 , %89.9-89 $Li_{20}Sn_{80}$ ve %0.1-1 $AmF_3-CmF_3-NpF_4$ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında Depolanan Isı Enerjisi değeri.



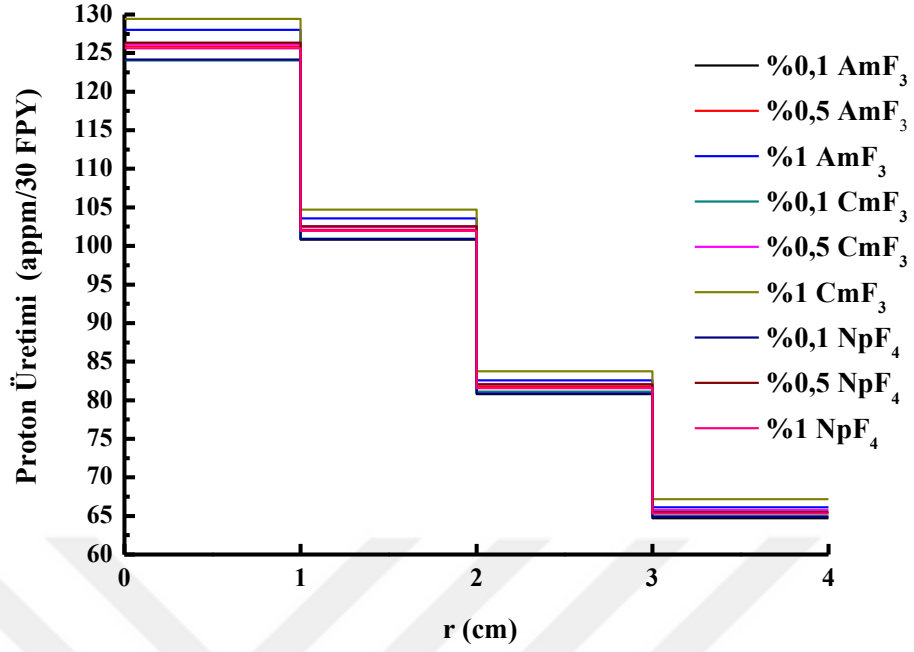
Şekil 5.8. %10 ThC_2 , %89.9-89 $Li_{20}Sn_{80}$ ve %0.1-1 $AmF_3-CmF_3-NpF_4$ karışımli akışkanların reaktörün Radyal (İç ve Dış) kısımlarında Depolanan Isı Enerjisi değeri.



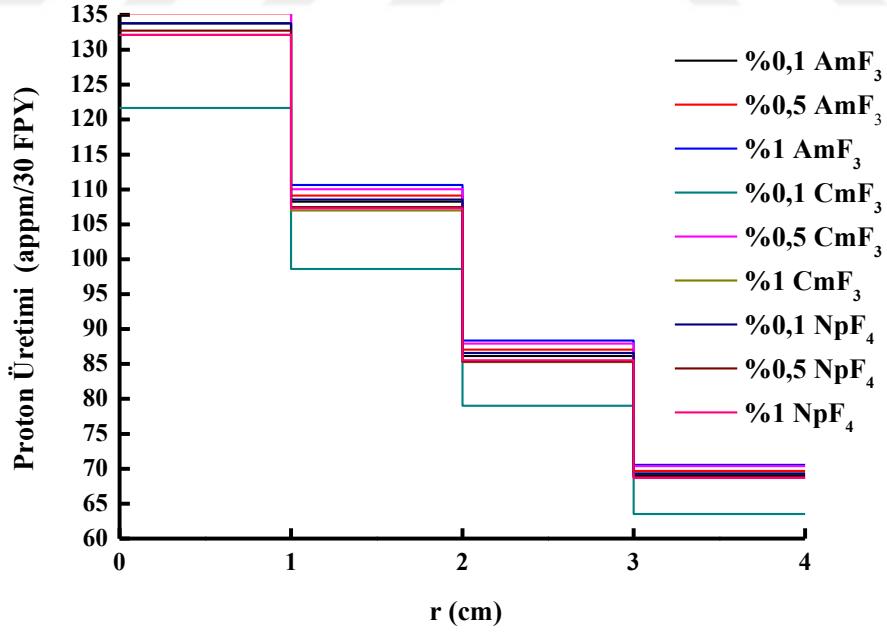
Şekil 5.9. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımılı akışkanların Enerji Spektrumlarına göre Depolanan Isı Enerjisi değeri.



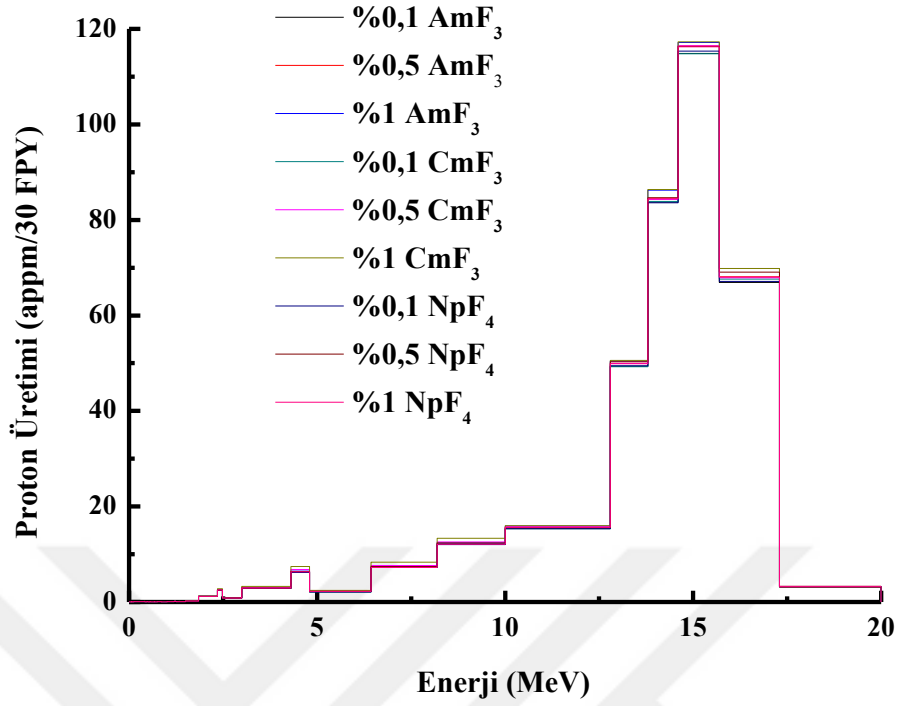
Şekil 5.10. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımılı akışkanların Enerji Spektrumlarına göre Depolanan Isı Enerjisi değeri.



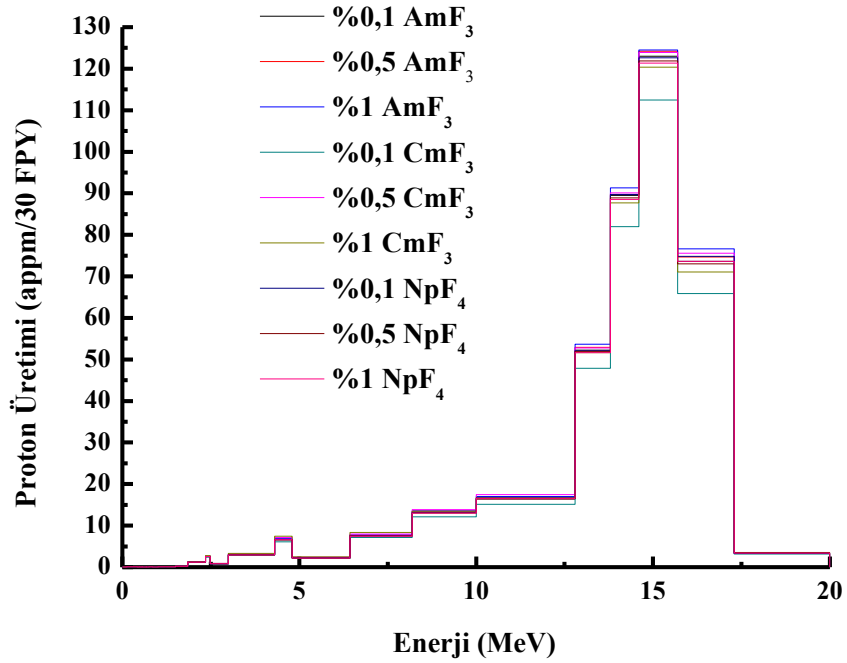
Şekil 5.11. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Proton üretimi.



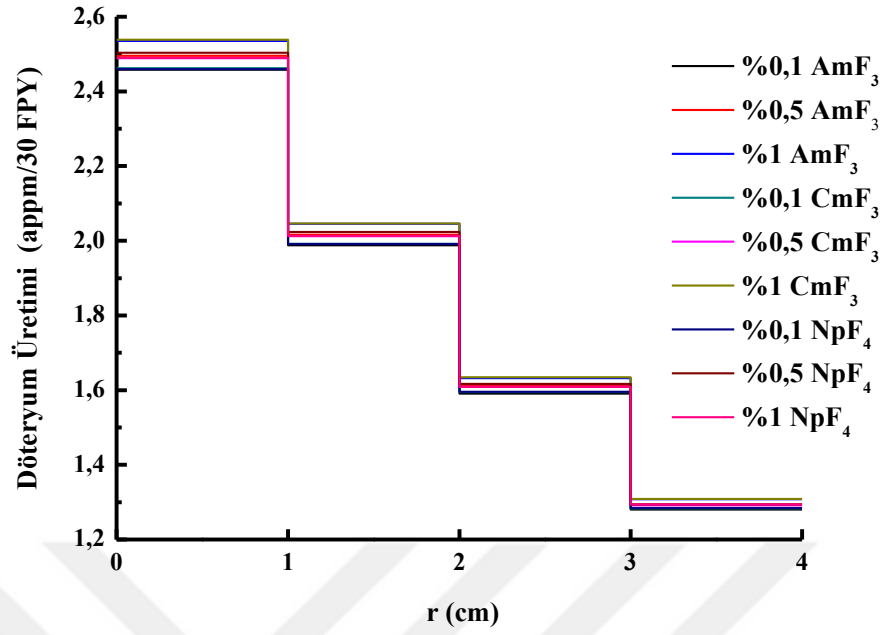
Şekil 5.12. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Proton üretimi.



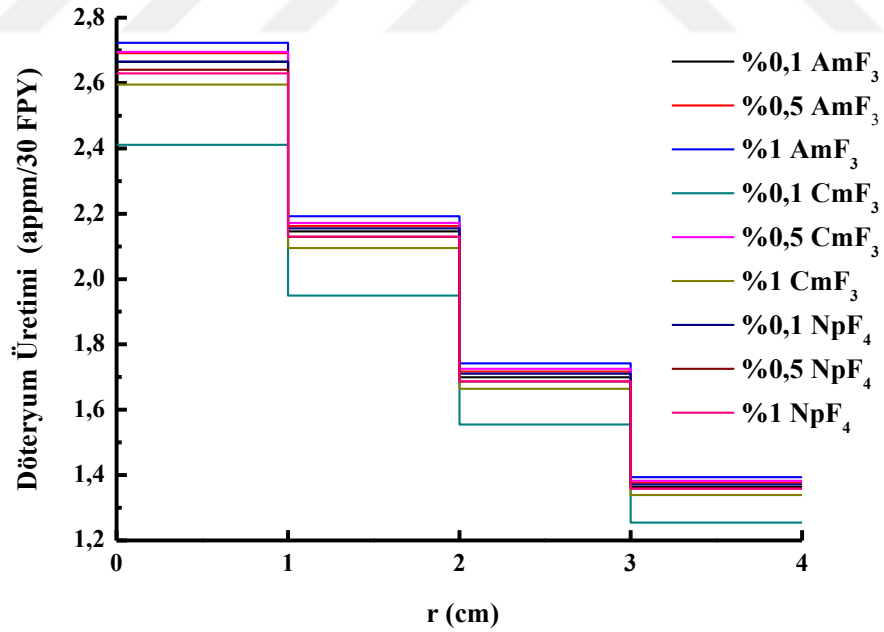
Şekil 5.13. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Proton üretimi.



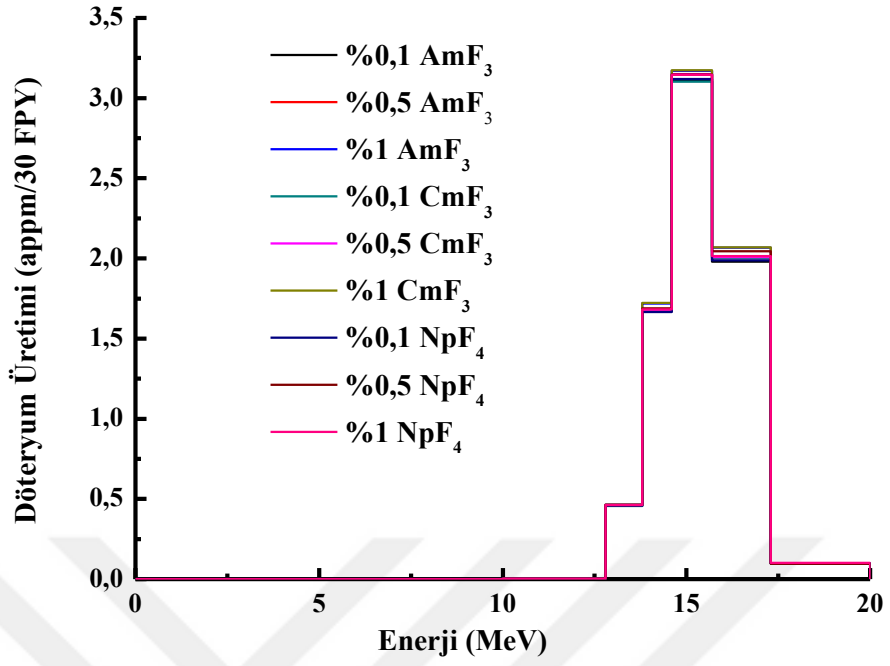
Şekil 5.14. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Proton üretimi.



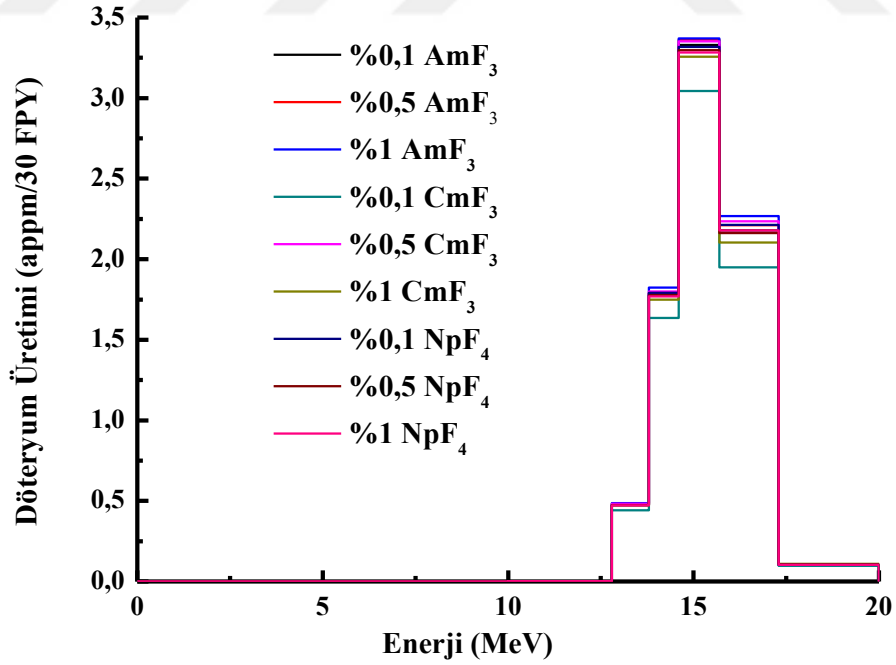
Şekil 5.15. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Döteryum üretimi.



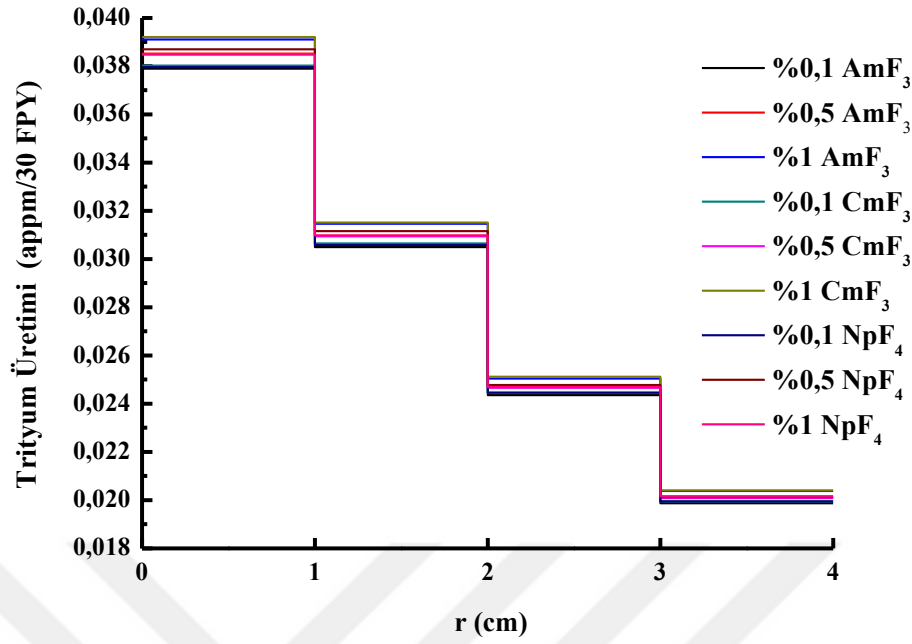
Şekil 5.16. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Döteryum üretimi.



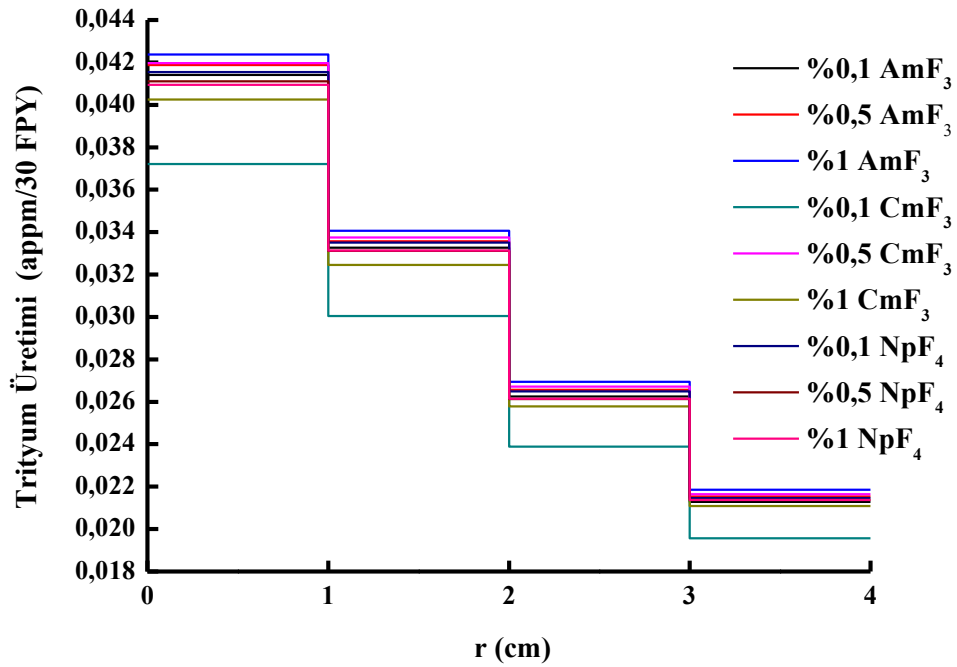
Şekil 5.17. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Döteryum üretimi.



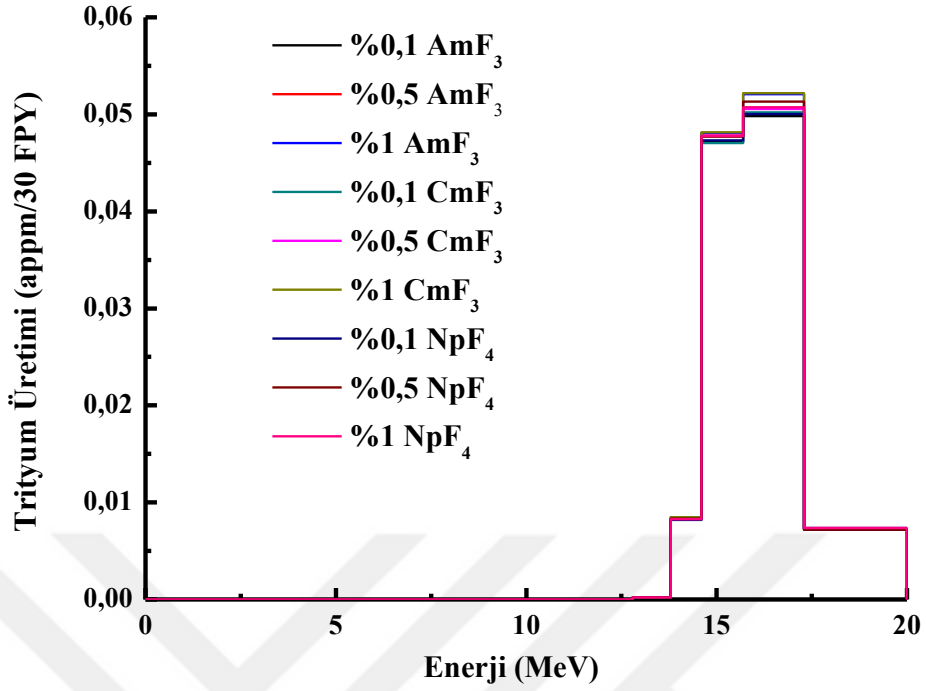
Şekil 5.18. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Döteryum üretimi.



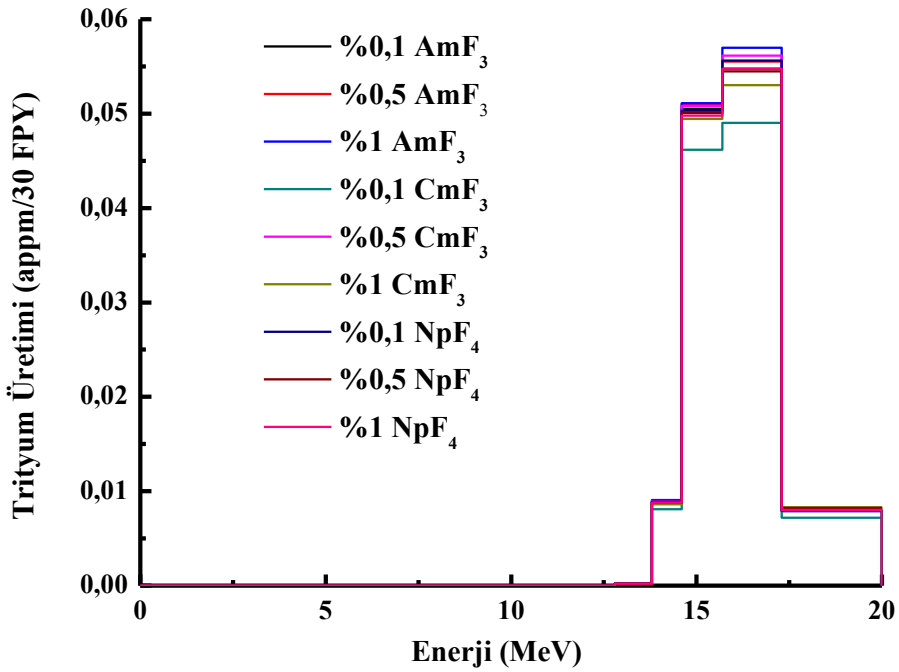
Şekil 5.19. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Tritiyum üretimi.



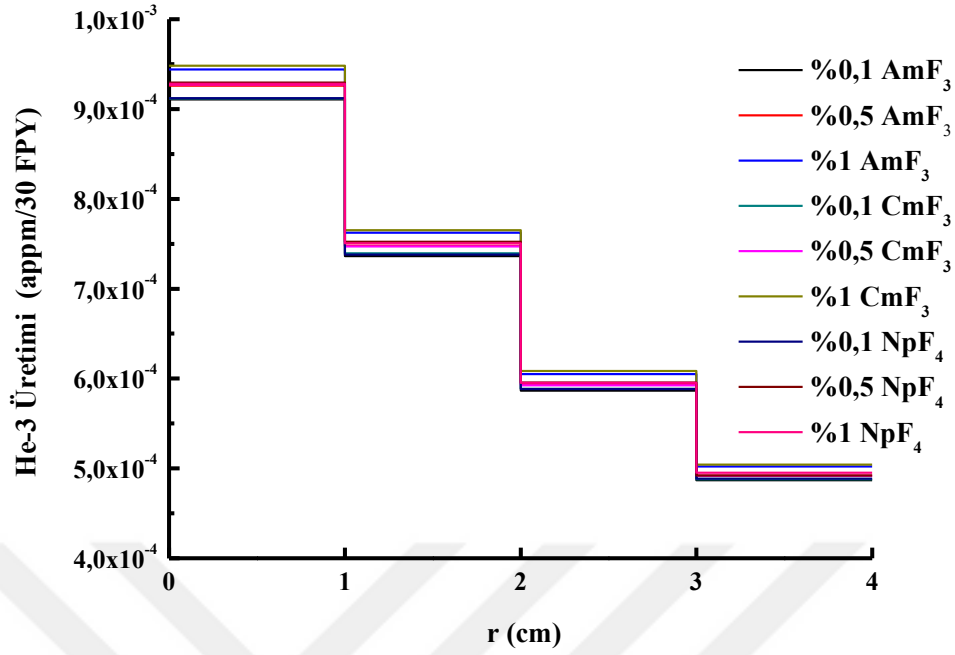
Şekil 5.20. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama Tritiyum üretimi.



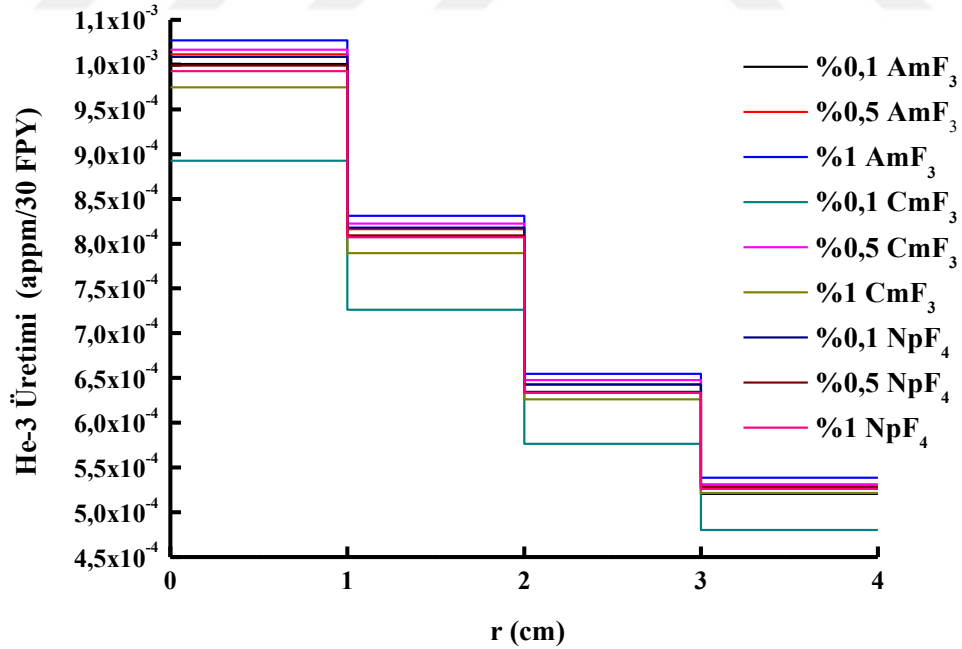
Şekil 5.21. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımı akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Tritiyum üretimi.



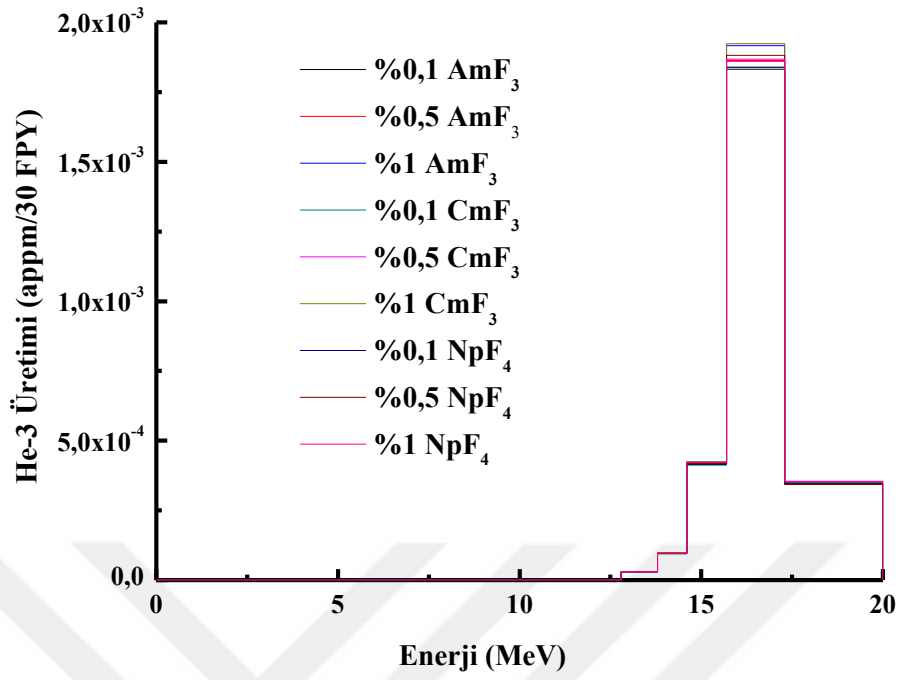
Şekil 5.22. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımı akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama Tritiyum üretimi.



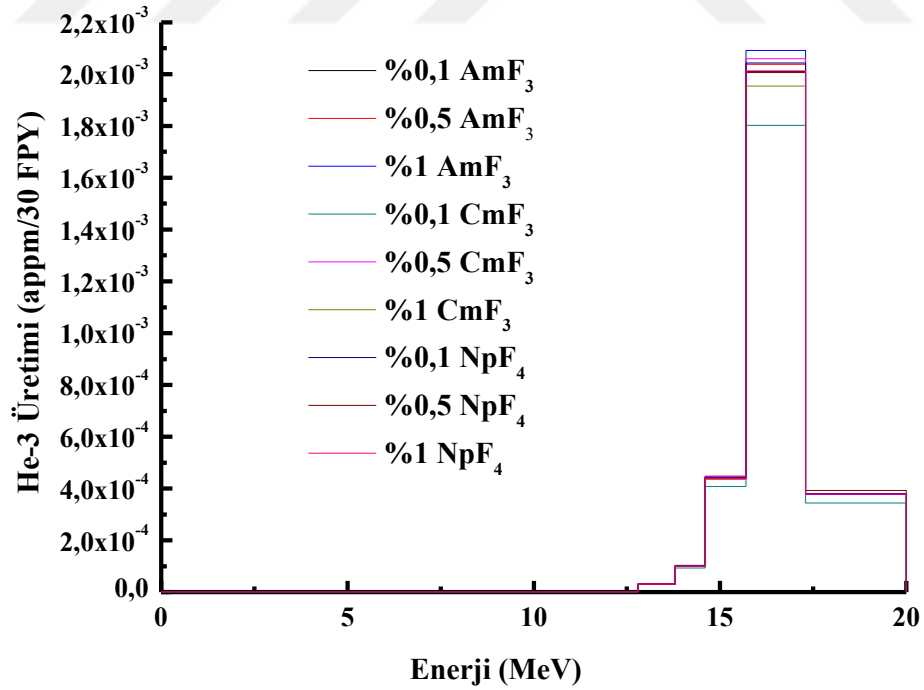
Şekil 5.23. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-3 üretimi.



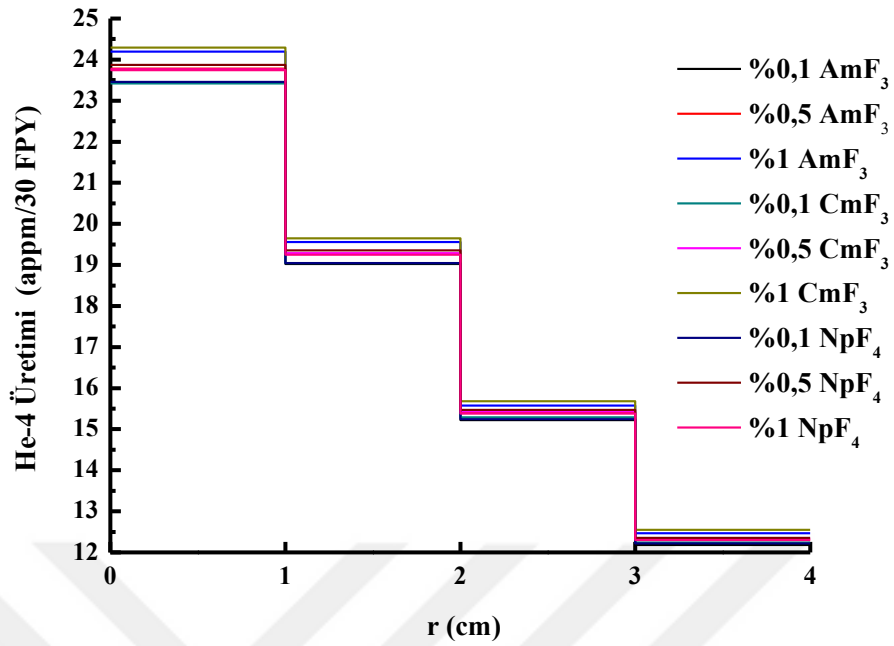
Şekil 5.24. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-3 üretimi.



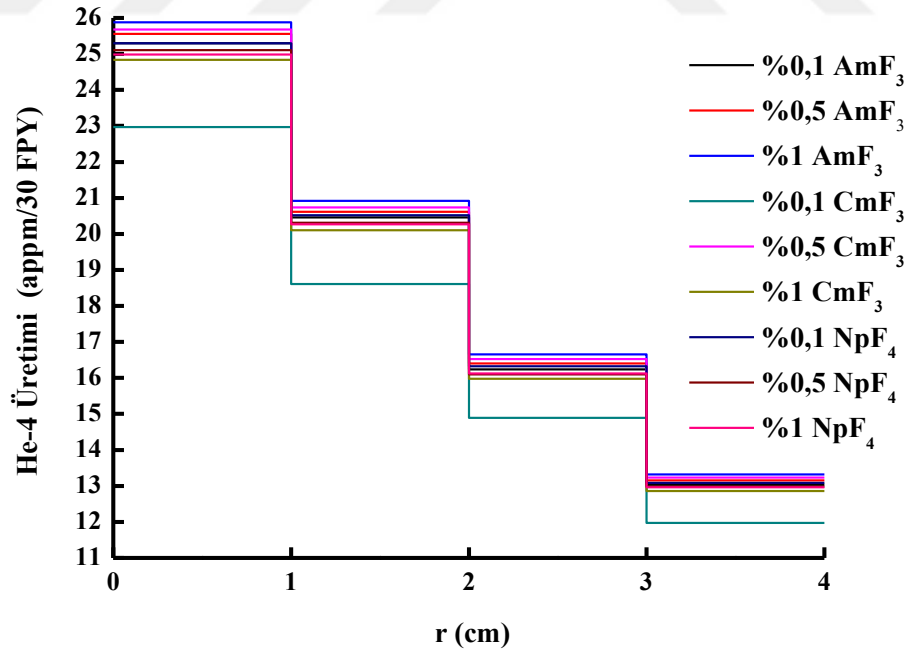
Şekil 5.25. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-3 üretimi.



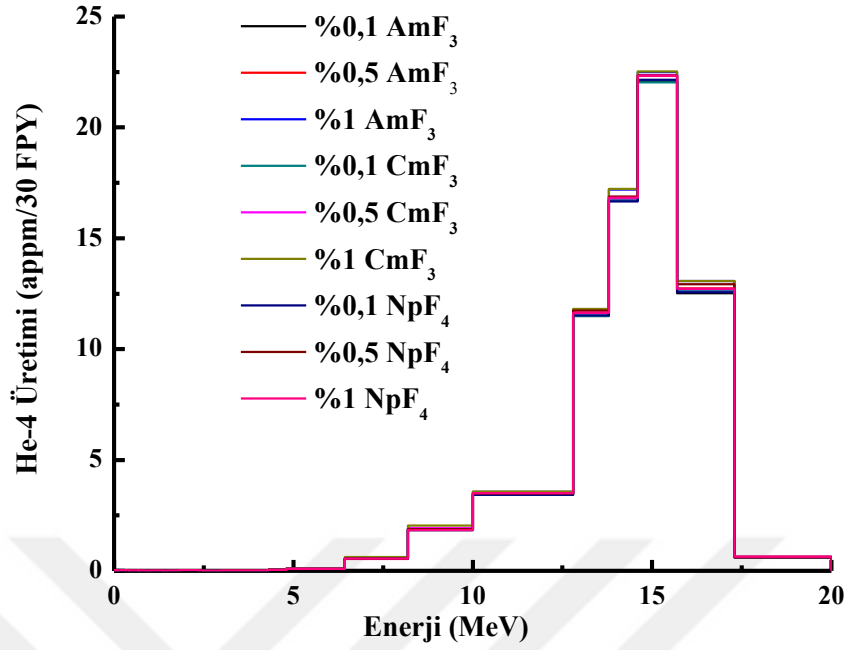
Şekil 5.26. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-3 üretimi.



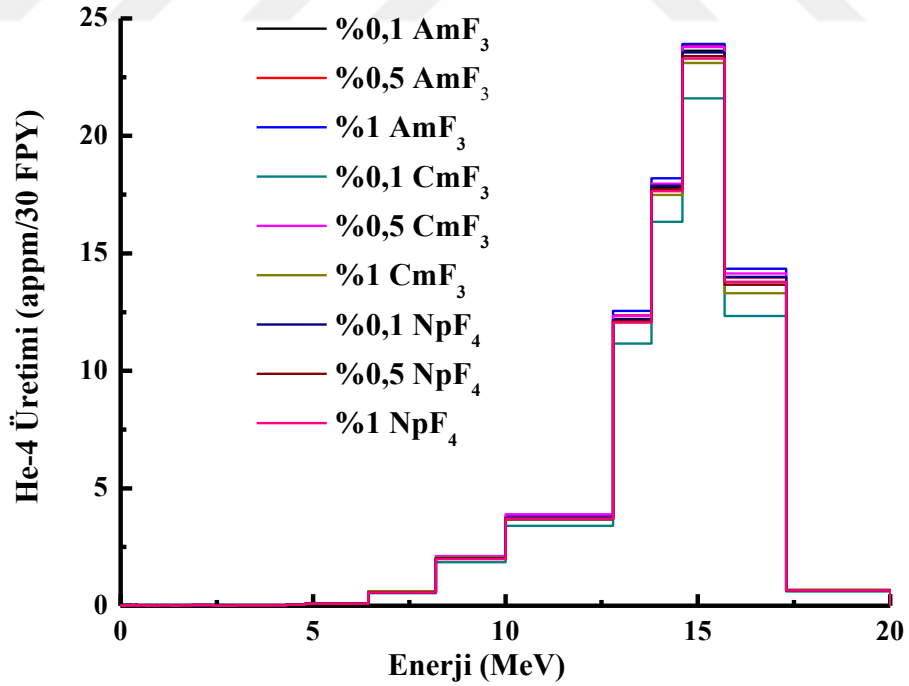
Şekil 5.27. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-4 üretimi.



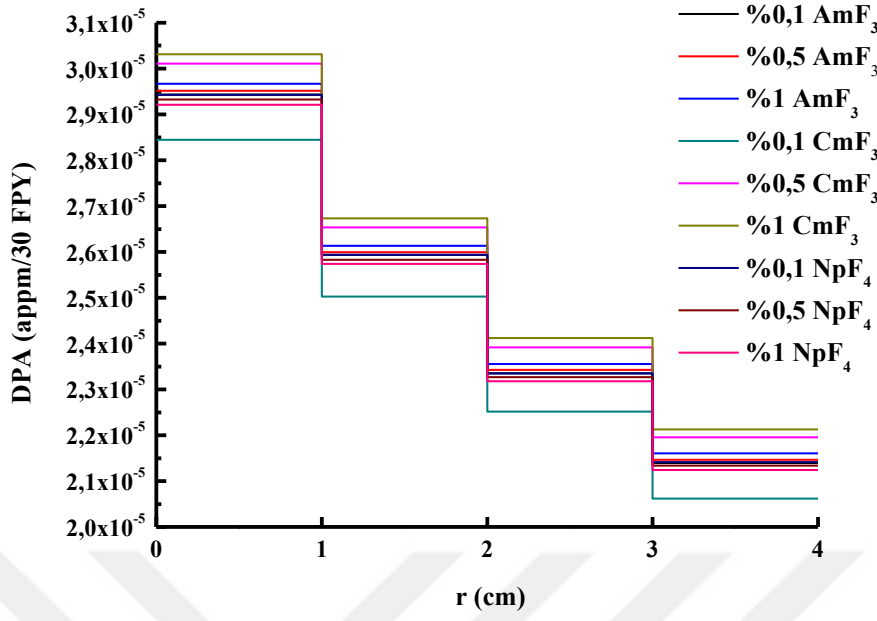
Şekil 5.28. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama He-4 üretimi.



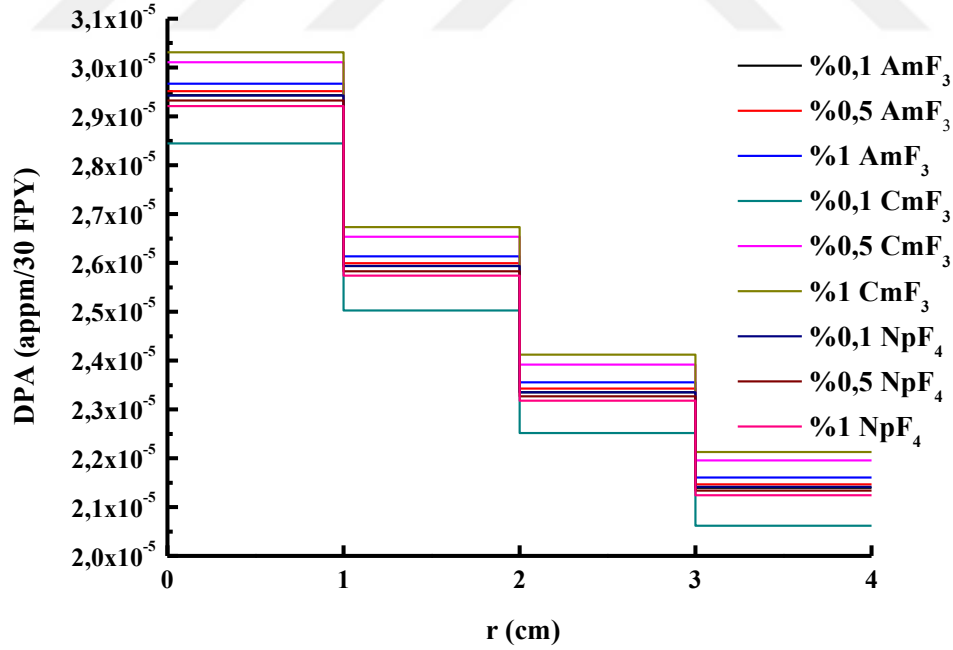
Şekil 5.29. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımını gösteren Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-4 üretimi.



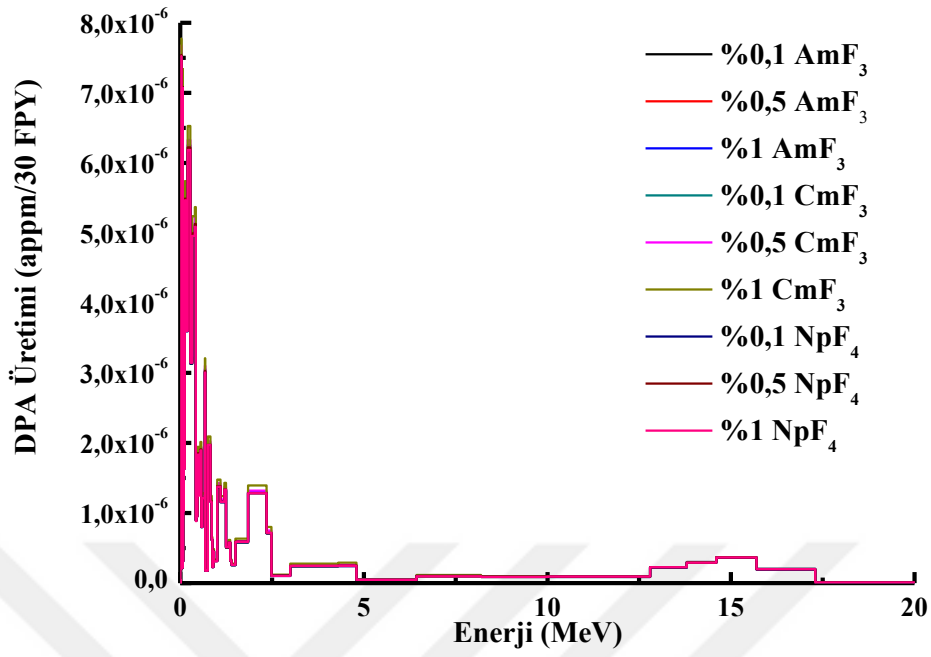
Şekil 5.30. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımını gösteren Enerji Spektrumlarına göre ortalama He-4 üretimi.



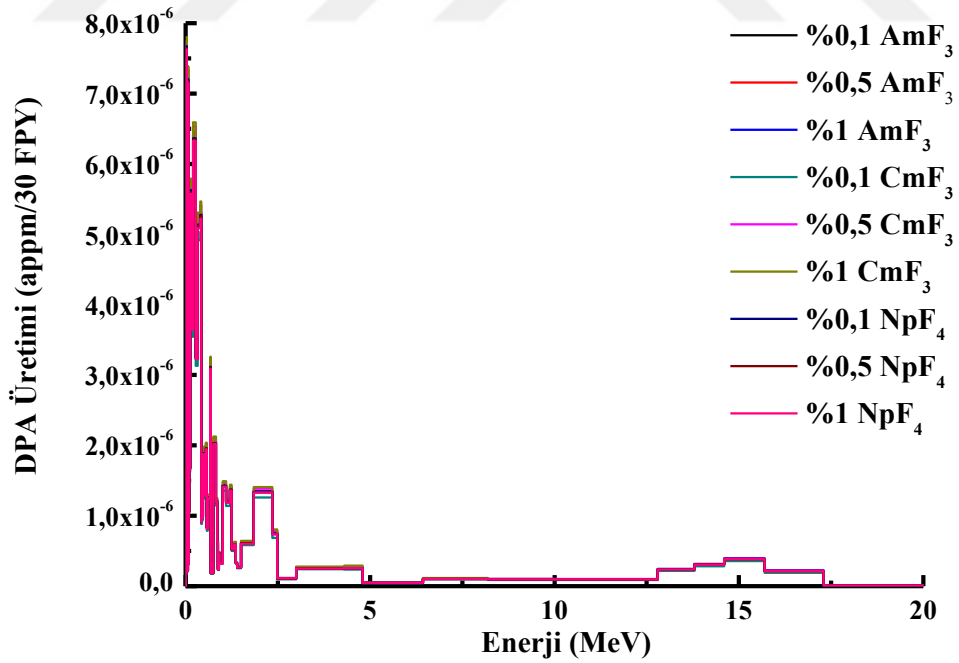
Şekil 5.31. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama DPA değeri.



Şekil 5.32. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların yapısal malzemenin duvar kalınlıklarına göre ortalama DPA değeri.



Şekil 5.33. %10 UC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama DPA değeri.



Şekil 5.34. %10 ThC₂, %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ ve %0.1-1 AmF₃-CmF₃-NpF₄ karışımli akışkanların Enerji Spektrumlarına göre ortalama DPA değeri.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların sınırlı olması, fosil yakıtların yakılmasıyla salınan CO₂ gazının sera etkisi ve radyoaktif atıkların çevre kirliliğine neden olması, fosil yakıtların miktarının giderek azalması gibi nedenlerden ötürü bilim adamlarını alternatif enerji kaynağı bulmaya yönlendirmiştir.

Fisyon ve füzyon reaksiyonları sonunda yüksek enerji sağlanması ve bunun sonucunda enerji ihtiyacının karşılanması, karbondioksit yaymaması ile çevreye zarar vermemesi dolayısıyla ve en önemlisi de bu fisyon ve füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesinde kaynak probleminin olmaması geleceğin alternatif temiz enerji kaynağının nükleer reaktörler olacağı ve enerji ihtiyacının büyük ölçüde nükleer reaktörlerden sağlanacağını göstermektedir.

Nükleer reaktörler, içerisinde gerçekleşen reaksiyonlara göre fisyon, füzyon ve hibrit olmak üzere 3'e ayrılır. 2019 itibariyle dünyada 30 ülkede 450 tane fisyon reaktörü işlemektedir. 18 ülkede ise 57 fisyon reaktörü inşaatı sürmektedir. Füzyon ve hibrit ise ekonomik ve teknolojik imkânların yetersizliği nedeniyle şu an için araştırma ve laboratuvar aşamasındadır.

Çalışmada APEX füzyon teknolojisinden yararlanılarak yeni bir APEX hibrit reaktör modeli tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, plazmayı kaplayan ilk katı duvar yerine hızlı akan ilk sıvı duvar ve yavaş akan ikinci sıvı duvar bölgeleri almıştır. İlk sıvı duvarın kullanımın sebebi, reaktör içerisindeki yüklü parçacıkları, hemen arkasındaki ikinci sıvı duvarın kullanım amacı ise, nötronlardan meydana çıkan radyasyon enerjisinin emerek yapısal malzemenin hasarını önlemektir.

Çalışmada tasarlanan APEX hibrit reaktörü iki çalışmada nötronik hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmalar;

Birinci bölümde; ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %10 UC₂ + %0.1-1 CmF₃, %10 UC₂ + %0.1-1 NpF₄'dan oluşan ağır metal ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımları akışkan olarak; İkinci bölümde ise ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar, zırh bölgelerinde %10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %10 ThC₂ + %0.1-1 CmF₃, %10 ThC₂ + %0.1-1 NpF₄'dan oluşan ağır metal ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımları akışkan olarak incelenmiştir.

İki çalışmada da yapısal malzeme olarak 9Cr2WVTa Ferritic Steel alaşımı, yansıtıcı (Reflektör) Berilyum kullanılmıştır. Üç boyutlu tasarım ve hesaplamalar MCNPX-2.7.0 Monte Carlo kodu kullanılarak ve ENDF/B-VIII.0 kütüphanesiyle gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada seçilen akışkanlar reaktörün ilgili kısımlarında incelendiğinde nötron akısının en büyük değerinin %10 UC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ ve %10 ThC₂ + %1 CmF₃ + %89 Li₂₀Sn₈₀ akışkanlarında olduğu gözlemlenmiştir.

Tasarlanan modelde ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde Trityumun kendi kendine yetebilmesi için gerekli olan şart TBR>1.1 ve termal güç için gerekli olan şart M>1.2, seçilen akışkanlar, kütüphane ve yapısal malzeme için sağlandığı görülmüştür.

Her iki çalışmada AmF₃ ve NF₄ oranı artıkça TBR değerleri azalmış, azalmanın seçilen akışkanlarda Li oranı azaldığında TBR değerinde de azalma olmuştur. CmF₃ oranı artıkça TBR değeri artmış, bu artma plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlarla çarpışmasından kaynaklanmaktadır. Çalışmada seçilen akışkanlardaki flor oranı artıkça M değerinde artmıştır. Bu artış, florun plazmadan çıkan nötronlarla inelastik çarpışmasından kaynaklanmaktadır.

Radyasyon hasarı; yapısal malzemelere yüksek enerji uygulanması sonucu malzeme karakteristiğinin bozulması şeklinde tanımlanır ve bu hasarın en az olması istenilir. Plazmaya yakın olan duvarlarda radyasyon hasarına yüksek enerjili nötronlar sebep olmakta ve reaktörün ömrünü kısaltmaktadır. Bu sebeple radyasyon hasarını minimuma indirmek için APEX reaktöründe kullanılan ilk sıvı duvar yüklü parçacıkları tutarken, ikinci sıvı duvar ise nötronların meydana getirdiği radyasyon enerjisini tutarak ısıya çevirir ve yapısal malzemelerin radyasyon hasarını ve aktivasyonu azaltır.

Çalışmada %10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %10 UC₂ + %0.1-1 CmF₃, %10 UC₂ + %0.1-1 NpF₄ ve %10 ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %10 ThC₂ + %0.1-1 CmF₃, %10 ThC₂ + %0.1-1 NpF₄'dan oluşan ağır metal ve %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀ eriyik tuz karışımları akışkan, yapısal malzeme olarak 9Cr2WVTa (Ferritic Steel) ve kütüphane olarak ENDF/B-VIII.0 kullanılmıştır.

Çalışmanın birinci kısmında (%10 UC₂ + %0.1-1 AmF₃, %10 UC₂ + %0.1-1 CmF₃, %10 UC₂ + %0.1-1 NpF₄ + %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀) en düşük proton, döteryum, ³He, ⁴He, trityum üretiminin en az %10 UC₂ + %0.1 AmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında (%10ThC₂ + %0.1-1 AmF₃, %10 ThC₂ + %0.1-1 CmF₃, %10 ThC₂ + %0.1-1 NpF₄ + %89.9-89 Li₂₀Sn₈₀) en düşük proton, döteryum, ³He, ⁴He, trityum üretiminin en az %10 ThC₂ + %0.1 CmF₃ + %89.9 Li₂₀Sn₈₀ akışkanında gözlemlenmiştir.

Çalışmada CmF₃ oranı arttıkça fisyon reaksiyon sayısının da arttığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada ²³⁹Pu ve ²³³U fisil yakıtı, ²³⁸U ve ²³²Th fertilitinin bulunduğu ilk sıvı duvar, ikinci sıvı duvar ve zırh bölgelerinde elde edilmiş. Hibrit reaktörde üretilen fisil yakıtın çok az bir kısmı reaktör içerisinde enerji üretiminde kullanılır, geriye kalan fisil yakıt uygun yöntemlerle reaktör dışına alınarak, fisyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılabilir.

Çalışmada seçilen akışkanlarda Minör Aktinid Florid oranı arttıkça üretilen fisil yakıt oranı arttığı gözlemlenmiştir. İki çalışmada en iyi artışın CmF₃'de olduğu gözlemlenmiştir.

Hibrit reaktörleri fisyon ve füzyon reaksiyonlarını bir arada gerçekleştirerek nükleer enerji ve fisil yakıt üretimi sağlayacağından teknolojinin ilerlemesiyle ile enerji kaynağı olarak hibrit reaktörleri kullanması düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] H. Okan ZABUNOĞLU (2019), *Atomun tarihçesi*, <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Outline-History-of-Nuclear-Energy/> (on-line access on 15 April 2019)
- [2] IAEA, *Comparati ve Assessment of Nuclear Power and other Energy Sources*, Annual Report 1994
- [3] World Nuclear Association (2019), <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/The-Nuclear-Renaissance> (on-line access on 19 April 2019)
- [4] *Power Reactor Information Service (PRIS)* (2019), <https://pris.iaea.org/pris/worldstatistics/underconstructionreactorsbycountry.aspx> (on-line access on Mart 2019)
- [5] S. Kennth, Çeviri Editörü B. Şarer 2001, *Nükleer Fizik I*, Palme Yayıncılık, Ankara, 25-85 p
- [6] M.Salvatores (2005), Nuclea Fuel Cycle Strategies Including Partitioning and Transmutation, *N.E.D.*, 235, 805-816
- [7] K. Fukuda, et al. (2003), IAEA Overview of global spent fuel storage, 102/60, *Int. Conf. on Storage of Spent Fuel from Power reactors*, Vienna, 2-6 June
- [8] The European Technical Working Group on ADS (2001), *A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration*, 13 p
- [9] P. Seltborg (2005), Source Efficiency and High-energy Neutronics in Accelerator-Driven Systems, *SCI*, Stockholm, 14, 136
- [10] L. H. Baetsle (2001), *Application of Partitioning /Transmutation of Radioactive Materials in Radioactive Waste Management*, Lectures given at the Workshop on Hybrid Nuclear Systems for Energy Production, September, Belgium, 50-55 p
- [11] M.W. Gregson (2003), *Full Core Analysis of ATW Prototype for Development of Nuclear Cross Section Data for Critical Core Components*, Masters of Science in Engineering, The University of Texas at Austin,
- [12] S. Kennth, Çeviri Editörü B. Şarer (2002), *Nükleer Fizik II* (pp:20-127), Ankara

- [13] H. M. Şahin (2007), Monte Carlo Calculation of Radiation Damage in First Wall of An Experimental Hybrid Reactor, *Annals of Nuclear Energy*, 34, 861-870
- [14] R. E. Nygren, et al. (2004), A Fusion Reactor Design With A Liquid First Walland Divertor, *Fusion Engineering and Design*, 72, 181-221
- [15] USAEC, Reactor Physics Constants (1961), **ANL 5800**, Argonne National Lab., , Chicago,USA.
- [16] Laf Sözlük (2013), <https://www.lafsozluk.com/2013/01/fisyon-fizyon-ve-fuzyon-nedir-ne.html> (on-line access on *April 2019*)
- [17] Freidberg, J. P. 2007. *Plasma Physics and Fusion Energy*. Cambridge University Press, 671, United Kingdom.
- [18] Sadece Fikirlerim(2016), <https://sadecefikirlerim.wordpress.com/2016/01/29/yildizlardan-karadeliklere-uzun-seruven/> (on-line access on *May 2019*)
- [19] Lawson, J. D., 1957, Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor, *Proc. Phys. Soc. B* 70 6
- [20] S. Gökpınar (1997), *Hafif Su Reaktörlerine Tabii Uranyumdan Yakıt Üretmek İçin Lityum Ve Lityum+Berilyum Soğutmalı Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Blanket Tasarımı*, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [21] M. Günay (2009), *Monte Carlo Tekniği Kullanılarak Bir Füzyon-Fisyon Hibrit Reaktöründe Üç Boyutlu Nötronik Hesaplamalar*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [22] H. Kasap (2014), *Monte Carlo Tekniği Kullanılarak Bir Füzyon-Fisyon Hibrit Reaktöründe Tasarlanan Blanket Optimizasyonu İçin Üç Boyutlu Nötronik Hesaplamalar*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [23] L. A. El-Guebaly & ARIES Team (2018), Nuclear Assessment to Support ARIES Power Plants and Next-Step Facilities: Emerging Challenges and Lessons Learned, *Fusion Science and Technology*, 1536-1055
- [24] Ralph W. Moir and Wallace Manheimer (2013), Chapter 14. “Fusion Fission Hybrid Reactors” (pp: 253-742), *Magnetic Fusion Technology*, Springer Verlag, London,
- [25] Hill B., et al. (2009), *Chapter 3. “Fusion-Fission Fuel Cycles”, Research Needs for Fusion-Fission Hybrid*, Gaithersburg, Maryland

- [26] B. B. Kadomtsev (1992), Tokamak Plasma: A Complex Physical System, *Institute of Physics Publishing*, Bristol and Philadelphia
- [27] S. Şahin (2001), et al., Neutronic Performance of Proliferation Hardened Thorium Fusion Breeders, **Fusion Engineering and Design**, 54, 63-77
- [28] S. Şahin (2000), *Mainlin Fusion-Fission (Hybrid) Reactor Concepts*, *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Institut de Genie Atomique PHB-Ecublens*, 1015 Lausanne, Switzerland
- [29] A. Sözen, et al. (2001) , Nükleer Yakıt üretimi ve Nükleer Yakıt Dönüşümünde Hızlandırıcı Kaynaklı Sistemle Füzyon –Fisyon (Hibrit) Sistemlerin Karşılaştırılması, *I. Ulusal Parçacık hızlandırıcı ve Uygulamaları Kongresi*, TAEK, Ankara
- [30] M. A. Abdou, et al. (2001), On The Exploration of Innovative Concepts for Fusion Chamber Technology, **Fusion Engineering and Design**, 54, 181-247
- [31] M. A. Abdou, The APEX Team(1999), Exploring Novel High Power Density Concepts for Attractive Fusion Systems, **Fusion Engineering and Design**, 45
- [32] S. Ünal(1998), Rejuvenation of The LWR Spent Fuel in (D-T) Driven Hybrid Reactors, **Fusion Engineering and Design**, 38, 393- 416
- [33] B.Şarer, A. Hançerlioğulları, M. Übeyli (2003), Füzyon Teknolojisinde ilk sıvı duvar yaklaşımı: APEX, *8. Ulusal Nükleer Bilimler ve teknolojiler Kongresi*, Kayseri
- [34] M. A. Abdou (2004), Preface, *Fusion Engineering and Design*, 72, 1-2
- [35] S. Şahin (2004), M. Übeyli, APEX Reactor as A Fusion Breeder, **Energy Conversion and Management**, 45, 1497-1512
- [36] Arasoğlu A. (2004), *Flinabe Blanketli Apex Füzyon Reaktöründe Nötronik Hesaplar*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [37] B. Şarer, et al (2007)., *Three—Dimensional Neutronic Calculations For The Fusion Breeder Apex Reactor*, **Fusion Science And Technology**, 52, 107-115
- [38] R. W. Moir (1997), Liquid First Walls For Magnetic Fusion Energy Configurations, **Nuclear Fusion**, 37, 557-566
- [39] Şarer B. (2005), Apex Füzyon Reaktör Modelinin Monte Carlo Yöntemi Kullanarak Tasarlanması, **G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi**, 18(1): 201-210

- [40] Haçerlioğullari A. (2011), Determining of energy multiplication in the APEX hybrid reactor by using THF₄ and UF₄ heavy metal salts, **International Journal of Energy Research**, 36
- [41] Haçerlioğullari A. (2009), Uf₄ İçeren Eriyik Tuzlu Apex Füzyon Reaktöründe Nötronik Hesaplamalar, *X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi*
- [42] M. A. Abdou, et al. (2005), Overview of Fusion Blanket R&D in The US Over The Last Decade, **Nuclear Engineering and Technology**, 37: 5, 401-422
- [43] M. A. Abdou and The APEX Team(1999), Exploring Novel High Power Density Concepts For Attractive Fusion Systems, **Fusion Engineering and Design**, 45, 145- 167
- [44] M. A. Abdou, et al. (1999), Chapter 1: Overview, **APEX Interim Report**, 1-17
- [45] H. Neilson (2013), Issues and Paths to Magnetic Confinement Fusion Energy, *Symposium on Worldwide Progress Toward Fusion Energy AAAS Annual Meeting*, Boston
- [46] S. M. H. Mirhoseini and F. A. Volpe (2016), Resistive sensor and electromagnetic actuator for feedback stabilization of liquid metal walls in fusion reactors, **Plasma Physics and Controlled Fusion**, 58:12
- [47] M. A. Abdou,et al. (2005), U.S.Plansand Strategy for ITER Blanket Testing, **Fusion Science and Technology**, 47, 475-487
- [48] T. Korkut, A. Haçerlioğulları (2012), *The Evalition of ReactorPerformance by using Flibe and Flinabe Molten Salts in the APEX Hybrid Reactor*, **J. Fusion Energ** 31,151–159
- [48] M. Günay, B. Şarer, Y. Celik (2011), Three-Dimensional Neutronic Calculations for a Fusion Breeder APEX Reactor using some Libraries, **Annals of Nuclear Energy** 38,2757-2761
- [50] S. H. Hong, M. H. Kim (2018), Neutronic investigation of waste transmutation option without partitioning and transmutation in a fusion-fission hybrid system, **Nuclear Engineering and Technology**, 50,1060-1067
- [51] S. Şahin, at el. (2018), Monte Carlo analysis of LWR spent fuel transmutation in a fusion-fission hybrid reactor system, **Nuclear Engineering and Technology**, 50,1339-1348
- [52] K. Kataoka, at el. (1988), Neutronic and thermodynamic feasibility of ²³³UF₆-²³⁷NpF₆ fueled transmutation reactor, **Nuclear Engineering and Design**, 110,99-105

- [53] M. Übeyli (1999), *Nükleer Yakıtlar ve Nötron Madde Etkileşimi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [54] M. Gökçek (2001), *(D,T) Füzyon Nötronlarına Maruz Bırakılan Çeşitli Nüklere Yakıt Ve Malzemelerin Nötronik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [55] P. Rodriguez (1999), Mixed Plutonium-Uranium Carbide Fuel In Fast Breeder Test Reactor, **Bull Mater Sci**, 22,215-220
- [56] A. Chartier (2007), L. V. Brutzel, Modeling Of Point Defects And Gas Incorporation In Uranium Mono-Carbide, **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research**, 225,146-150
- [57] F. Mazaudier(2010), et al., On the Oxidation of (U,Pu)C fuel: Experimental and kinetic aspects practical issues, **Journal of Materials**, 406,277-284
- [58] M. Z. Youssef and M. A. Abdou (2000), Heat Deposition, Damage and Tritium Breeding Characteristics in Thick Liquid Wall Blanket Concepts, **Fusion Engineering and Design**, 49-50, 719-725
- [59] A. Ying, et al. (1999), APEX Interim Report: Chapter 5: Thick Liquid Blanket Concept (pp: 1-172),
- [60] M. Z. Youssef, et al. (2002), The Breeding Potential of “Flibe” and Comparison to “Flibe” in “CLiFF” High Power Density Concept, **Fusion Engineering and Design**, 61-62, 497-503
- [61] M. Günay, B. Şarer, H. Kasap (2014), The effect on radiation damage of structural material in a hybrid system by using a Monte Carlo radiation transport code, **Annals of Nuclear Energy**, 63,157-161
- [62] C. P. C.Wong,et al. (2004), Molten Salt Self-Cooled Solid First Wall and Blanket Design Based On Advanced Ferritic Steel, **Fusion Engineering and Design**, 72,245-275
- [63] R. W. Moir (1996), Liquid wall inertial fusion energy power, **Fusion Engineering and Design**, 32, 93-104
- [64] J. Takeuchi, et al. (2006), 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
- [65] M. Übeyli (2004), On The Tritium Breeding Capability of Flibe, Flibe and $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ in A Fusion-Fission (Hybrid) Reactor, **Journal of Fusion Energy**, 22: 1, 51-57

- [66] H. M. Şahin (2016), et. al., Investigation of tritium breeding ratio using different coolant materialin a fusion-fission hybrid reactor, **International Journal of Hydrogen Energy**, 41, 7069-7075
- [67] M. Übeyli (2004), Neutronic Performance of New Coolants in A Fusion-Fission (Hybrid) Reactor, **Fusion Engineering and Design**, 70, 319-328
- [68] S. Cui, et. al. (2018), Conceptual Designand Comprehensive Optimization Analysis of a Fusion-Fission Hybrid Reactor Water-Cooled Pressure Tube Blanket, **Progress in Nuclear Energy**, 103, 8-19
- [69] S. Şahinand M.Übeyli (2005), Radiation Damage Studies on The First Wall of a HYLIFE-II Type Fusion Breeder, **Energy Conversion and Management**, 46, 3185-3201
- [70] N. B. Morley,et al (1999)., *APEX Interim Report:Chapter7: Thin Liquid Wall Concepts and The CLiFF Design*,
- [71] R. E. Nygren, et al. (2003), A Fusion Chamber Design With A Liquid First Wall and Divertor, *20th Symposium on Fusion Engineering*, San Diego, CA, United States, 14-17 October
- [72] M. Günay, H. Kasap (2014), Neutronic investigation of the application of certainplutonium-mixed fluids in a fusion–fission hybrid reactor, **Annals of Nuclear Energy**, 63, 432-436
- [73] M. Übeyli(2007), Radiation damage on low activation materials used in a hybrid reactor, **Materials & Design**, 28, 1453-1460
- [74] K. Yılmaz (2004), *Apex Hibrit Reaktörlerinde Reaktör Çelik Duvarının Nötron Radyasyonu Altında Yıpranmasının Monte Carlo Metodu Kullanılarak Hesaplanması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [75] T. Muroga (2006), T. Tanaka, A. Sagara, Blanket neutronics of Li/vanadium-alloy andFlibe/vanadium-alloy systems for FFHR, **Fusion Engineering and Design** 81, 1203-1209
- [76] Hançerlioğulları (2006), A. Monte Carlo Metodu ve MCNP Kod Sistemi, **Kastamonu Eğitim Dergisi**, 14, 545-556
- [77] L. Öztürk (2004), Monte-Carlo Simülasyon Metodu Ve Bir İşletme Uygulaması, **Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları**, 16-122
- [78] B. Polat (2015), *Monte Carlo Simülasyon Analizinin Güç Fonksiyonları İle Belirlenmesi Ve Bist-100 Üzerine Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

- [79] F.J.Briesmeister (1993), *RSIC Computer Code Collection MCNP4A, Monte Carlo N Particle Transport Code System*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico
- [80] F.J.Briesmeister(2000), *MCNP–A General Monte Carlo N–Particle Transport Code Manual*, **LA**, 13709, M
- [81] D. B. Pelowitz (2011), *MCNPX User’s Manual, Version 2.7.0*, **LA-UR**, 11-02295
- [82] G. McKinney (2006), 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
- [83] M.B. Chadwick, et al. (2006), *ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology*, **Nuclear Data Sheets**, 107, 2931– 3060
- [84] NEA (2018), https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm, Evaluated, (on-line access on March 2019)
- [85] M. Herman and A. Trkov (2010), *Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII*, **NY**, 11973-5000
- [86] D.A.Brown, et al. (2018), *ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections*, **Nuclear Data Sheets**, 148,1-142
- [87] Cross Section Evaluation Working Group (CSEWG) (2015), <https://www.nndc.bnl.gov/endl/b8.0/>, announces the release of the ENDF/B-VIII.0 (on-line access on April 2019)
- [88] IAEA (1996), *Radiation Safety*, **IAEA Division of Public Information**, 96-00725

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Gökmen ŞEKER

Doğum Yeri ve Tarihi: Bitlis - (02.03.1987)

Adres: Üçbağlar Mahallesi Sivas Caddesi Uyum Apartmanı Battalgazi/Malatya

E-Posta: gokmensek@gmail.com, gkmskr@hotmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi – 2014

Pedagojik Formasyon: İnönü Üniversitesi – 2014

İş Deneyimi:

2009-2014	:Malatya Kent Konseyi Gençlik Meclisi Yürütme Kurulu Üyeliği
2011-2012	:Ulusal Gençlik Parlamentosu Yürütme Kurulu Üyeliği
2014-2015	:Malatya Yeşilyurt Belediyesi Güvenlik Görevlisi
2015-2016	:Malatya Şeker Fabrikası Güvenlik Görevlisi
2016- Devam Etmekte	:Malatya Büyükşehir Belediyesi Büro Personeli

YAYIN LİSTESİ:

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- M. Günay, G. Şeker, "THREE-DIMENSIONAL MONTE CARLO CALCULATION OF SOME NUCLEAR PARAMETERS", EPJ Web of Conferences, Vol. 154 (2017), DOI: 10. 1051/epjconf/201715401026 (EBSCO)

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

- M. Günay, G. Şeker, "THE INVESTIGATION OF RADIATION DAMAGE FOR CERTAIN REACTOR GRADE-PLUTONIUM FLUIDS IN A HYBRID REACTOR", Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), 10-12 May 2017 Cukurova University, Adana, Turkey

- M. Günay, G. Şeker, “*RADIATION DAMAGE COMPARISON FOR THE PLUTONIUM MIXED FLUIDS IN A HYBRID REACTOR*”, Turkish Physical Society 33th International Physics Congress, 6-10 September 2017, Bodrum, Turkey
- M. Günay, G. Şeker, “*THE COMPARISON OF THREE-DIMENSIONAL MONTE CARLO CALCULATION IN SOME NUCLEAR PARAMETERS FOR THE CERTAIN PLUTONIUM MIXED FLUIDS*”, Turkish Physical Society 33th International Physics Congress, 6-10 September 2017, Bodrum, Turkey
- M. Düz, G. Şeker, “*The Effects on Radiation Damage of Some Nuclear Libraries in a Hybrid Reactor*”, Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), 20-22 April 2018 Akdeniz University, Antalya, Turkey
- M. Düz, G. Şeker, “*Investigation of Neutronic Calculations in Uranium and Minor Actinide Doped Fluids of a Hybrid Reactor Using Monte Carlo Method*”, Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), 20-22 April 2018 Akdeniz University, Antalya, Turkey

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR / SUNUMLAR

- M. Düz, G. Şeker, “*Calculation Neutron Flux of Uranium and Minor Actinide Doped Fluids in a Hybrid Reactor*”, Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), 2-4 May 2019 Amasya University, Amasya, Turkey
- M. Düz, G. Şeker, “*The Effects on Radiation Damage of Some Nuclear Libraries in a Hybrid Reactor*”, Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), 2-4 May 2019 Amasya University, Amasya, Turkey