



**BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FARKLI  
SOĞUTUCULARIN TRİTYUM ÜRETİMİNE  
ETKİSİNİN NÖTRONİK İNCELENMESİ**

**Bilge MENGÜLLÜOĞLU**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN**

**BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FARKLI SOĞUTUCULARIN TRİTYUM  
ÜRETİMİNE ETKİSİNİN NÖTRONİK İNCELENMESİ**

**Bilge MENGÜLLÜOĞLU**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN**

**KARABÜK  
Ağustos 2022**

Bilge MENGÜLLÜOĞLU tarafından hazırlanan “BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FARKLI SOĞUTUCULARIN TRİTYUM ÜRETİMİNE ETKİSİNİN NÖTRONİK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/08/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Güven TUNÇ (ERÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Bilge MENGÜLLÜOĞLU

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FARKLI SOĞUTUCULARIN TRİTYUM ÜRETİMİNE ETKİSİNİN NÖTRONİK İNCELENMESİ

Bilge MENGÜLLÜOĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

Ağustos 2019, 56 sayfa

Bu tez çalışmasında, bir füzyon reaktöründe farklı soğutucuların trityum üretimine etkisinin nötronik incelenmesi amacıyla beş farklı soğutucu seçilmiştir. Bu amaçla, Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktörün (ITER) parametrelerine bağlı kalınarak bir manyetik füzyon manto yapısı belirlenmiştir. Bu füzyon manto yapısında soğutucu malzemeler; florür erimiş tuz malzemeleri (FLiBe, FLiNaBe, FLiPb) ile LiF, doğal Li ve zenginleştirilmiş Lityumdur. Manto yapısında trityum üretim malzemesi olarak ise Lityum oksit ( $\text{LiO}_2$ ) ele alınmıştır. Nötronik analizler MCNP5 bilgisayar programı ve EDNF/B-V ve EDNF/B-VI nükleer veri kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır. Bu manto yapısına yerleştirilen soğutucuların trityum üretim oranı (TBR)'ları karşılatırılmıştır. En iyi performansı doğal Li soğutucusunda TBR = 1.6 değeri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** ITER, Birinci duvar malzemesi, Malzeme hasarı, Tritiyum üretim oranı, Florür ailesi, Erimiş tuz malzemeleri.

**Bilim Kodu :** 92805

## **ABSTRACT**

**Master Thesis**

### **NEUTRONIC INVESTIGATION OF EFFECT ON TRITIUM BREEDING OF DIFFERENT COOLANT IN A FUSION REACTOR**

**Bilge MENGÜLLÜOĞLU**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
The Department of Energy Systems Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN**

**August 2022, 56 pages**

In this thesis, five different coolants were selected in order to investigate the effects of different coolants on tritium breeding in a fusion reactor. For this purpose, a magnetic fusion blanket structure was determined by regarding to the parameters of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Coolant materials in this fusion blanket structure are fluoride molten salt materials (FLiBe, FLiNaBe, FLiPb) and LiF, natural Li and enrichment Lithium. Lithium oxide (LiO<sub>2</sub>) is considered as the tritium production material in the blanket structure. Neutronic analyzes were performed using the MCNP5 computer program and the EDNF/B-V and EDNF/B-VI nuclear data libraries. The tritium breeding ratio (TBR) of the coolants placed in this mantle structure was compared. The best performance was obtained in the natural Li coolant with TBR = 1.6 values.

**Key Words** : ITER, First wall material, Material damage, Tritium breeding ratio,  
Fluorides family molten salt materials.

**Science Code** : 92805



## **TEŐEKKÖR**

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam danıőmanım olan Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN'e teőekkörü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	7
FÜZYON TEKNOLOJİSİ .....	7
2.1. FÜZYON.....	7
2.2. FÜZYON YAKITLARI .....	7
2.2.1. Döteryum .....	7
2.2.2. Trityum .....	8
2.3. FÜZYON REAKSİYONLARI .....	9
2.3.1. Temel Füzyon Reaksiyonları .....	10
2.3.2. Döteryum-Döteryum (D-D) Reaksiyonları .....	10
2.3.3. Döteryum-Trityum (D-T) Reaksiyonları .....	11
2.4. FÜZYON REAKTÖRLERİNİN GERÇEKLEŞMESİ İÇİN GEREKENLER.....	12
2.4.1. Sıcaklık .....	12
2.4.2. Yoğunluk .....	13
2.4.3. Zaman .....	13
2.5. FÜZYON REAKTÖRLERİNDE MANYETİK SINIRLANDIRMA .....	14
2.5.1. Düzgün Eksenli.....	14
2.5.2. Tokamak .....	14
2.5.3. Manyetik Aynalar .....	15

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.6. MANYETİK FÜZYON REAKTÖRÜNÜN MANTO YAPISI .....	15
2.6.1. Yakıt Bölgesi .....	16
2.6.2. İlk Duvar Bölgesi.....	16
2.6.3. Soğutucu Bölgesi .....	17
2.6.4. Yansıtıcı Bölgesi.....	17
2.6.5. Yalıtım Bölgesi.....	17
2.6.6. Boşluk Bölgesi.....	17
2.6.7. Mıknatıs Bölgesi.....	17
2.7. SOĞUTUCULAR VE ÖZELLİKLERİ .....	18
2.7.1. Erime Noktası .....	18
2.7.2. Buhar Basıncı ve Türleri.....	19
2.7.3. Yoğunluk .....	22
2.7.4. Viskozite .....	23
2.7.5. Termal İletkenlik .....	28
2.7.6. Isı Kapasitesi.....	29
BÖLÜM 3 .....	32
METOT .....	32
3.1. NÖTRONİK HESAPLAMALAR İÇİN GEOMETRİK MODELİN AÇIKLANMASI.....	32
3.2. HESAPLAMA METODU .....	36
3.2.1. Monte Carlo Hesaplama Yöntemi .....	36
3.2.2. MNCP (Monte Carlo N-Parçacık Taşıma Kodu).....	37
BÖLÜM 4 .....	42
HESAP SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	42
BÖLÜM 5 .....	51
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Tokamak resmi. ....	15
Şekil 2.2. 900°C’ de alkali florür BeF <sub>2</sub> buhar basıncı eğilimleri .....	21
Şekil 2.3. 900°C’ de alkali florür ZrF <sub>4</sub> buhar basıncı eğilimleri.....	21
Şekil 2.4. Karışım tuzların viskozite aralığı.....	24
Şekil 2.5. BeF <sub>2</sub> bileşiminin 600°C’de LiF <sub>2</sub> karışımlarının viskozite üzerine etkisi... ..	24
Şekil 2.6. BeF <sub>2</sub> tuzlarının alkali bileşiminin viskozite üzerine etkisi .....	25
Şekil 2.7. ZrF <sub>4</sub> karışımının viskozite üzerindeki etkisi .....	25
Şekil 2.8. LiF- NaF-KF ötektif viskozitesi için ölçülen değerlerin karşılaştırılması. .	27
Şekil 2.9. NaF- ZrF <sub>4</sub> , %50-50 mol viskozitesi için ölçülen değerlerin karşılaştırılması .....	27
Şekil 3.1. Manyetik füzyon reaktörünün manto yapısı .....	34
Şekil 4.1. Li-6 ve Li-7 için trityum reaksiyonu tesir kesitleri.....	42
Şekil 4.2. Berilyum (Be) ve Kurşun (Pb) için nötron çoğaltma tesir kesitleri. ....	43
Şekil 4.3. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak FLiBe için TBR değişimi (Soğutcu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir). .....	44
Şekil 4.4. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak FLiPb için TBR değişimi (Soğutcu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir). .....	45
Şekil 4.5. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak FLiNaBe için TBR değişimi (Soğutcu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).....	46
Şekil 4.6. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak LiF için TBR değişimi (Soğutcu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).....	47
Şekil 4.7. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak doğal Li için TBR değişimi (Soğutcu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir). .....	48
Şekil 4.8. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak zenginleştirilmiş Li için TBR değişimi (soğutcu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir). ....	49
Şekil 4.9. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak tüm soğutucular için TBR değişimi.....	50

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Füzyon reaksiyonları.....	10
Çizelge 2.2. Tuz bileşimleri ve ötektif sıcaklıkları. ....	19
Çizelge 2.3. Tuz bileşiklerinin erime ve kaynama noktaları.....	20
Çizelge 2.4. Tuzların yoğunluk denklemleri.....	22
Çizelge 2.5. Karışım yoğunluğunda kullanılan standart molar hacimler.....	23
Çizelge 2.6. Florür tuzlarının ölçülen termal iletkenliklerinin karşılaştırılması. ....	29
Çizelge 2.7. Tuzların ısı kapasiteleri.....	30
Çizelge 2.8. Tuz karışımlarının deneysel olarak ölçülen ve özgül ısı kapasite değerleri.....	30
Çizelge 3.1. Battaniye malzemelerinin atomik yoğunlukları.....	34
Çizelge 3.2. Birinci duvar malzemesinin atomik yoğunlukları.....	35
Çizelge 3.3. Aday soğutucu malzemelerinin atomik yoğunlukları.....	36
Çizelge 3.4. Yüzey denklemleri.....	39
Çizelge 3.5. Tally sembolleri ve açıklamaları.....	40
Çizelge 3.6. Program durdurma kartları.....	41

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

### SİMGELER

Kg	: Kilogram
M	: Kütle
A	: Çekirdeğin atomik kütlesi
N	: Çekirdeğin nötron sayısı
Z	: Çekirdeğin kütle numarası
r	: Çekirdeğin yarıçapı
p	: Proton
n	: Nötron
d	: Döteryum
$\gamma$	: Gama Işınımı
eV	: Elektron volt
KeV	: Kilo elektron volt
MeV	: Mega elektron volt
$\Delta$	: Kütle Eksikliği
$M_p$	: Proton Kütlesi
$M_n$	: Nötron Kütlesi
$M_A$	: Çekirdeğin Kütlesi
B	: Bağlanma Enerjisi
$S_n$	: Nötron Ayırma Enerjisi
$S_p$	: Proton Ayırma Enerjisi
c	: Işık Hızı
N	: Atomik yoğunluk
$\rho$	: Malzeme yoğunluğu
$N_a$	: Avagadro sayısı
$k_\infty$	: Sonsuz ortam çoğaltma faktörü
$k_{eff}$	: Etkin çoğaltma faktörü

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünya’da enerji ülkelerin üstünlük kurmada birbirlerine kullanacağı önemli unsurlardan biridir. Bulduğumuz çağda teknolojik yenilikler ve iletişimdeki yeni gelişmeler dünyadaki enerji kullanımını ve hızını arttırmıştır.

Dünyada ucuz, bol ve temiz enerji kaynaklarına tüm ülkeler ihtiyaç duymaktadır. Hızla gelişmekte olan endüstride buhar gücüyle elektrik enerjisi kullanılmış ve elektrik üretiminde petrol kullanımında hızlı artış olmuştur. Fosil yakıtlar endüstride kullanılan en önemli hammaddedir. Günümüzde dünyadaki enerji ihtiyacının büyük kısmını fosil yakıt rezervleri karşılamaktadır. Temel enerji kaynağı olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) bütün ülkelerde kullanılmaktadır. Enerji üretiminde Hidroelektrik santrallere uygun coğrafi koşullar sağlanmalıdır.

Nükleer teknolojilerle araştırılan, diğer enerji kaynaklarından daha yoğun var olan nükleer enerji kullanılmaya başlanılmıştır. Günümüzde teknoloji gün geçtikçe ilerlemekte ve nükleer enerjinin de uzay çalışmalarında katkısı oldukça önem taşımaktadır [1].

Dünya enerji ihtiyacının yaklaşık %5’ni karşılayan nükleer enerji kaynakları her ne kadar yenilenemez ve tükenebilir (ancak binlerce yıl yetecek yakıt rezervleri var) enerjiler olsalarda en önemli özelliği çevreye sıfır emisyon veren temiz enerji sınıfına girmektedir. Uranyum 5000 yıl Toryum 15000 yıllık rezervlere sahiptir. Nükleer enerjinin en önemli vasfının, yüksek teknolojinin lokomotifi olmasıdır. Füzyon teknolojisine dayalı nükleer enerji kaynakları ise temiz ve tükenmez enerji kaynağına sahiptir. Füzyon enerjisinin temeli döteryum ve trityum yakıtlarının birleşme esasına dayalı bir teknolojidir. Füzyon için denizlerde “döteryum yakıtı” ve ay yüzeyinde “<sup>3</sup>He yakıtı” yüz binlerce yıllık; güneş sistemindeki büyük gezegenlerde, jüpiter, satürn,

uranüs, neptün'de “<sup>3</sup>he yakıtı” yüz milyonlarca yıllık füzyon yakıtı mevcuttur. 1 varil tabii deniz suyu içindeki ağır hidrojen (döteryum), 300 varil benzine eşdeğer füzyon enerjisi verir. Dünya genelinde fisyon temelinde ~ 60 yıldır elektrik üretmekte. Füzyon temelinde çalışmalar hızla ilerlemektedir [2].

Bugün dünyada 32 ülkede toplam 448 adet nükleer santral yılda 2553 milyar kWh elektrik üretmektedir. Türkiye'nin tüm varlıklarından üretilen elektrik 305 milyar kWh'dır. Yani Türkiye'nin 8,5 katı dünyada sadece nükleer enerji ile üretilmektedir. ABD de 98 adet %20 pay (789.9 kWh/305 kWh = Türkiye'nin ~2,5 katı), Fransa 58 adet %70 pay (338.8 kWh/305kWh = Türkiye'nin ~1,1 katı), Japonya, Rusya, G. Kore, Kanada, Çin, İngiltere, İsveç, İsviçre, Almanya, İspanya, Ukrayna, Finlandiya, Hindistan gibi ülkeleri sayabiliriz. Dünya'nın en temiz ülkelerinden sayılan İsveç'te %30 (7 adet nükleer santral var), İsviçre'de %33 (4 adet)'dir. Dünyada 100'lerce nükleer denizaltılar, uçak gemileri de vardır. Özellikle ileri teknolojinin lokomotifi olan nükleer enerji alanında ülkemiz maalesef sıfır seviyesinde iken, OECD ülkelerinde nükleer enerjiden faydalanma oranı %9 seviyesindedir [3].

Fisyon ve füzyon ile iki yolla nükleer reaksiyonlardan enerji üretilir. Fisyon reaksiyonlarında, % 3-5 oranında zenginleştirilmiş <sup>235</sup>U ve % 97-95 oranında <sup>238</sup>U içeren (LWR) ya da % 0.7 <sup>235</sup>U ve % 99.3 oranında <sup>238</sup>U içeren (CANDU) bulunduran doğal yakıt malzemeleri kullanılmaktadır. Hafif su reaktörlerinin oranları ortalama %65'dir. Bu reaktörler uranyum yakıtının %1'ni kullanıp, %99'nu kullanmayan, büyük oranda radyoaktif atık bırakmaktadırlar. Bu yüzden dünyada nükleer enerji üretiminde zenginleştirilmiş nükleer yakıt bakımından bir sıkıntı beklenmektedir. Hafif su reaktörleri fisyon teknolojisini içerir. Hafif su reaktörlerinin kaynağı termal nötronlardır. Bu nötronlar yakıt içinde var olan fisil izotoplarla dağılıp enerji üretilmektedir [4]. Hafif su reaktörlerinin kullandıkları yakıt bakımından dış bağımlılığa neden olurlar. Bu reaktörlerin kazanları, sıcaklık (350 °C) ve basınca (150 atm.) dayanmaları gerekmektedir. Öte yandan CANDU reaktörlerinin kazan cidarı 2,5 cm kalınlıkta ve 90 °C sıcaklıktaki saçtan yapılmıştır [5].

Fisyon ve füzyon reaksiyonlarının beraber olduğu sistemlere Hibrid Reaktör denir. Hafif çekirdeklerin birleşmesi (füzyon) sonucunda nötron açığa çıkar, nötron büyük



bir enerjiye sahiptir. Nötron yakıtı fertil izotopları, ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) fisyonu uğrarlar ve ayrıca çok önemli nükleer yakıtlar ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ) elde edilmektedir.  $^2\text{D}$  (Döteryum) ve  $^3\text{T}$  (Tritiyum) izotopları füzyon reaktörlerinde bulunan temel yakıtlardır. Yeni reaktör modeli olan fisyon-füzyon reaksiyonlarını birleştiren hibrit reaktörü geliştirilmiştir.

Hibrid Reaktörlerinde katalize edilmiş, (D,D) ve (D,T) reaksiyonları kullanılmaktadır. Döteryum doğada ağır su olarak bulunurken, Tritiyum yapay bir yakıttır. Bu nedenle füzyon reaksiyonunun kendi kendine yetebilmesi için Hibrid Reaktör mantosu içinde Tritiyum üretimi de yapılmalıdır. Bu maksatla kullanılacak soğutucu hem ısı transferi sağlarken hem de Tritiyum üretimine katkı vermelidir. Hibrid reaktörlerde Füzyon sonucu açığa çıkan yüksek enerjili nötronlar manto içerisine yerleştirilen fisil veya fertil yakıtları yüksek oranda yakarlar veya yeni fisil yakıtlara dönüştürürler. Şahin ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada; Fisyon reaktöründe,  $^{239}\text{Pu}$  LWR'de fisil yakıt eldesinde nükleer yakıtı güçlendirmek için işlemlere ek alternatifler sunulmuştur. Kullanılmış olan doğal uranyum, fisil yakıt bölgesinde ısı transferini korumak amacıyla, helyum ve flibe soğutucuları seçilmiştir. Fisil yakıt üretiminde soğutucunun helyum kullanılması, flibe ye oranla daha iyi performans sağlamıştır.

Hafif su reaktörlerinde kullanılan nükleer yakıtı yeniden kullanıma getirmek yani yenileştirilmesi için katalize olmuş (D,D) füzyon sürücülü hibrid reaktörler öğrenilmiştir. Yenileştirilme periyotları aylara göre ölçülüp, çalışma sonunda fisil yakıt canlandırma işlemleri sırasıyla %3, %3.5, %4 ve %4.5 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan soğutucunun helyum olması iyi sonuçların doğmasına sebep olmuştur.

Yapıcı ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada; D,T füzyon bir hibrid blanketinde periyot süresi boyunca fisil yakıtın nötronik verimleri araştırılmıştır.  $\text{ThF}_4$  (Toryum Tetra Florid) gaz, lityum ve flibe kullanılmıştır. Fisyon ve hibrit reaktörleri teknolojik olarak  $^{238}\text{U}$  üretimleri ve yanma oranları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak hava, lityum ve flibe blanket karşılaştırılmıştır.

Şahin ve Yapıcı tarafından yapılan çalışmada ise yapay olmayan yakıtlarda, fisil yakıt üretimleri incelenmiştir. Hibrit reaktörlerin içeriğinde  $\text{UO}_2$  ve LWR kullanılmış

nükleer yakıtlar araştırılmıştır. Fisil yakıtlar haricinde nükleer ısı transferini için 4 farklı soğutucu kullanılmıştır. Bunlar helyum, flibe, doğal trityum, ötektik trityumdur ( $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ ). Soğutucu tiplerine göre çalışma periyodları 12-24 ayları arasında incelenmiş ve fisil yakıt yenileştirilme oranı %3-4 değerleri arasında hesaplanmıştır.

$\text{ThC}_2$  ve  $\text{ThF}_4$  yakıtlarında hibrid reaktörde trityum üretimi ve CFFE değerleri incelenmiştir. Reaktörde flibe ve doğal lityum yakıtları için soğutucu olarak gaz ( $\text{He}$  ya da  $\text{CO}_2$ ) kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda flibe, doğal lityuma göre daha iyi performans göstermiştir. Soğutucu blankette doğal lityumun trityum üretim oranı 1.05' den büyük olduğu tespit edilmiştir.

LWR de D,T fisyon-füzyon (hibrid) reaktörlerde yakıt üretimi incelenmiştir. 3 farklı çözüme ulaşılmıştır.  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  ile %10  $\text{UO}_2$  ve  $\text{ThO}_2$  ile %10 LWR' den üretilen harcanmış yakıt karışımları elde edilmiştir. Flibe soğutucunun nötronik değeri heyuma göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir [6].

D,T füzyon nötronları verimleri nükleer reaktörlerde farklı moderatörlerde kullanılmıştır.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , C, Be, Pb,  $\text{BeF}_2$ , B, Al, Na, Li, LiF, LiH ve Flibe moderatör malzemeleri kullanılmıştır. Moderatör sonucunda Flibe,  $\text{H}_2\text{O}$ , LiH ve LiF malzemelerinin kötü performans gösterdiği, Li, LiF,  $\text{D}_2\text{O}$  ve Flibe'nin füzyon odası soğutulma da iyi soğutucular olduğu belirlenmiştir. Li, LiF ve Flibe'nin trityum üretimi bakımından iyi performans sergilediği belirtilmiştir.

Catalán ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, DEMO füzyon reaktörü  $\text{He}/\text{LiPb}$  soğutucularının trityum üretim performansı incelenmiş başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar soğutucuların performansını sürdürülebilir trityum üretimi için yeterli seviyededir. Elde edilen avantajlara rağmen, He gazının ısıl kapasitesinin düşük olması ve ısının sorunsuz bir şekilde iletilebilmesi için yüksek basınç ve sıcaklıkta reaktörün işletilmesini ve reaktörün güvenliği için fazladan önlemler gereklidir [7].

Şahin ve arkadaşları çalışmalarında,  $\text{Li}_2\text{C}_2$  trityum üretim materyali ile  $\text{FLiBe}$ ,  $\text{FLiNaK}$ , Li ve  $\text{LiPb}$  soğutucuları birlikte kullanılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen

sonuçlarda, bütün soğutucuların trityum üretimi için yeterli performansa olmasına rağmen FLiBe ve FLiNaK trityum üretiminde diğer soğutuculara kıyasla daha düşük performans elde edilmiştir [8].

Übeyli yapmış olduğu çalışmada, füzyon-fisyon hibrit reaktöründe FLiBe, FLiNaBe ve LiSn soğutucularının trityum üretim performansları incelenmiştir. Çalışma sonucunda, FLiBe en iyi trityum üretim performansına sahip olduğunu ispatlamıştır [9].

Zandi ve arkadaşları çalışmalarında, ITER reaktörünün manto simülasyonu ve trityum üretim oranını hesaplanmıştır. He'un soğutucu olarak kullanıldığı reaktörde, trityum üretim oranı reaktörün kendi kendine sürdürebilmesi için yeterli olmuş ve hesaplamalar MCNPX kodu kullanılarak yapılmıştır [10].

Ishibashi ve arkadaşları, ITER reaktör modülünde yapmış oldukları çalışmada farklı soğutuculara göre trityum üretim oranları hesaplanmıştır [11].

Sato ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, zırh malzemelerinin füzyon reaktör mantosunda trityum üretimine oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Zırh malzemeleri kullanılmaksızın en iyi trityum üretim oranı elde edilmiş olursa da, nötron çoğaltıcı malzemelerle zırh malzemesinin trityum üretimindeki olumsuz etkisi ortadan kaldırılabilmektedir [12].

Şahin ve arkadaşları çalışmalarında, VISTA uzay aracı için 17500 MW füzyon gücüne kadar kullanımı elverişli olan mıknatıs ve zırhlama tasarımı yapılmıştır [13].

H. M. Şahin, üç farklı nükleer veri kütüphanesini kullanarak MCNP kodunu kullanarak bir füzyon (hybrid) reaktördeki farklı birinci duvar malzemelerinin radyasyon hasarı hesaplamalarını yapmıştır. Radyasyon hasarı parametreleri nötron spektrumu, atom başına yer değiştirme (DPA), gaz üretimi (H ve He) ve nükleer ısı olarak belirlenmiştir. İlk cidar malzemesi olarak ferritik / martensitik çelik, vanadyum alaşımı, silikon karbür ve bakır alaşımı, yakıt olarak UO<sub>2</sub>, soğutucu olarak doğal lityum ve trityum üretim malzemesi olarak Li<sub>2</sub>O seçilmiştir. Sonuç olarak, tüm ilk duvar yapısı malzeme tasarımları gerekli minimum trityum üretim değerini karşılamıştır. Radyasyon hasarı

nedeniyle tüm ilk duvar malzemelerinin 3,2 ile 3,6 yıl arasında değiştirilmesi gerektiği görülmüştür. TBR değeri açısından vanadyum alaşımı en iyi sonuçları verdi. Aynı zamanda, radyasyon hasarı açısından bakır alaşımı en iyi sonuçları verdi [14].

H. M. Şahin, ve ark. zenginleştirilmiş lityum soğutucuyu farklı nükleer veri kitaplıkları kullanarak MCNP koduyla analiz etti. Bu çalışmada, yakıt olarak UO<sub>2</sub>, trityum üretimi olarak Li<sub>2</sub>O ve ilk duvar malzemesi olarak paslanmaz çelik içeren bir hibrit reaktörü incelediler. Lityum soğutucuyu% 10'dan% 90'a kadar zenginleştirdiler. Trityum üretim değeri, zenginleştirme oranıyla doğru orantılı olarak arttı. Ek olarak, zenginleştirme oranındaki artışın atom başına yer değiştirme (DPA) değerini düşürdüğü ve ilk duvar ömrünü 3,5 yıla çıkardığı gösterilmiştir [15].

Bu tez çalışmasında bir füzyon reaktörünü çevreleyen birinci duvar, soğutucu, trityum üretim bölgesi ve mıknatısların olduğu reaktör mantosu üç boyutlu nötron transport denklemlerini Monte Carlo yöntemi ile çözen MCNP bilgisayar kodu yardımıyla nötronik olarak incelenecektir. Bu amaçla, füzyon reaktörlerin analizlerini yapmak için bir ara yüz bilgisayar program kullanılacak ve geliştirilecektir. Bu program izotopların her zaman aralığında MCNP çıktı dosyasını okuyarak yeni atomik yoğunlukları hesaplayıp MCNP koduna girdi olarak vermektedir. Bu nötronik hesaplamalar; Li içeren farklı ergimiş tuzlardan oluşan soğutucuların yeterli trityum üretimine (TBR) katkısı, yakıttaki izotop değişimlerini içermektedir. Böylece yeni parametrelerle analizler yapılarak literature katkı sağlanacaktır.

## BÖLÜM 2

### FÜZYON TEKNOLOJİSİ

#### 2.1. FÜZYON

Füzyon, iki hafif bir atom çekirdeğini birleştirerek, daha ağır bir çekirdek ve enerji çıkmasına denir. Ortaya çıkan enerjiyi kullanmak için tasarlanan cihazlara füzyon reaktörleri denir. Füzyon, güneşin enerji kaynağıdır. Füzyondan enerji üretmek, güneşte olduğundan daha da zordur. Buradaki ısı ve basınç enerji elde etmek için atomların çekirdeklerini sıkıştırılarak daha da ağır çekirdeklere dönüştürür.

Füzyon enerjisi; hafif çekirdeklerin bol miktarda bulunmaları, kolay ve ucuz elde edilebilmeleri, füzyon ürünlerinin hemen hepsinin hafif çekirdek olmaları, radyoaktif çekirdeklerden daha kararlı olmaları, saklama ve depolama koşullarının maliyetlerinin olmaması en önemli avantajlarındanır.

#### 2.2. FÜZYON YAKITLARI

##### 2.2.1. Döteryum

Döteryum hidrojenin izotop türlerinden biridir ve D sembolüyle ifade edilir. Kütleli protonun iki katı olduğundan genellikle ağır hidrojen olarak bilinmektedir. Döteryum çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Döteryum, hidrojenin kararlı bir izotopudur. Hidrojenin doğal kaynaklı bileşiklerinde bulunur. Döteryum kimyasal olarak hidrojene çok benzediğinden dolayı tepkimeye girdiği reaksiyonlarda tamamen değişebilir. Bazı kimyasal reaksiyonlarda hidrojen yerine kullanılabilir ve hidrojenden farklı bir özellik gösterebilir. Döteryum izotopu bir proton, bir nötrondan oluşur, hidrojenden farklı yapısındaki nötron sayısının bir fazla olmasıdır. 2,014 gram atom ağırlığı olduğu bilinmektedir. Döteryum izotopu 1931 yılında ABD'de Harold C. Urey, Ferdinand Brickwedde ve George Murphy tarafından keşfedilmiştir.

Hidrojen, döteryum ve trityumun yapısında farklı sayılarda proton ve nötron bulundurmasından dolayı farklı kimyasal özelliklere sahiptir. Yıldız cisimlerinde bulunan döteryum, ortaya çıktığında hızla kaldırıldığından dolayı, yıldız cisimlerindeki döteryum miktarını incelemek bir o kadar da zordur.

Bazı bilimsel araştırmalarda döteryum izotopundan meydana gelen atomların çoğunun doğal olan evren yapısına sebep olan Big Bang teorisinden kaynaklandığını düşünmektedir. Bunun ana nedeni Jüpiter’de döteryumun olduğunu düşünülmesidir. Döteryum izotopu hidrojenle birleştirilmesiyle doğal olarak elde edilir. Döteryum izotopu radyoaktif özelliklerden oldukça yoksundur fakat doğada oldukça kararlı bir yapıya sahiptir. Döteryumu oksijenle birleştirilirse toksik bir çeşit meydana gelir, bunun sebebi kimyasal özelliğinin hidrojene benzer olmasından kaynaklanır. Döteryum izotopunun bir diğeri özelliğii kaynama noktası, buharlaşma ısısı ve yoğunluk gibi fiziksel özellikleri hidrojene oranla daha büyüktür bunun nedeni, döteryum atomları yüksek sıcaklıklarda nükleer füzyona tabi olmasıyla büyük miktarlarda enerji açığa çıkmasıdır.

Füzyon enerjisi yakıt olarak döteryumu kullanır ve deniz suyundaki döteryum miktarı çok fazladır. Deniz suyunun % 99.98’i hidrojen (H), % 0.02’si döteryum (D) içerir [16]. Füzyon enerjisinin sınırsız enerji kaynağı olan potansiyeli çok yüksektir. Pek çok bilim insanı, bu enerjinin tıpkı güneş enerjisi gibi gelecekte bir enerji kaynağı olacağına inanmaktadırlar.

### 2.2.2. Trityum

Trityum hidrojenin izotopu olarak bilinir T sembolüyle gösterilir. Trityum izotopu 3 parçacıktan; bir proton, iki nötrondan oluşur ve çekirdeğine Triton denir. Trityumun atom numarası 1, kütlesi 3,016 gramdır. Trityum 12,3 yıllık bir yarılanma ömrüyle bozular. Trityumun  $3\text{He}$  ve bir beta parçacığına çözünmesiyle 18 keV enerji açığa çıkar.



Trityum izotopu radyoaktiftir. Doğada bulunmaz, yapay olarak elde edilir. Trityum, değerli ve oldukça tehlikeli bir maldzemedir. 12,3 yıllık yarı ömürle elde edilmesi ve bozunumu zor olduğundan, tükettiğimiz kadarını da üretmeliyiz. Tehlikeli olduğu için tükettiğimizden çok daha fazlasını üretmemeliyiz. Yani bir D-T füzyon reaksiyonunda tüketilen her trityum için, battaniyede bir trityum üretmeliyiz. Bu nedenle, füzyon battaniyemiz bir trityum üretim materyali de içermelidir. Uygulanabilir tek seçenek, doğal olarak % 92,5  ${}^7\text{Li}$  ve % 7,5  ${}^6\text{Li}$ 'den oluşan lityumdur. Her iki izotop da trityum üretir, ancak  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ 'den çok daha fazlasını doğurur.

Lityum Zenginleştirme: Doğal lityum % 92,5  ${}^7\text{Li}$  ve % 7,5  ${}^6\text{Li}$ 'dir (atomik dağılım). Bu nedenle, saf füzyon reaktörleri lityumu doğal bollukların neredeyse tersine çevrilmesi olan % 90  ${}^6\text{Li}$ 'ye kadar zenginleştirir. Füzyon reaktörlerinde  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ 'ye tercih edilir. Fusion reactor battaniyesinde her iki izotop için reaksiyonlar aşağıda verilmektedir.



1934 yılında Mark Oliphant ve Paul Harteck döteryumdan trityum ürettiler fakat trityumun izole edemediler. Trityumun radyoaktif olduğunu Luis Alvarez ve Robert Cornog farketti ve izole ettiler. Trityumun üreten ilk kişi Ernest Rutherford'dur.

Nötronlar başka bir atomla etkileşime girdiğinde güçlü bir nükleer güç üretir, bu nedenle kimyasal reaksiyonlarda trityum diğer izotoplardan farklı özellikler gösterir.

### 2.3. FÜZYON REAKSİYONLARI

Hafif çekirdeklerin birleşmesi sonucu füzyon reaksiyonları meydana gelir. Füzyon reaktör yakıtları D, T, He, Li, B, çekirdeklerini içermektedir. Füzyon reaktörlerinde açığa çıkan enerji tabloda belirtilmektedir.

Çizelge 2.1. Füzyon reaksiyonları.

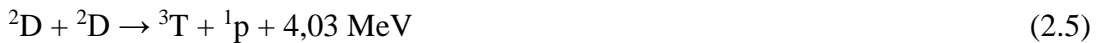
İsim	Füzyon reaksiyonu	Enerji
DT	$D + D \rightarrow He^4(3.5MeV) + {}^1n(14.1MeV)$	17,6 MeV
DDp	$D + D \rightarrow {}^1p(3.02MeV) + T(1.01MeV)$	4,03 MeV
DDn	${}^2D + {}^2D \rightarrow He^3(0.82MeV) + {}^1n(2.45MeV)$	3,27 MeV
TT	$T + T \rightarrow {}^1_0n + {}^1_0n + {}^4_2He$	11,3 MeV
D- ${}^3He$	$D + {}^3_2He \rightarrow He^4(3.6MeV) + {}^1p(14.7MeV)$	18,3 MeV
p- ${}^6Li$	$p + {}^6_3Li \rightarrow {}^4_2He + {}^3_2He$	4,02 MeV
p- ${}^{11}B$	$p + {}^{11}_5B \rightarrow 3({}^4_2He)$	8,68 MeV
Tritiyum üretimi için reaksiyonlar (7,5% ${}^6Li$ , 92,5% ${}^7Li$ )		
n- ${}^6Li$	${}^6_3Li + {}^1_0n \rightarrow T + {}^4_2He + 4.8MeV$	4,78 MeV
n- ${}^7Li$	${}^7_3Li + {}^1_0n \rightarrow {}^3T + {}^4_2He + {}^1_0n - 2.467MeV$	-2,74 MeV

### 2.3.1. Temel Füzyon Reaksiyonları

$1 H + 1 H \rightarrow 2 He$  ( $Q = 1,44 MeV$ )  $2He$ 'nin kararsız olmasından dolayı bu reaksiyon gerçekleşmesi imkansızdır. Döteryum-döteryum, döteryum-trityum reaksiyonları gerçekleşmesi mümkün olan reaksiyonlardır.

### 2.3.2. Döteryum-Döteryum (D-D) Reaksiyonları

Döteryum  ${}^2D$  sembolüyle ifade edilir. İki tane döteryum çekirdeğinin tepkimesi sonucu meydana gelen füzyon reaksiyonları;



Döteryum-döteryum reaksiyonları olarak ifade edilmektedir.



### 2.3.3. Döteryum-Trityum (D-T) Reaksiyonları

Trityum, bir proton iki nötrondan meydana gelen hidrojenin izotopuna denir. Trityum,  $^3\text{T}$  sembolüyle ifade edilir. Döteryum ve trityum tepkimesi sonucu meydana gelen füzyon reaksiyonu;



Döteryum-trityum reaksiyonu olarak adlandırılır. Reaksiyon sonucunda toplam enerji 17,6 MeV'lik enerji ortaya çıkar, bu enerji n ve  $^4\text{He}$ 'a paylaşılır. Nötron reaksiyon sonucunda yakalşık olarak 14,1 MeV'lik enerjiye sahiptir. Füzyon reaktörlerinde bu reaksiyon hızlı nötron kaynağı bilinmektedir.

### 2.3.4. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması



D-T reaksiyonunda açığa çıkan enerji;

$$Q = m \times c^2 \quad (2.8)$$

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

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

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

D-T reaksiyonundaki yaklaşık enerji 17,6 MeV'lik füzyon enerjisi;

$$E_n = Q \times [m(n) / ((m(n) + m(\text{He})))] \quad (2.9)$$

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

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

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

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

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

D-T füzyon reaksiyonlarında meydana gelen 14,04 MeV'lik yüksek enerjili füzyon nötronlarına aittir. Füzyon reaksiyonundaki enerji miktarı nötronların 2 MeV'lik enerjisinin ortalama olarak 7 katına denk gelir. Füzyon reaksiyonu sonucu meydana gelen füzyon nötronlarını oluşturan manyetik alanda tutmak imkansızdır. Yüksek enerjili nötronları manyetik alan içinde hapsedmek için plazmanın nötron tutan maddeyle çevrilmesi gerekir.

## **2.4. FÜZYON REAKTÖRLERİNİN GERÇEKLEŞMESİ İÇİN GEREKENLER**

### **2.4.1. Sıcaklık**

Sıcaklık, füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi için gereken ilk şarttır. Nükleer reaksiyonlar, yüksek sıcaklıkta maddenin plazma halinde oluşur. Nükleer reaksiyonlar sıcaklığa bağlı olduklarında ‘termonükleer reaksiyon’ olarak adlandırılır.

Nükleer füzyondaki en önemli sorunlardan biri enerji üretirken yüklü çekirdekler arasındaki Coulomb itme kuvvetini ortadan kaldırmaktır. Kaynaşmaya çalışan atom çekirdekleri pozitif yüklü olduklarından dolayı birbirlerini itmektir. Füzyon reaksiyonlarının oluşabilmesi çekirdeklerin birbirlerine yaklaşmaları gerekmektedir. Elektrostatik itme kuvveti engelleyecek tek yol kinetik enerjinin çekirdeklere aktarılması ve reaksiyonun yüksek sıcaklıklara çıkması gerekmektedir. Meydana gelen elektrostatik itmeyi ortadan kaldıracak kinetik enerji miktarını elde etmiş atom çekirdeklerinin birbirleriyle karşılaşmaları kesin füzyon yapılacağı anlamına gelmez. Yüksek sıcaklıklarda ısıtılan atomlar gaz haline geçer, bir kademe daha ısıtırsa son yörüngedeki atomu kaybedip iyonize olurlar. Elde edilen negatif ve pozitif iyonlar maddenin plazma halini oluşturur. Plazmada sıcaklık çok yüksektir, birimi elektron volt (eV) ya da kiloelektron volt (keV) olarak ifade edilir. Kinetik enerjileri 10 keV'dir ( $1 \text{ keV} = 1,16 \cdot 10^7 \text{ K}$ ).

### **2.4.2. Yoğunluk**

Yoğunluk, füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için maddenin ikinci şartıdır. Nükleer reaksiyon maddenin plazma halinde meydana gelir. Tesir kesiti çok düşük olan bir nükleer reaksiyondur. Plazma çok yüksek sıcaklığa ulaşsa bile çekirdeklerin küçük bir kısmı reaksiyona girer. Atomların etkileşim miktarlarını arttırmak için çekirdeklerin yüksek yoğunluğa sahip olmaları gerekir. Füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için birim hacimde tanecik yoğunluğunun en az  $10^{20}$  tanecik/m<sup>3</sup> olması gerekir.

### **2.4.3. Zaman**

Plazmanın tutuşması için üçüncü şarttır. İyonların çarpışmaları birim hacimde bulunan iyon miktarıyla doğru orantılıdır. İyon miktarı fazlaysa plazma tutuşması çabuk sağlanır, iyon miktarı azsa iyon çarpışmaları az olacağından plazma tutuşması geç meydana gelir. Plazmanın tutuşması için gerekli olan zamanla plazma yoğunluğu ters orantılıdır. Yoğunluk artarsa plazma süresi azalır, yoğunluk azalırsa plazma süresi artar. Çarpımları sabittir. İyon sayısı 'n' plazma sınırlama süresi 't' ile gösterilir ve saniye olarak ifade edilir. İyon yoğunluğuyla sınırlama süresinin çarpımının minimum değerine Lawson Ölçütü denir.

Plazma tutuşması ve plazma sıcaklığı 10-100 keV 'a kadar ısıtmak için ek ısıtma yapmak gerekir. Ek ısıtma için;

#### **2.4.3.1. Radyo Frekansı Isıtma Yöntemi (rf)**

Toroidal akımlarla ısıtma gerçekleşir. Radyo frekansı dalgalarının elektron dalgaları etkileşmesiyle, toroidal akım gerçekleşir, bu akımla da plazma ısıtılır.

#### **2.4.3.2. Nötr Işın Demeti Enjeksiyonu Yöntemi (NBI)**

Döteryum veya hidrojenden iyonlarındaki ışın demeti 10-100 keV'a kadar ısıtılır, iyonlardaki yük değişikliğiyle ışın demeti nötr hale gelir. Işın demetindeki parçacıklar manyetik sapma olmadan ilerler bunun nedeni yüksüz olmaları, yüksüz olmalarından

plazma içinde pozitif ve negatif iyonlar elektrostatik etkileşim yaparak enerjilerini plazmaya aktarırlar. Plazma ısıtması NBI yöntemiyle gerçekleşmiş olur [17].

## **2.5. FÜZYON REAKTÖRLERİNDE MANYETİK SINIRLANDIRMA**

Füzyon reaktörlerinde plazma sınırlandırması için manyetik alan kullanılarak plazmanın sınırlandırılması yapılır. Plazma sınırlandırılması 3 yolla sağlanır.

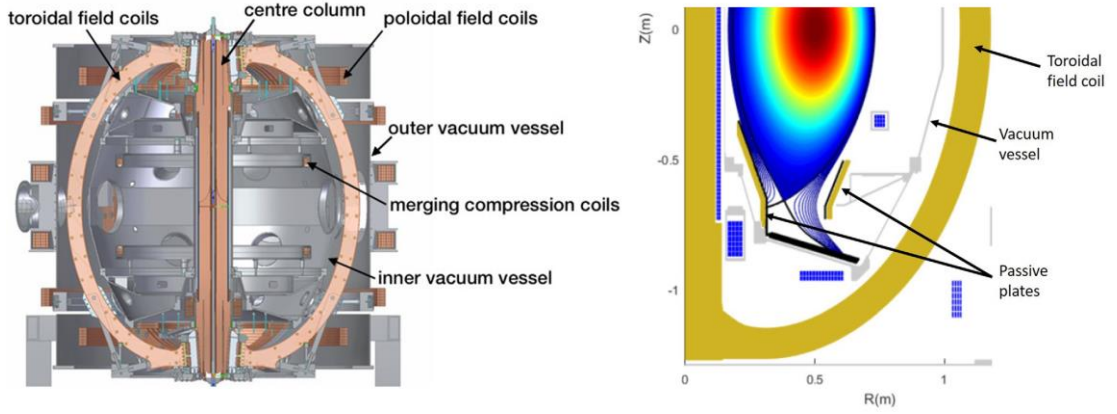
### **2.5.1. Düzgün Eksenli**

En basit manyetik sınırlama yöntemi olarak bilinir, yüksek akım taşıyan bobinlerin çevresinde oluşan manyetik alanın etrafında parçacıklarla çevrilidir.

### **2.5.2. Tokamak**

Manyetik alan çizgileri parçacığın etrafını sarmalayarak yol alırlar ve duvarın sonlarına doğru bir sürtünme gerçekleşir. Parçacıklarda meydana gelen kayıpların önlenmesi için eksen boyunca spiral halka gibi torus meydana gelmelidir. Plazmanın sınırlaması için farklı manyetik alanlar kullanılır. Poloidal ve toroidal alanlar.

Bobinin etrafındaki akımlar tarafından meydana gelen güçlü alana toroidal alan denir. Bobindeki manyetik alan, yarıçapla ters orantılıdır. Spiral şeklindeki yörüngede hareket eden parçacık yarıçapın büyük olmasına neden olur. Dış duvarda meydana gelen bir manyetik alanla karşılaşılır. Manyetik alanı azaltmak için toroidin yüzeyindeki manyetik alana poloidal alan denir.



Şekil 2.1. Tokamak resmi [18].

Reaktör duvarlarında plazmayı uzaklaştıran bir manyetik alan bulunur. Manyetik bobin olarak bilinen toroidal ve poloidal alanlar plazmayı şekillendirmek için manyetik kafes olarak hareket eden yatay ve dikey bir alan oluşturur. Transformatör tarafından akımı indüklenen, bobin 1.sargı ve plazma 2.sargı olarak devam eder. Plazma akımından meydana gelen ısıtma füzyonun gerçekleşmesi için 100 milyon santigrat derece sıcaklığın 3'te birini oluşturur. Ek ısıtma nötr ışınla meydana gelir, nötr hidrojen plazmaya enjekte edilip iyonize olup manyetik alan tarafından sıkıştırılır. Füzyon reaktörleri depo olarak kullanılır. Düşük ve yüksek sıcaklık duvarları reaktör bileşenlerini ısı ve radyasyona karşı korur [19,20].

### 2.5.3. Manyetik Aynalar

Manyetik aynalarda, manyetik alan oluşturmak için elektromıknatis konfigürasyonu oluşturulur. Plazmanın deney cihazları basit ve düşük maliyetlidir. Manyetik alanın uçlarına yaklaşan parçacıklar ters yönde hareket etmesine neden olan ikinci manyetik alan kuvvetiyle karşılaşılır. Manyetik alanın meydana geldiği parçacıkların manyetik alan çizgilerinden yüksek alan bölgesinden geri yansıtılan sistemdir.

### 2.6. MANYETİK FÜZYON REAKTÖRÜNÜN MANTO YAPISI

Manto yapısı;

Füzyon reaksiyonlarındaki enerjiyi ısı enerjisiye dönüştürerek soğutucuyla güç sistemine gönderir.

Tritiyum doğada çok nadir bulunmasından dolayı trityumu üretmek için füzyon reaksiyonları için yakıt üretir.

Füzyon katmanları;

- Plazma
- İlk duvar
- Tritiyum üretim bölgesi
- Yansıtıcı
- Yalıtım
- Boşluk
- Manyetik alan

### **2.6.1. Yakıt Bölgesi**

Füzyon reaktörlerinde kullanılacak yakıtların enerji potansiyeli yüksek olması gerekmektedir. Füzyon reaktörlerinde kullanılacak iki temel yakıt vardır. Döteryum-döteryum, döteryum-trityum yakıtıdır. Füzyon yakıtlarında üretilen enerji sonucunda hızlı nötronlar ile nötron dengesiyle reaktör için gereken trityum üretilmektedir.

### **2.6.2. İlk Duvar Bölgesi**

Füzyon reaktörlerinde ilk duvar materyal seçimlerinde tasarım önemlidir. Materyal seçiminde; sıcaklık, radyasyon, sertlik ve korozyon özelliklerine dikkat etmek gerekmektedir. SiC ve 1DS-ODS çelikleri bu özelliklere sahiptir.

### **2.6.3. Soğutucu Bölgesi**

İki döngülü soğutucu sistemi vardır. Birinci döngü soğutucunun görevi, katmanlardaki ısı üretimini ilk duvar yüzey ısını düşürüp ikinci katmana aktarmaktır. Su, helyum, sıvı metal, erimiş tuz kullanılan soğutuculardır.

### **2.6.4. Yansıtıcı Bölgesi**

Nükleer reaktörlerde yansıtıcılar hızlı nötronların enerjisini azaltarak, trityum tepkimelerinin oluşmasını arttırarak trityum üretimini de arttırmaktadır.

Yansıtıcıların nötron kaçağını engelleme ve katmanları koruma görevi vardır. Yansıtıcı seçiminde; nötron tesir kesiti, yüksek saçılma tesir kesiti ve radyasyon hasarına karşı dayanıklı olması gerekmektedir.

### **2.6.5. Yalıtım Bölgesi**

Füzyon reaktörlerinde oluşan ısıyı içinde absorbe etme ve ısı yükünü korumaktır. Yalıtım malzemesi  $\text{SiO}_2$  kullanılmıştır.

### **2.6.6. Boşluk Bölgesi**

Füzyon reaktörlerinde gerekli bölgelerde yüksek miktardaki ısı enerjisinin birikmemesi için boşluk bölgesi bulunmaktadır.

### **2.6.7. Mıknatıs Bölgesi**

Plazma sınırlaması mıknatıslarla yapılır. Reaktörün en dış katmanını sarmalayan mıknatıslar plazmayı manyetik kuvvetle sınırlandırmaktadır.

## 2.7. SOĞUTUCULAR VE ÖZELLİKLERİ

Williams, Nükleer Hidrojen Girişimi (NGNP/NHI) ve Gelişmiş Yüksek Sıcaklık Reaktörü (AHTR) için florür tuzlarının termofiziksel özelliklerinin detaylı bir şekilde araştırılması yapılmıştır.

### 2.7.1. Erime Noktası

Florür tuzlarının faz diyagramları bulunmaktadır. Bu nedenle tahmini tekniklere daha az gerek duyulmaktadır. Düşük sıcaklıklarda tek bileşenli tuz donmaz, bu yüzden çok bileşenli tuz karışımı gereklidir. Hemen hemen ilgili tüm ikili faz diyagramları ölçülmüş ve üçlü sistemlerde incelenmiştir. Genellikle donma noktasının  $500^{\circ}\text{C}$ ' ye düşmesi, birinci tuzun saf bileşene eklenmesiyle gerçekleşir. Üçüncü bileşen eklenerek donma noktasının düşürülmesi gerçekleşir, fakat donma noktası daha da düşüktür ( $50^{\circ}\text{C}$ ).

İkinci soğutucu olarak tuzlar belirlenmiştir. Bunlar;

- Alkali tuzlar,
- $\text{ZrF}_4$  karışımları,
- Floroborat tuzlar ve
- Klorür tuzlarıdır.

Çizelge 2.2. de her bir tuzun ötektif bileşimleri donma noktası sırasına göre listelenmiştir.



Çizelge 2.2. Tuz bileşimleri ve ötektif sıcaklıkları.

	<b>Alkaliler</b>	<b>Molar Bileşim(%)</b>	<b>Erime Noktası(°C)</b>
<b>Alkali Fluorides</b>	LiF-NaF-KF	46.5-11.5-42	454
	NaF-ZrF <sub>4</sub>	59.5-40.5	500
<b>ZrF<sub>4</sub> Salts</b>	LiF-NaF-ZrF <sub>4</sub>	42-29-29	460
	LiF-NaF-ZrF <sub>4</sub>	26-37-37	436
	NaF-RbF-ZrF <sub>4</sub>	33-24-42	420
	KF-ZrF <sub>4</sub>	58-42	390
	KF-KBF <sub>4</sub>	25-75	460
<b>BF<sub>4</sub> Salts</b>	RBF-RbBF <sub>4</sub>	31-69	442
	NaF-NaBF <sub>4</sub>	8-92	384

### 2.7.2. Buhar Basıncı ve Türleri

Florür tuzlarının çoğu çok düşük buhar basınçlarına sahiptir. Fakat yüksek oksidasyon katyonlarına sahip bileşikler (BF<sub>3</sub>, UF<sub>6</sub> ve MoF<sub>6</sub>) yüksek buhar basınçlarına sahiptir. Bazı soğutucu sıvılar(BeF<sub>2</sub>, ZrF<sub>4</sub>), 800°C’de buhar basınçlarına (>1 x 10<sup>-3</sup> atm) sahiptir. Saf bileşenler her zaman düşük buhar basınçlarına sahiptir. Yüksek kaynama noktaları en uçucu bileşenden fazladır. Bu nedenle tuzlar aşırı sıcaklıklar dışında önemli kısmi buhar basınçları sergilemezler (>1 atm). MSRE, 0,35 atm’lik helyum kapak basıncıyla çalıştırıldı ve MSBR, 2,75 atm’lik kapak basıncıyla tasarlandı. Tablo 6 da tek bileşenli tuzların ve çok bileşenli karışımların normal erime ve kaynama noktaları belirlenmiştir.

Çizelge 2.3. Tuz bileşiklerinin erime ve kaynama noktaları.

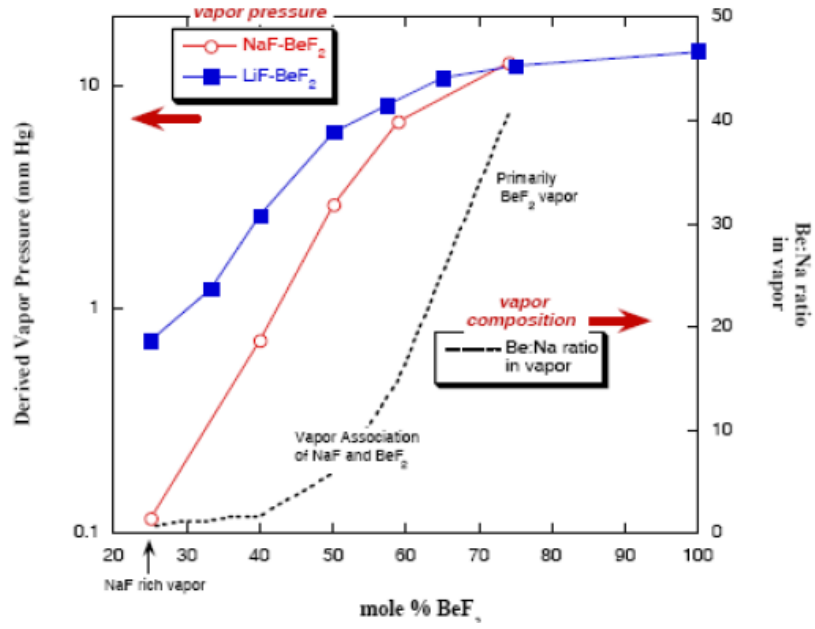
Tuz Bileşenleri	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
<sup>7</sup> LiF	845	1681
NaF	995	1704
KF	856	1502
RbF	775	1408
BeF <sub>2</sub>	555	1327 *
ZrF <sub>4</sub>	903	600
LiF-NaF-KF (46.5-11.5-42)	454	1570
LiF-beF <sub>2</sub> (67-33)	458	~1400 *
<sup>7</sup> LiF-NaF-BeF <sub>2</sub> (31-31-38)	315	
NaF-BeF <sub>2</sub> (57-43)	340	~1400 *
NaF-ZrF <sub>4</sub> (59.5-40.5)	500	~1350 *
RbF-ZrF <sub>4</sub> (58-42)	410	~1450 *
KF-ZrF <sub>4</sub> (58-42)	390	~1450 *
KF-KBF <sub>4</sub> (25-75)	460	1070

\* Düşük sıcaklık verilerinin ekstrapolasyonu ile tahmin edilmiştir (~1450 °C)

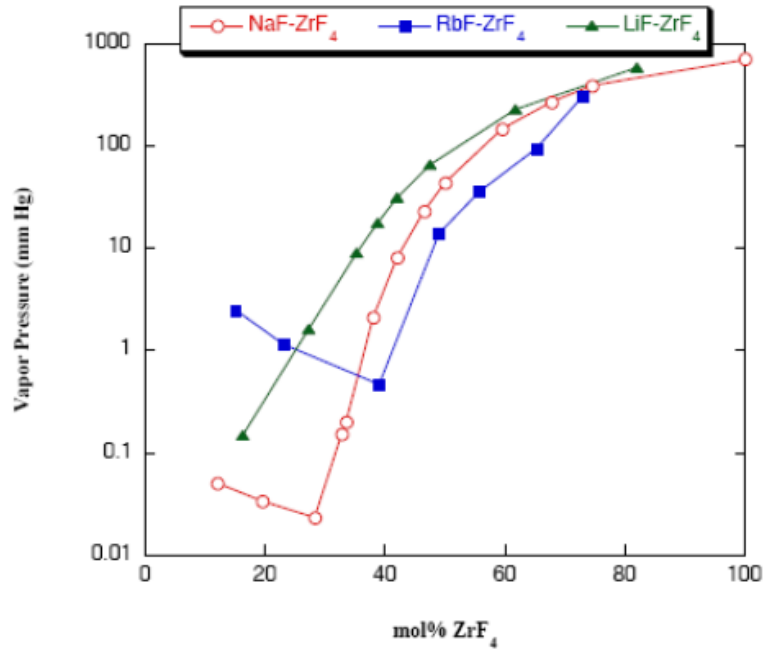
Buhar basıncı, tuz bileşimlerine en duyarlı fiziksel özelliktir. ZrF<sub>4</sub> ve BeF<sub>2</sub> bileşenleri, termodinamik olarak ideal olmayan sistemleri buhar basınç ve türleri üzerindeki etkisini tespit etmek için çalışmalar yapılmıştır. Çalışma sonucunda soğutma suyu tuzu bileşimini kullanmanın yararlı olduğu belirlenmiştir.

Lewis asit-baz teorisiyle tuz bileşimlerinin buhar basıncı üzerindeki etkisi açıklanabilir. Asidik bileşen (Zr<sup>+4</sup>, Be<sup>+2</sup>) içeren bileşiklerin doğal uçuculuğu “temel” alkali florür bileşeninden florür anyonlarının ayrışmasıyla oluşur. Ayrışma ürünü, sıvı tuz çözeltisinin ayrılmaz bir parçası olan düşük uçuculuktaki karışımdır. Alkali florürlerin çoğu, bileşim bileşikleri için florür anyonları verme becerilerinde eşit

değildir. Alkali katyonların, florür anyonuna olan atom numarasıyla azalır; bu nedenle daha ağır alkali florürler, asidik türleri ( $Zr^{+4}$ ,  $Be^{+2}$ ) içeren bileşiklerin doğal uçuculuğunu azaltmada daha etkilidir.



Şekil 2.2. 900°C’ de alkali florür BeF<sub>2</sub> buhar basıncı eğilimleri [21].



Şekil 2.3. 900°C’ de alkali florür ZrF<sub>4</sub> buhar basıncı eğilimleri [21].

ZrF<sub>4</sub> ve BeF<sub>2</sub> sistemlerinde tuz bileşiminin buhar basıncı üzerindeki etkisi görülür. Şekil 19 ve şekil 20 de katyonun koordinasyon bağlanma isteğini karşılayacak şekilde alkali florür içeriği oranı arttıkça uçuculuğun önlendiği belirlenmiştir. Koordinasyon nedeniyle buhar nedeniyle, buhar basıncının azalması, buhardaki değişikliğe neden olur. Alkali florür bakımından buhar, esas olarak alkali florürden oluşur. Alkali florürden yoksun sistemler, uçucu türler, çok değerli katyon içeren bileşiklerdir.

### 2.7.3. Yoğunluk

Akışkan yoğunluğu, bir soğutucunun taşıma kapasitesini ölçmek amacıyla önemlidir. Yoğunluk, ölçülmesi en kolay özellikler arasında ve yeni bileşimler için kolay tahmin edilebilenlerden biridir. Sıvı tuz yoğunluğu artan sıcaklıkla lineer olarak azalır. Düşük atom numaralı tuzlar hafif ve yüksek atom numaralı tuzlar ağır olma eğilimindedir. Tablo7 de yoğunluk denklemiyle florür tuzlarının listesi verilmiştir.

Çizelge 2.4. Tuzların yoğunluk denklemleri.

Tuz Bileşenleri	Molar Bileşim (%)	Yoğunluk Denklemi (kg/m <sup>3</sup> )
LiF-NaF-KF	46.5-11.5-42	2530-0.730 x T
NaF-ZrF <sub>4</sub>	57-43	3650-0.880 x T
KF-ZrF <sub>4</sub>	58-42	3416-0.887 x T
LiF-NaF-ZrF <sub>4</sub>	26-37-37	3533-0.517 x T
NaF-NaBF <sub>4</sub>	8-92	2252-0.711 x T
KF-KBF <sub>4</sub>	25-75	2258-0.803 x T
RbF-RbBF <sub>4</sub>	31-69	2946-1.047 x T

Tuz yoğunluğu, molar hacimle basit ve doğru bir yöntem icat edildi. Aşağıdaki denklem tuz karışımların molar hacim ve yoğunluğunun tespit edilmesini sağlar.

$$\rho_{mix}(T) = \frac{\sum_i x_i M_i}{\sum_i x_i V_i(T)} \quad (2.10)$$

$X_i$  bileşeni mol kesri,  $M_i$  bileşenin formül ağırlığıdır ve  $V_i(T)$ , bileşenin sıcaklığındaki molar hacimdir. Tablo 8’de karışım yoğunlukları %5 doğrulukla gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Karışım yoğunluğunda kullanılan standart molar hacimler.

Bileşen Florür	Formül ağırlığı (g/mol)	molar hacim (cm <sup>3</sup> /mol)	
		600°C	800°C
<sup>7</sup> LiF	26	13,46	14,19
NaF	42	19,08	20,2
KF	58,1	28,1	30
RbF	104,5	33,9	36,1
CSF	151,9	40,2	43,1
BeF <sub>2</sub>	47	23,6	24,4
MgF <sub>2</sub>	62,3	22,4	23,3
CaF <sub>2</sub>	78,1	27,5	28,3
AlF <sub>3</sub>	86,7	26,9	30,7
ZrF <sub>4</sub>	167,2	47	50

#### 2.7.4. Viskozite

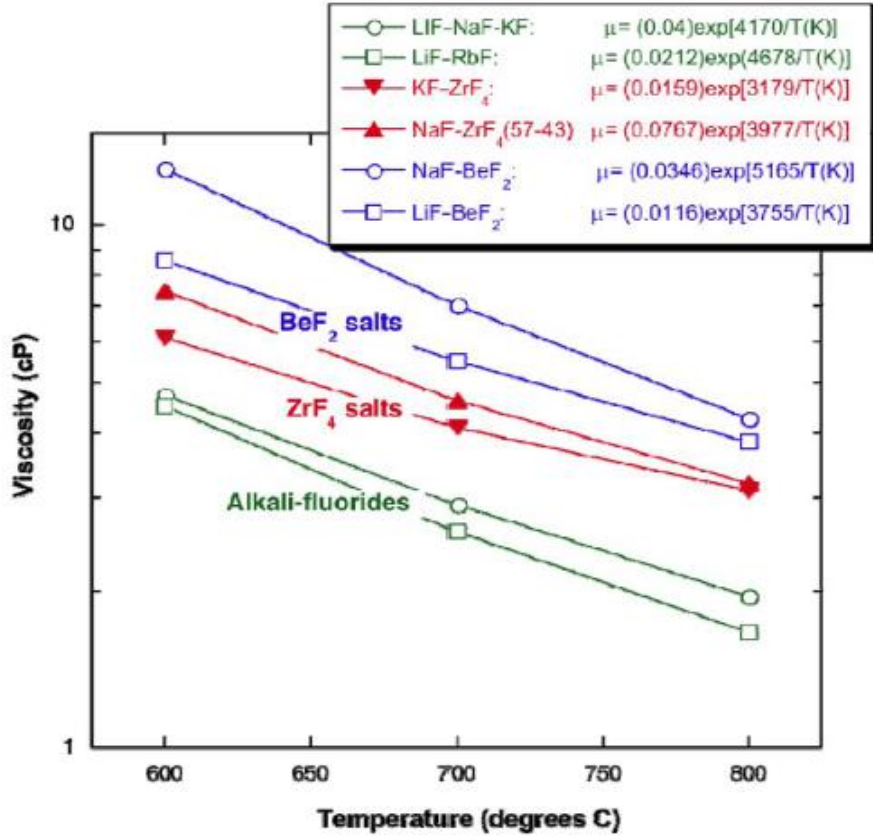
Bir sıvının viskozitesi  $\mu$  denkleminde tanımlanır.

$$P_{xy} = \mu \frac{dv_y}{dx} \quad (2.11)$$

Sıvı tuzlar sıvılar gibi özelliklere sahiptir. Newton akışkanlarıdır ve aynı özelliklere sahiptir.

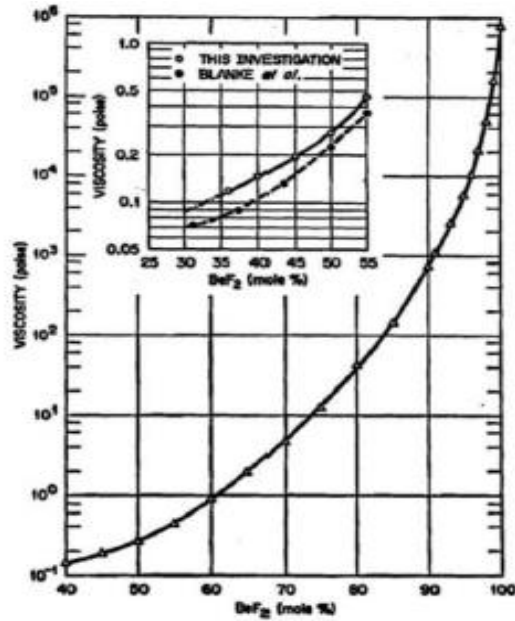
$$\mu = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (2.12)$$

Viskozite, sıvı özelliklerine göre sıcaklıkla değişiklik gösterir. Viskozite varyasyon eğilimlerini incelemek ve sınırlarını belirlemek gerekir. İkili karışım verileri yeterlidir Şekil 21 de gösterilmektedir. Düşük erime noktasına sahip tuzların, endüstriyel soğutucu olarak kullanımları oldukça düşük viskozite sergileyen karışımlara aittir. Bazı özelliklerin aksine bileşim sıvıların viskozitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir.

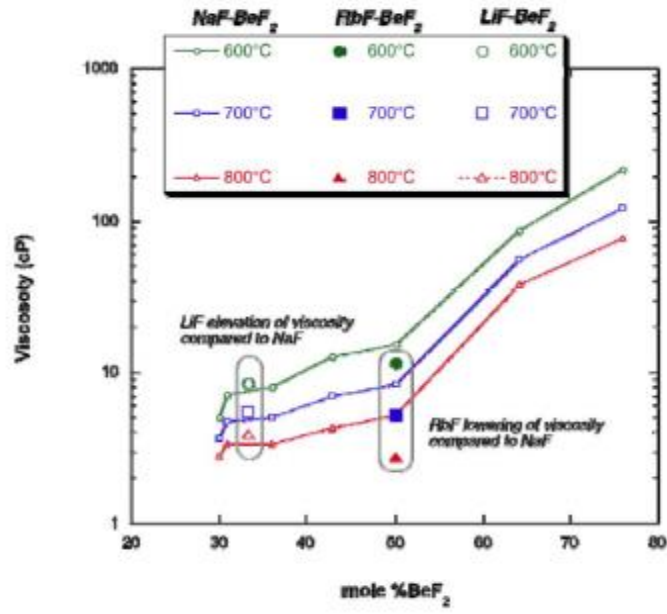


Şekil 2.4. Karışım tuzların viskozite aralığı [22].

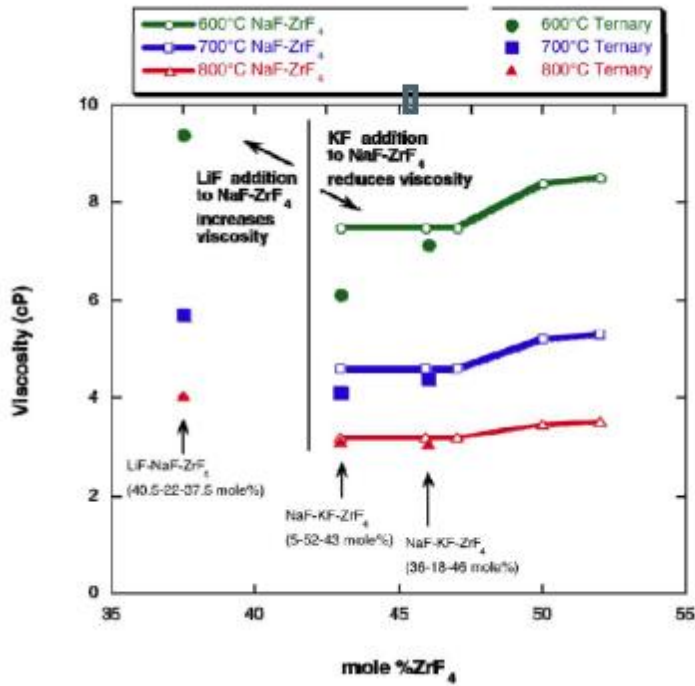
Viskozite, buhar basıncı ve erime noktasındaki sıvı fazındaki karışımlardan etkilenir.



Şekil 2.5. BeF<sub>2</sub> bileşiminin 600°C'de LiF<sub>2</sub> karışımlarının viskozite üzerine etkisi [23].



Şekil 2.6. BeF<sub>2</sub> tuzlarının alkali bileşiminin viskozite üzerine etkisi [24].



Şekil 2.7. ZrF<sub>4</sub> karışımının viskozite üzerindeki etkisi [25].

ZrF<sub>4</sub> tuzunun faz diyagramı düşük erime noktalarına sahiptir, bu nedenle alkali kationları değiştirmeden bileşim değişiklikleri araştırmak mümkün değildir. Şekil 24 düz çizgiyle NaF<sub>4</sub>'ün düşük erime faz bölgesine göstermektedir. ZrF<sub>4</sub> tuzunun

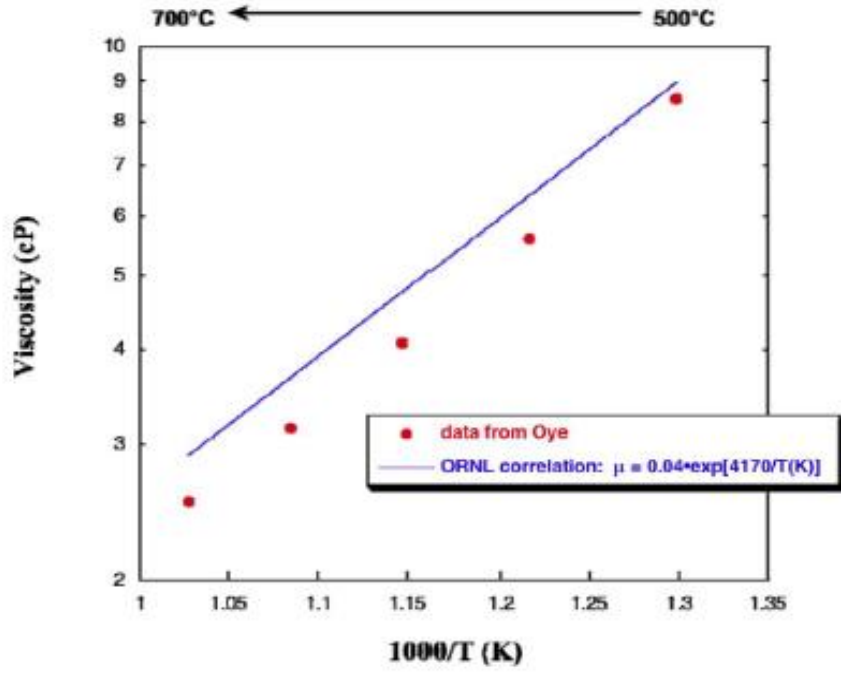
aralığındaki(%42 ile %52) viskozitedeki değişiklik büyük değildir. Fakat  $ZrF_4$  karışımı artar. Alkali katyonun değiştirmenin etkisi ile  $BeF_2$  aynıdır, daha hafif alkaliler viskoziteyi arttırırken daha hafifler viskoziteyi azaltır.

Alkali florürler çok az birleştirici benzer kimyasal özelliklere sahip karışımlardır.  $ZrF_4$  ve  $BeF_2$  karışımları potansiyel cam oluşturur.  $BeF_2$  içeriğindeki zengin katyon karışımları uzun süreli birleşmesi karakterize edilen kuvvetli cam oluşturuculardır ve yüksek viskoziteli "camsı" karışımlara yol açar.  $ZrF_4$  ve alkali halojenürlerin karışımları katı-sıvı faz geçişi sırasında kristalleşmeyi engelleyen amorf bir yapıyı koruyan belirli karışım termodinamiği türüyle oluşan farklı bir kırılğan cam karışımını ifade eder.

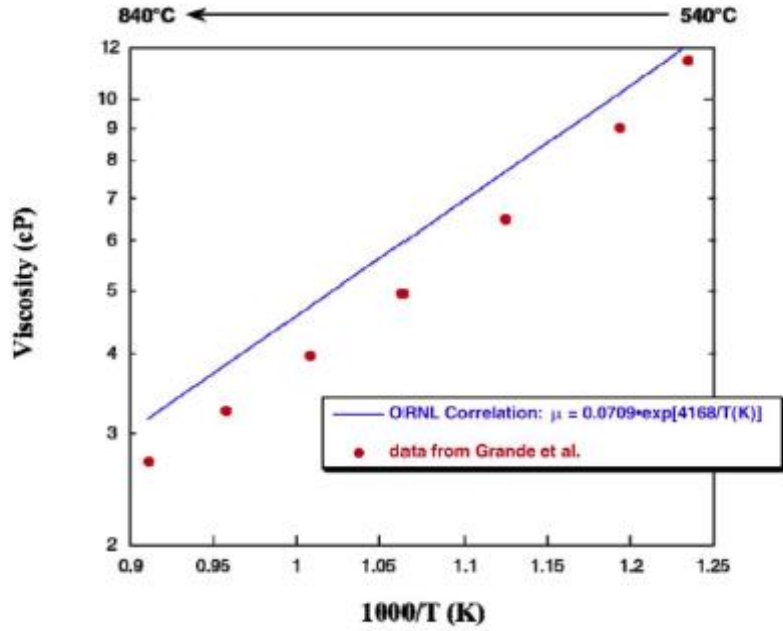
1950'ler ve 1960'larda yapılan ORNL ölçümleriyle son zamanlarda viskozite belirlemelerinin doğruluğu yapılan araştırmalarda karşılaştırılarak değerlendirilir. Bu karşılaştırmalar, alkali florürler ve  $ZrF_4$  karışımları için yapılabilir. Şekil 25 ve 25 da gösterilmektedir. Eski ve yeni ölçümler arasındaki fark yaklaşık olarak %10'dur. Eski ölçümler daha yüksek değerler göstermiştir. Daha da eski ORNL değerleri akış ve viskozitelere elde edilen ölçümlerin uyuşmasına dayanmaktadır. Yeni ölçümler, yüksek sıcaklıklar için özelleştirilmiş ve düşük viskoziteli sıvalara yeni bir kap viskozitesi elde edildi.

Daha eski ve daha yeni ölçümlerdeki değerlerin hata oranıdır (%20).





Şekil 2.8. LiF- NaF-KF ötektif viskozitesi için ölçülen değerlerin karşılaştırılması [26].



Şekil 2.9. NaF- ZrF<sub>4</sub>, %50-50 mol viskozitesi için ölçülen değerlerin karşılaştırılması [27].

### 2.7.5. Termal İletkenlik

Modern teorilerde sıklıkla sıvı tuzların ısı iletkenliğinin ağırlıklı olarak mekanizmadan kaynaklandığı varsayılır; sıvı moleküllerin uzaklığından kaynaklanan titreşim mekanizması ve iyonların hareketinden kaynaklanan translasyon ya da difüzyon mekanizmasıdır. İyonik difüzyonun ya da elektriksel iletim mekanizmasının önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Termal yayınının kütle yayınının oranından yüksek olması ve Lorenz sayısının değerinin yüksek olması difüzyonun düşük olduğunu belirler. Turnbull, böyle olduğunu belirtmiş ve difüzyon iletiminin toplam iletime oranını %5'ten daha düşük bulmuştur. Bu nedenle sıvı tuzlar, katı dielektriklere benzer şekilde ısı iletkenlik değerlerine sahiptir.

Sıvı tuzları termal iletkenliği en iyi şekilde;

$$k = 0.119 \frac{T_m^{0.5} \rho_M^{0.667}}{\left(\frac{M}{n}\right)^{1.167}} \quad (2.13)$$

bu modelde belirtilmiştir.

Burada k, W/mk cinsinden termal iletkenlik,  $T_m$ , K'deki erime noktası,  $P_m$ , sıvı tuzun  $\text{cm}^3/\text{mol}$  cinsinden molar hacmidir. M, tuzun ortalama ağırlığı, n, ayırık sayısıdır.

Bu modelde NaCl gibi tek bileşenli tuzlar önerilmiştir. Fakat değerli katyonlar karışımlara kadar genişletilmiştir. Tuz bileşen karışımlarının, yarı kristal titreşim modlarının bozulmasından dolayı tek bileşenlerin mol ağırlıklı termal iletkenlik özelliği gösterirler. Çok değerli katyonlara sahip tuzların türleşme için bazı varsayımlara dayalı olarak iyon numarasının belirtilmesi gerekir. Karmaşık tuz sistemleri için bazı belirsizlikler meydana gelmektedir.

Ignatiev ve Khoklov basit bir fonksiyonu olan deneysel denklem önermektedir. Termal iletkenlik için sıcaklık(T) ve tuz formülü ağırlığı(M):

$$k = 5 \times 10^{-4} T + \frac{32.0}{M} - 0.34 \quad (2.14)$$

Tablo 9 da halojenür tuzları için ölçülen termal iletkenlik değerleri ve sonuçları gösterilmiştir. Tuzun formül ağırlığının artmasıyla, termal iletkenliğin azalması eğilimi, saf halojenür tuzları ve karışımlar üzerindeki ölçümler bulunmuştur.

Çizelge 2.6. Florür tuzlarının ölçülen termal iletkenliklerinin karşılaştırılması.

tuz bileşenleri	molar bileşim (%)	Sıcaklık (°C)	Ölçülen iletkenlik (W/mK)	Rao-Turnbull tahmin (W/mK)	Hoklov korelasyon (W/mK)
LiF-NaF-KF	46.5-11.5-42	500	0,6	0,68	0,82
		700	-	-	0,92
LiF-NaF-RbF	42-6-52	700	-	0,42	0,62
LiF-BeF <sub>2</sub>	66.7-33.3	600	1	0,79	1,1
NaF-BeF <sub>2</sub>	57,43	700	-	0,58	0,87
LiF-NaF-BeF <sub>2</sub>	26-37-37	700	-	0,62	0,97
LiF-ZrF <sub>4</sub>	51-49	700	-	0,35	0,48
NaF-ZrF <sub>4</sub>	59.5-40.5	700	-	0,36	0,49
KF-ZrF <sub>4</sub>	58-42	700	-	0,32	0,45
RbF-ZrF <sub>4</sub>	58-42	700	-	0,26	0,39
LiF-NaF-ZrF <sub>4</sub>	26-37-37	700	-	0,36	0,53
NaF-AlF <sub>3</sub>	75-25	1000	0,8	0,79	0,91

### 2.7.6. Isı Kapasitesi

Florür tuzları yüksek ısı kapasitesine sahiptir. Tek bileşenli tuzların ısı kapasiteleri Tablo 10'da gösterilmiştir.

Isı kapasitelerini tahmin etmenin en basit kuralı, yoğunlaştırılmış durumda yüksek sıcaklıktaki, özgül ısı kapasitesinin-kristalin maddesinden bağımsız olarak yapılan 3 R/M'ye eşit Dulong ve Petit kuralıdır.  $R=8,314472$  J/K mol gaz sabiti ve M, kg/mol cinsinden molar kütedir. Dulong-Petit' e göre, kg atom sıvı florürleri ısı kapasiteleri yaklaşık olarak 25 kJ/K'ye eşittir. 1960'larda ORNL' de saf bileşikler için yapılan deneysel ölçümler, kg-atom ısı kapasitesinin yaklaşık değeri 33 kJ/K ve florür karışımları için veriler ortalama değerde daha yüksektir.

Çizelge 2.7. Tuzların ısı kapasiteleri.

Tuz	Sıcaklık (°C)	Ölçülen ısı kapasitesi Cp (J/K)
LiF	848	64,85
NaF	995	68,62
KF	858	66,94

Sıvılarda ısı kapasitesinin sıcaklığa etkileşimi düşüktür. Dulong-Petit yasasına göre düşük sıcaklık etkileşime dayanarak karışımların özgül ısı kapasiteleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$C_p = 33.47 \frac{\sum_{i=1}^n N_i P_i}{\sum_{i=1}^n N_i M_i} \quad (2.15)$$

Burada  $C_p$ , J/kg K cinsinden özgül ısı kapasitesidir, n tuz bileşenlerinin sayısıdır.  $P_i$  bileşenin molekülündeki atomların n sayısıdır ve  $M_i$ , bileşenin mol kesri ve moleküler ağırlığıdır. Deneysel olarak özgül ısı kapasitelerinin değerleri Tablo 11’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Tuz karışımlarının deneysel olarak ölçülen ve özgül ısı kapasite değerleri.

Tuz Bileşimi	Ölçülen Isı Kapasitesi (J/kgK)	Dulong-Petit tahmini (J/kgK)
LiF-NaF-KF	1882,8	1619,2
LiF-KF	1840,96	1594,1
LiF-NaF-RbF	-	987,42
LiF-RbF	1188,26	945,58
LiF-BeF <sub>2</sub>	2414,17	2368,14
NaF-BeF <sub>2</sub>	2175,68	1840,96
LiF-NaF-BeF <sub>2</sub>	-	2045,98
LiF-ZrF <sub>4</sub>	-	1221,73
LiF-NaF-ZrF <sub>4</sub>	-	1238,46
NaF-ZrF <sub>4</sub>	-	1150,6
KF-NaF-ZrF <sub>4</sub>	1087,84	1054,37
KF-ZrF <sub>4</sub>	-	1050,18
RbF-ZrF <sub>4</sub>	-	836,8

Molar bileşimleri tuz karışımlarıyla aynıdır.

Deneysel bir çalışmada, J/kg K cinsinden flinak tuzunun özgül ısı kapasitesi için yeni bir model gösterildi.

$$C_P = 976,13 + 1,063 T ,$$

Burada T, °C cinsinden sıvı sıcaklığıdır.

## BÖLÜM 3

### METOT

#### 3.1. NÖTRONİK HESAPLAMALAR İÇİN GEOMETRİK MODELİN AÇIKLANMASI

Manyetik füzyon reaktöründe manto yapısının nötronik analizin basitleştirilmiş modeli MCNP5 geometrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu reaktör modeli dokuz katmandan oluşmaktadır. Bu çalışmada, plazma bölgesinde D şeklinde bir manto yapısı, yüksek enerji potansiyeli nedeniyle manyetik füzyon reaktöründe döteryum-trityum füzyon yakıtı kullanılmıştır. Plazmanın homojen olarak dağıtıldığı modelde minör yarıyapı 200 cm, ana yarıçapı 620 cm, model en-boy oranını koruyacak şekilde reaktör bileşeni eklenmiştir [28].

**Birinci Duvar Bölgesi:** Bu çalışmada, birinci duvar tasarımı uygulanmıştır. İlk duvar malzemesi olarak paslanmaz çelik malzeme (SS 316 LN-IG) kullanıldı. Birinci duvar kalınlığı (2 cm) reaktörün nötronik etkileri araştırıldı.

**Soğutucu Bölgesi:** Reaktör battaniyesindeki trityum yüksek üreme performansına sahip soğutucu malzemesi ve nötron çoğaltıcı olarak florür erimiş tuz malzemeleri (FLIBE, FLINABE ve FLIPB) ile LiF, doğal Li ve zenginleştirilmiş Lityum kullanılmıştır. Optimum nötronik performansı elde etmek için tabaka kalınlığı 50 cm olarak seçilmiştir.

**Reflektör Bölgesi:** Reaktör modeli, füzyon kaynağından gelen nötronları yansıtma ve soğutucu bölgesine geri göndermek için ilk reflektör bölgesine 10 cm eklenmiştir. Nötronların yüksek elastik saçılımı nedeniyle grafit yansıtıcı olarak kullanılmıştır. İkinci nötronları yansıtma ve trityum üreme bölgesine geri göndermek için reflektör

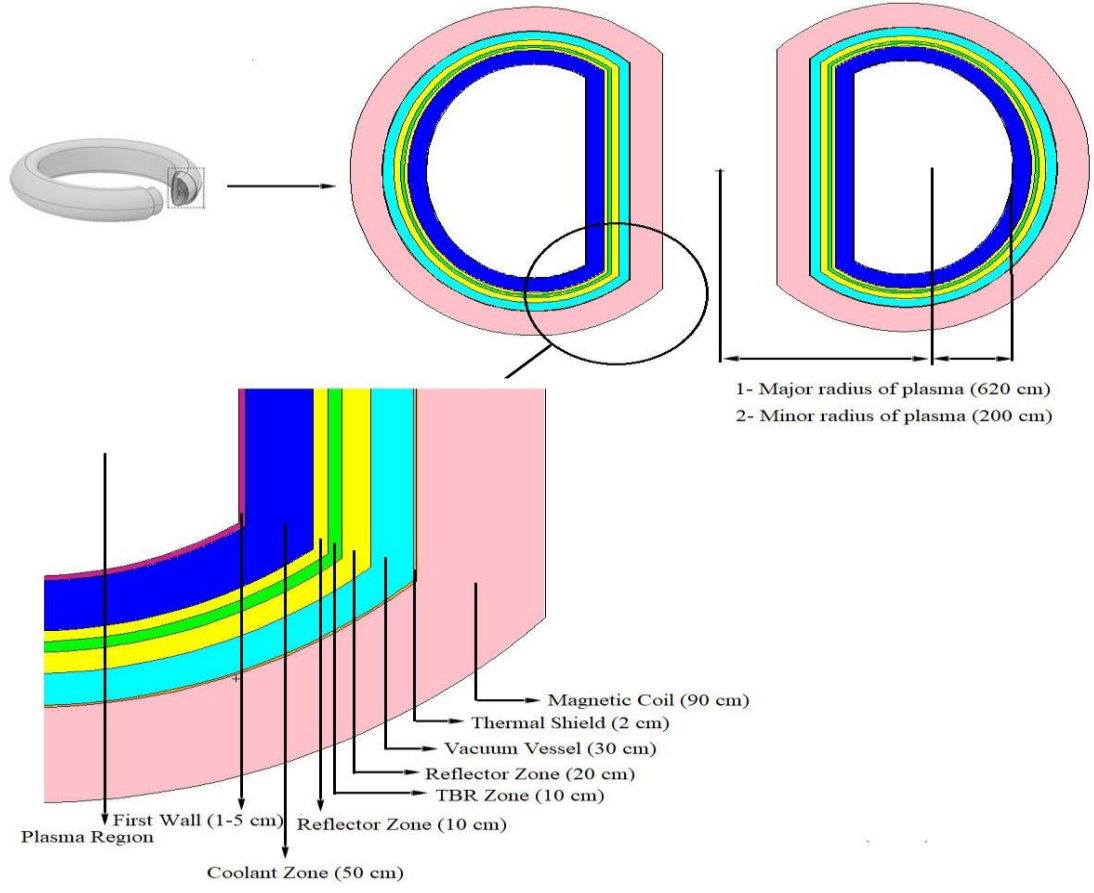
bölgesine 20 cm eklenmiştir. Reaktörün mıknaıtıs tabakasındaki nötron hasarı azaltılmış, trityum üretimi ve enerji çarpma değerlerinde artış görölmüştür.

Trityum Üreme Bölgesi: Lityum oksit ( $\text{LiO}_2$ ) bu katmanda trityum üretim malzemesi olarak kullanılmıştır. Reflektör bölgesine katman kalınlığı 10 cm eklenmiş ve trityum üretim potansiyeli artırılmıştır.

Vakum Kabı: Plazma dengesini ve koruma sağlar. Yüksek vakum ortamı ve elektriksel direnç sağlar. Elektriksel ve yapısal süreklilik için ikili bir yapıya sahiptir. Vakum kabı kalınlığı 30 cm belirlenmiştir. Bu çalışmada, %60 borlu çelik (S30467) ve %40 sudan homojen bir karışım kullanılmıştır.

Termal Zırh: Plazma ısısı serbest kaldığında, battaniye bileşenleri arasında ısı transferi meydana gelir. Termal zırh, ısı yüklerinin toroidal alan bobinleri ne ulaşmasını engeller. Soğutma levhaları paslanmaz çelik levhalar ve helyum gazında oluşur (ITER 2002). SS316LN-IG malzemesine ve zırh kalınlığı 2 cm olarak tercih edilmiştir.

Manyetik Halka: Manyetik füzyon reaktörlerinde plazma sınırlaması mıknaıtıslar yardımıyla yapılır. Plazma, mıknaıtısların ve reaktörün en dış tabakasını çevreler, tasarlanan reaktörün sınırlarına göre plazmayı manyetik kuvvetle sınırlar. Mıknaıtısların bir diğer görevi manyetik kuvvetle plazmayı reaktörün merkezinde tutmak ve dağılmasını önlemektir. Manyetik halka, %45  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , %50 Incoloy 908 ve %5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  homojen bir karışımdan meydana gelir.



Şekil 3.1. Manyetik füzyon reaktörünün manto yapısı [28].

Çizelge 3.1. Battaniye malzemelerinin atomik yoğunlukları.

Battaniye Bölgesi	Malzeme	Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Çekirdek	Atomik yoğunluk (atom/barn.cm)
2	Birinci Duvar (SS 316 LN-IG)	Table 2'de görülebilir		
3	Soğutucular	Table 3'de görülebilir		
4	Reflektör (Grafit)	2.267	C-12	1,14E+04
5	TBR Bölgesi (Lithium oksit)	2.013	Li-6 Li-7 O-16	6,16E+02 7,50E+03 4,06E+03
6	Reflektör (Grafit)	2.267	C-12	1,14E+04
7	Vacum boşluğu S30467 (60 %)	7.8	Fe C Mn Cr B	5,24E+03 7,82E+00 1,39E+02 1,74E+03 9,12E+02



	H <sub>2</sub> O (40 %)	1	Si Ni H O	8,86E+01 1,13E+03 6,69E+03 3,34E+03
8	Termal zırh (SS 316 LN-IG)	Table 2’de görülebilir		
9	Sargılar Nb <sub>3</sub> Sn (45%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5%) Incoloy 908 -50%	8.4 3.987 8.17	Nb Sn Al O Fe Ni Cr Nb Ti Al N Mn C Co	1,72E+03 5,73E+02 2,35E+02 3,53E+02 1,79E+03 2,05E+03 1,88E+02 7,73E+01 8,94E+01 8,48E+01 3,51E-01 1,84E+00 2,05E+00 4,17E+00

Çizelge 3.1’de farklı bölgede kullanılan battaniye malzemelerinin atomik yoğunlukları hesaplanarak verilmektedir. Çizelge 3.2 birinci duvar için seçilen pazlanmaz çelik (SS 316 LN-IG) malzemesinin atomik yoğunluklarını gösterilmektedir. Bu çalışma için seçilen soğutucu malzemelerin atomik yoğunlukları hesaplanarak da Çizelge 3.3 de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Birinci duvar malzemesinin atomik yoğunlukları.

Çekirdek	Pazlanmaz çelik (SS 316 LN-IG), Özgül ağırlık 8 gr/cm <sup>3</sup>
B	4.01095E-06
C	4.01099E-05
Co	2.45240E-05
Cr	1.61217E-02
Cu	2.27438E-05
Fe	5.65101E-02
Mn	1.57845E-03
Mo	1.20515E-03
N	2.06424E-04
Nb	1.03708E-05
Ni	1.00948E-02
P	3.11074E-05

S	1.50268E-06
Si	6.86146E-04
Ta	2.66242E-06
Ti	1.00576E-05
Total	8.65498E-02

Çizelge 3.3. Aday soğutucu malzemelerinin atomik yoğunlukları.

Nuclide	Nuclei Density (atom/barn.cm)					
	FLiBe (LiF (%67) – BeF <sub>2</sub> (%33))	FLiPb (LiF (%40) – PbF <sub>2</sub> (%60))	FLiNaBe (LiF (%35) –NaF (%27) – BeF <sub>2</sub> (%38))	LiF	Doğal Li	Zenginleş- tirilmiş Li (%90)
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.94	3.545	2.0	2.635	0.534	0.534
Li-6	1.80234E-03	4.11519E-04	8.35829E-04	4,64320E-03	3,51700E-03	4,17028E- 02
Li-7	2.19439E-02	5.01034E-03	1.01764E-02	5,65318E-02	4,28202E-02	4,63364E- 03
Be-9	1.16959E-02	-	1.19562E-02	-	-	-
F-19	4.71381E-02	2.16875E-02	4.34197E-02	6,11750E-02	-	-
Na-23	-	-	8.49516E-03	-	-	-
Pb-206	-	2.07386E-03	-	-	-	-
Pb-207	-	1.79735E-03	-	-	-	-
Pb-208	-	4.26158E-03	-	-	-	-
Total	8.25802E-02	3.52421E-02	7.48833E-02			

## 3.2. HESAPLAMA METODU

### 3.2.1. Monte Carlo Hesaplama Yöntemi

MNCP, Los Alamos laboratuvarında nükleer silah teknolojilerinde çalışan bilim adamları ortaya çıkmıştır. 1930 yıllarından sonra hızlıca gelişmeye başlamıştır. Von Neumann, Fermi, Ulam ve Metropolis bu yöntemi geliştiren bilim adamlarıdır. Von Neumann ve Ulam'ın matematiksel teknik olarak kullandıkları şifre Monte Carlo kelimesidir. İstatiksel yöntemler kullanılarak deneyi sayısal taklit etme yöntemi yapılır, metot olasılık teorisine dayanır. Günümüzdeki MNCP metotları birçok dallarda kullanılmaktadır [29].

### 3.2.2. MNCP (Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu)

MNCP kodu Simülasyonları ve takım modelleri içeren, nükleer özellikleri var olan fizik ve matematik konularını kapsamaktadır. Üç boyutlu geometrilerde nötron, foton ve elektronların zaman bağlı sürekli olarak enerji hesabı için kullanılmaktadır.

MNCP 40000 satır FORTRAN içeren 1000 satır C kodlayıcı programını kullanan genel bir programdır. Bu metod, 1940 yıllarında Los Alamos da nükleer teknolojide kullanılmış koddur. Bu teknoloji eskilere dayanmaktadır. 2. Dünya savaşında ki bilim adamları ilk atom bombasını geliştirmişlerdir [29].

MNCPa metodu 1993 de çıkarıldı ve gelişmiş istatistiksel özelliklere sahiptir. Paralel etkileşimde olan bir grup fazla görev fonksiyon özelliğine sahip işlemci üzerinde, yeni foton programlarında EDNF/B-VI, renkli X-Windows grafiklerinde, periyodik sınırlarda, parçacık izlenimi yolu kullanılmaktadır.

MNCP; kalite kontrol, dökümantasyon üstünde karakterize edilir. Özellikleri; bilgisayar sistemlerindeki ilerlemeler, Monte Carlo metodundaki gelişmeler ve fizik modellerini göstermek için eklenmiştir.

Nötron parçacık taşıma hesaplamaları, sürekli enerji bilinen 3D kod MCNP5 kullanılarak Monte Carlo yöntemiyle yapıldı. MCNP5,sürekli nükleer enerji ve atomik veri bilgileri, Değerlendirilmiş Nükleer Veri Dosyası(EDNF) sistemini kullanan, sınırlı benzersiz bir geometrik yapı sağlar. Sürekli nükleer enerji ve atomik veriler kullanılır. Değerlendirilmiş nükleer veri dosyası (EDNF), EDNF/B-V ve EDNF/B-VI, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda Ulusal Nükleer Veri Merkezi tarafından koordine edilmiş ABD çalışmasıdır [30].

ENDF/B-V ve ENDF/B-VI nötron enerji rejimleri, tüm izotoplar için  $10^{-11}$  MeV ile 20 MeV ve bazı izotoplar için 150 MeV'dir. DPA değerlerini ve gaz üretimi değerlendirmek için FW yapısal malzemeleri atomik yer değiştirme kesit veri kütüphanesi CLAW-IV kullanılmıştır. Füzyon reaktör battaniyesi MNCP5 çıkışları için FORTRAN 90 dilinde yazılmış bir ara yüz programı geliştirilmiştir.

MCNP5/MCNPAS kodu ilk adımda, MCNP5 kodu hücreler, yüzeydeki nötron akıları ve reaksiyon hızlarını hesaplar. İkinci adımda CLAW-IV arayüz kodu, çıkış ve etkinlik kesit veri kitaplığındaki gerekli bilgileri okur. Son adımda TBR, DPA, gaz üretimi ve nükleer ısıtma gibi nötronik performans değerlerini ara yüz kodu hesaplar [31].

MNCP'de kullanılanlar;

Uzunluk (cm) cinsinden

Enerji (MeV) cinsinden

Zaman (sn) cinsinden

Sıcaklık (kT) cinsinden

Atomik yoğunluk (atom/barn.cm) cinsinden

Kütleli yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>) cinsinden

Tesir kesiti (barn) cinsinden, 1barn= 10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>

Isıtma sayısı (MeV/çarpışma) cinsinden

Avagadro sayısı=6,025x10<sup>23</sup>

Giriş dosyası formları;

Mesaj bloğu

Boşluk

Tek satır problem başlığı kartı

Hücre kartları

Boşluk

Yüzey kartları

Boşluk

Bilgi kartları

Boşluk

Bütün satırlar 80 sütunla sınırlıdır. Alfabetik karakterler büyük, küçük veya karışık olabilir. Hücre numarası ilk giriştir. İlk beş sütunla başlar. Bir sonraki giriş materyal numarasıdır ve isteğe bağlı tercih edilir. Materyal, aynı materyal numarasına sahip bir materyal kartta (Mn) belirlenir, hücre boşsa materyal numarası sıfırdır. Hücre ve materyal numaraları 5 karakterdir ve aşmamalıdır. Hücre materyal yoğunluk değeri girilir ve pozitif bir girişse atom yoğunluğu (gr/cm<sup>3</sup>), negatif bir girişse kütleli

yoğunluk( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) değerini verir. Boş hücre için yoğunluk değeri girilmez. Örnek problem için hücre kartları aşağıda belirtilmiştir [32].

1	1	-0,0014	-7
2	2	-7,86	-8
3	3	-1,60	1 -2 -3 4 -5 6 7 8
4	0		-1 : 2 : 3 : -4 : 5 : -6

X,Y,Z eksenlerine normal düzlemler, iki genel küre olarak kullanılır. PX, PY, PZ ve S'de yüzey kartları girişleri ve hücre kartları için denklemler aşağıdaki çizelge 3.4 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Yüzey denklemleri.

KONUM	DENKLEM	KART GIRISI
PX	$x-D=0$	D
PY	$y-D=0$	D
PZ	$z-D=0$	D
S	$(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2+ R^2=0$	$x' y' z' R$

C küp yüzeylerin başlangıcı:

1	PZ	-5
2	PZ	5
3	PY	5
4	PY	-5
5	PX	5
6	PX	-5

C küp yüzeylerin sonu;

7	S	0 -4 -2,5 0,5	\$Oksijen Küre
8	S	0 4 4 0,5	\$Oksijen Küre

MNCP, farklı modlarda çalışabilir.

MODE N – Sadece nötron transportu

N P – Nötron ve nötron kaynaklı foton transportu

P – Sadece foton transportu

E – Sadece elektron transportu

P E – Foton ve elektron transportu

N P E – Nötron, nötron kaynaklı foton ve elektron transportu

MNCP problemi dört kaynaktan birine sahiptir. Bunlar;

1. Genel Kaynak (SDEF Kartı)
2. Yüzey Kaynak (SSR Kartı)
3. Kritik Kaynak (KCODE Kartı)
4. Kullanıcı Destekli Kaynak'tır.

Kaynak belirtme kartı olan SDEF kart, parçacıkları açıklarken kullanılan 4 metoddan biridir ve temel kaynak parametrelerini belirtir. Bazıları şöyledir;

CEL: Başlangıçtaki hücre sayısı

ERG: Başlangıçtaki enerji

TME: Zaman

POS: X Y Z

WGT: Başlangıç aralığı

PAR: Kaynak başlangıç türü (N=1 ise N, NP, NPE, P=2 ise P, PE, E=3 ise E)

MNCP de tally sembolleri ve açıklamaları aşağıdaki Çizelge 5.2'de gösterilmektedir [33].

Çizelge 3.5. Tally sembolleri ve açıklamaları.

Uzanti Sembolleri	Aciklamasi
F1:N veya F1:P veya F1:E	Yuzey akimi
F2:N veya F2:P veya F2:E	Yuzey akisi
F4:N veya F4:P F4:E	Hucre akisinin tahmini yol uzunlugu
F5a:N veya F5a:P	Bir noktadaki aki
F6:N veya F6:N,P	Hucre uzerindeki ortalama enerji yigilimi
F7:N	Hucre uzerindeki ortalama fisyon enerji yigilimi

MNCP uygulamasının çalışmasını engelleyen program durdurma kartlarıdır. Kullanılan durdurma kartları aşağıdaki çizelge 5.3 'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. Program durdurma kartları.

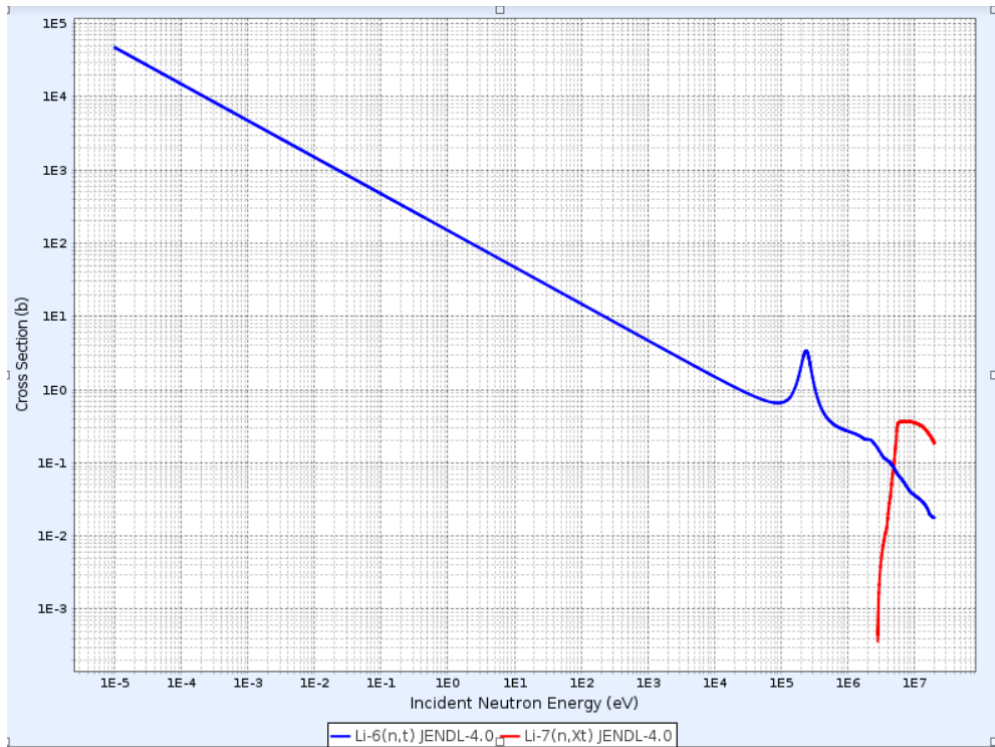
<b>Kart</b>	<b>Açıklama</b>
CUT	Durdurma
ELPT	Hücre tarafından hücre enerjisini durdurma
NPS	Parçacık hikayesini durdurma
CTME	Bilgisayar zamanını durdurma

## BÖLÜM 4

### HESAP SONUÇLARI VE TARTIŞMA

#### 4.1. TRİTYUM ÜRETİM ORANI HESAPLARI

Bu çalışmada kullanılan manto yapısında Trityum Üretim Oranının (TBR) incelenmesi için öncelikle soğutucu seçimi için literatür çalışması yapılmıştır. Seçilen soğutucular Florür ailesi erimiş tuz malzemeleri (FLiBe, FLiNaBe, FLiPb) ile LiF, doğal Li ve zenginleştirilmiş Lityum olarak belirlenmiştir. Manto yapısında nötron çoğaltıcı ve Trityum üretimine katkı sağlaması için Lityum oksit ( $\text{LiO}_2$ ) Trityum üretim bölgesi malzemesi olarak düşünüldü. Daha sonra füzyon manto yapısının performans değerlendirmeleri, karşılaştırmalar yapmak ve en iyi Trityum üretimini belirlemek için hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.1. Li-6 ve Li-7 için trityum reaksiyonu tesir kesitleri.

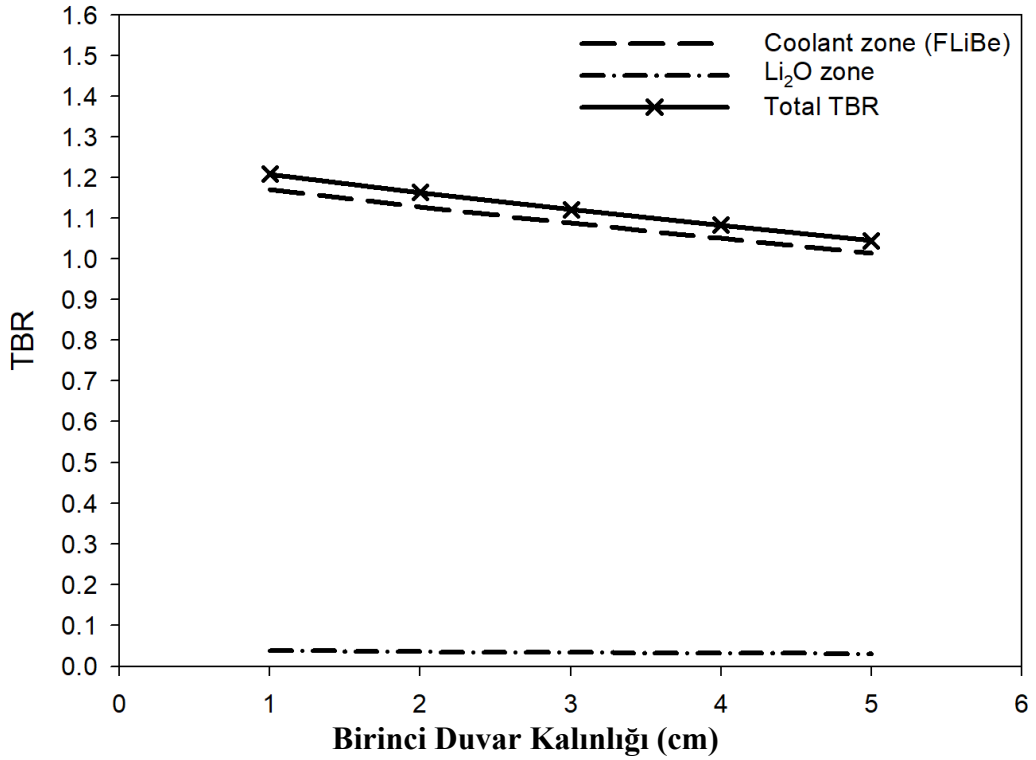


Trityum hem değerli ve aynı zamanda da radyoaktif olduğu için tehlikeli bir malzemedir. Trityumun elde edilmesi zor olduğu ve 12,3 yıllık yarı ömrü ile bozunduğu için tüketilmesi gerektiği kadar üretilmelidir. Bu nedenle, bir D-T füzyon reaksiyonunda tüketilen her Trityum için mantoda bir Trityum üretilmelidir. Bu nedenle, füzyon mantosu Trityum üreten bir malzeme içermelidir. Trityum, füzyon reaksiyonu sırasında lityum ile temas yoluyla üretilebilir. Plazmadan kaçan nötronlar, trityumu üretmek için battaniyede bulunan lityum ile etkileşime girmelidir. Bu nedenle, tek geçerli seçenek, doğal olarak Li-7 (%92,4) ve Li-6 (%7,59)'den oluşan lityumdur. Her iki izotop da trityum üretir, ancak azalan nötron enerjisiyle Li-6, Li-7'den çok daha fazlasını üretir. Bu durum Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde, termal nötronlarla trityum reaksiyonu tesir kesiti Li-6 (n,t) reaksiyonu için artarken, Li-7 (n,t)'nin trityum reaksiyon tesir kesiti hemen hemen hiç yoktur. Diğer bir deyişle, nötron enerjisinin 2,5 MeV'den büyük olduğu durumlarda Li-7 (n,t)'nin trityum reaksiyon tesir kesiti yüksek iken, Li-6 (n,t)'nin ise trityum reaksiyon tesir kesiti yok denecek kadar küçüktür.



Şekil 4.2. Berilyum (Be) ve Kurşun (Pb) için nötron çoğaltma tesir kesitleri.

Trityum üretim verimliliğini artırmak için füzyon reaktör mantosuna bir nötron çarpanı eklemek akıllıca olur. Bu nedenle içerisinde Berilyum (Be) ve Kurşun (Pb) gibi nötron çoğaltıcı malzemelerden oluşan soğutucular da füzyon reaktör mato yapısını incelemek için düşünülmektedirler. Şekil 4.2’de Berilyum (Be) ve Kurşun (Pb)’nun nötron çoğaltma tessir kesitleri (n,2n) verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.2’de Li-6 (n,t) ve Li-7’nin (n,t) trityum reaksiyonu tesir kesitleri karşılaştırmak amacıyla birlikte gösterilmiştir.



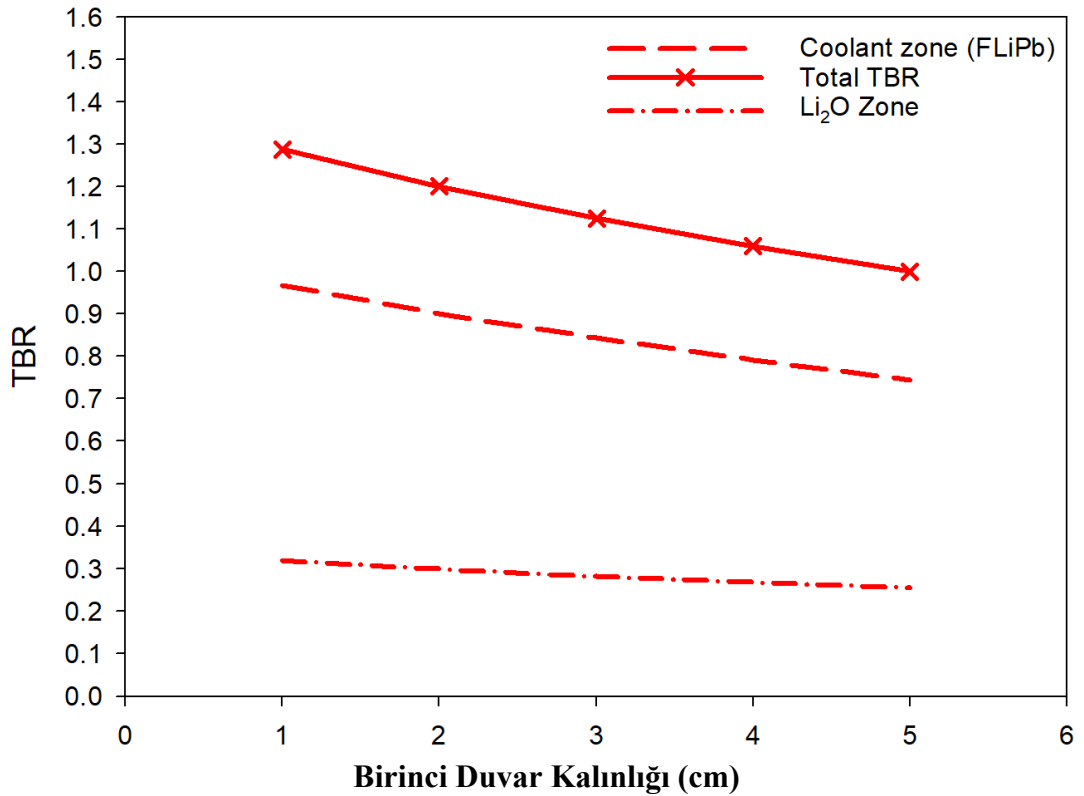
Şekil 4.3. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak FLiBe için TBR değişimi (Soğutucu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).

Füzyon manto yapısı içerisinde 50 cm kalınlığında soğutucu ve 10 cm kalınlığında Trityum Üretim bölgelerindeki Trityum Üretim Oranı (TBR) değerleri ayrı ayrı incelenmiş ve Şekil 4.3’den Şekil 4.9’a kadar olan grafiklerde verilmiştir. Lityum-kurşun (Li-Pb) ve Lityum-Berilyum (Li-Be) karışımları hem Trityum üreticisi ve hem de soğutucu akışkan görevinde görmektedir. Doğal Li, zenginleştirilmiş Li, Li-Pb ve Li-Be Flor (F) tuz karışımları birçok nükleer manto tasarımında kullanılan ötektik malzemedir. Ayrıca, yeterli trityum üreme kapasitesine de sahiptirler. Füzyon mantoda üretilen ısının uzaklaştırılması için soğutucu olması gerekir ki bu tuz karışımları aynı

zamanda soğutma görevinde yerine getirirler. Ayrıca Li-7, Be ve Pb, nötronların yüksek enerjisini Li-7(n,2n), Be(n,2n), Pb(n,2n) ve Pb(n,3n) reaksiyonuyla yavaşlatan ve aynı zamanda bir nötron çoğaltıcısı görevini de yaparlar.

Gerçekte, yüksek enerjili füzyon nötronları birinci duvardan ağır çekirdeklerle etkileşim nedeniyle yani esnek olmayan çarpışmalarla enerji kaybederek geçerler. Sonuç olarak, birinci duvar kalınlığının trityum üretim kapasitesi (TBR ) üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu etkiyi tüm TBR grafiklerinde görebiliriz (Şekil 4.3'den Şekil 4.9'a kadar).

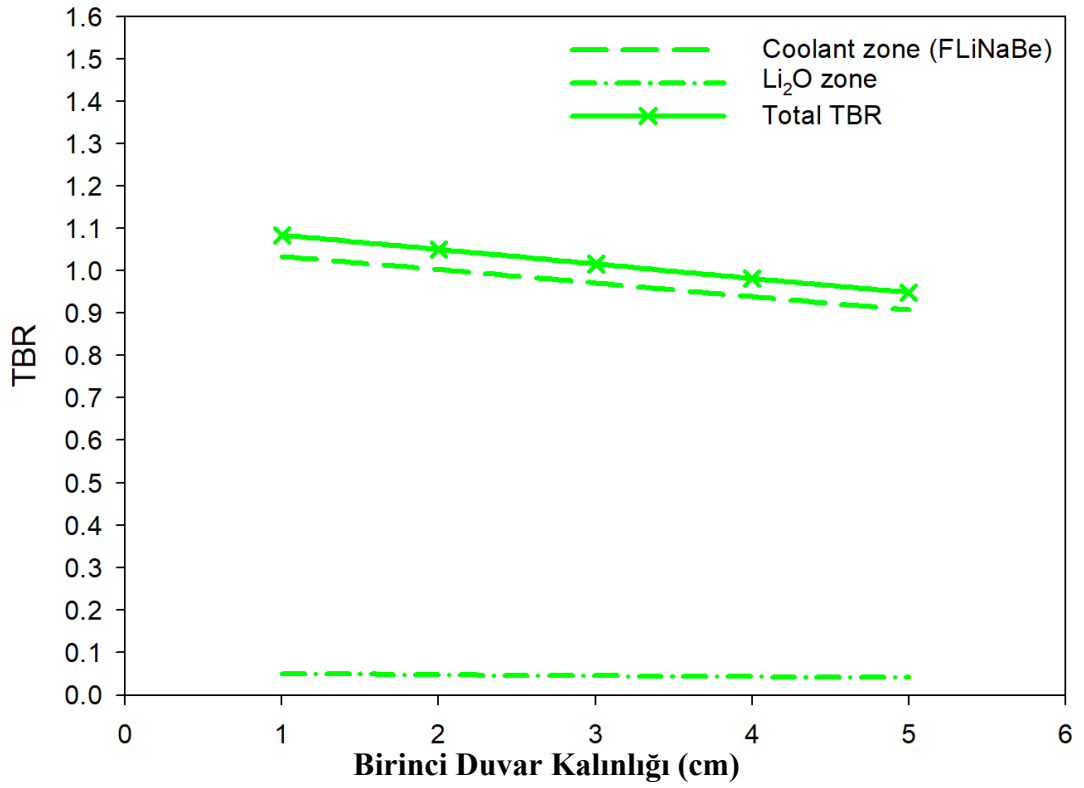
Şekil 4.3.'da görüldüğü gibi, birinci duvar malzemesi (SS 316LN-IG) 1 cm'den 5 cm'ye kalınlaştıkça TBR değerleri FLiBe soğutucu için 1.20'den 1.00'e düşmektedir. Azalma %16 olmuştur.



Şekil 4.4. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak FLiPb için TBR değişimi (Soğutucu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).

Şekil 4.4. incelendiğinde benzer olarak birinci duvar malzemesi (SS 316LN-IG) 1 cm'den 5 cm'ye kalınlaştıkça TBR değerleri FLiPb soğutucu için 1.28'den 1.00'e düşmektedir. Bu değerler incelendiğinde, TBR'deki en yüksek azalma FLiBe soğutma sıvısı için %21 olmuştur.

Ayrıca, kurşun içeren (Pb) soğutucunun (FLiPb) toplam TBR'ye katkısı, trityum üretim bölgesi yani  $\text{LiO}_2$  bölgesinde trityum üretiminde keskin bir artış olduğu açıkça Şekil 4.4.'de görülmektedir. FLiPb için bu artış toplam TBR değerini de yükseltmiştir.

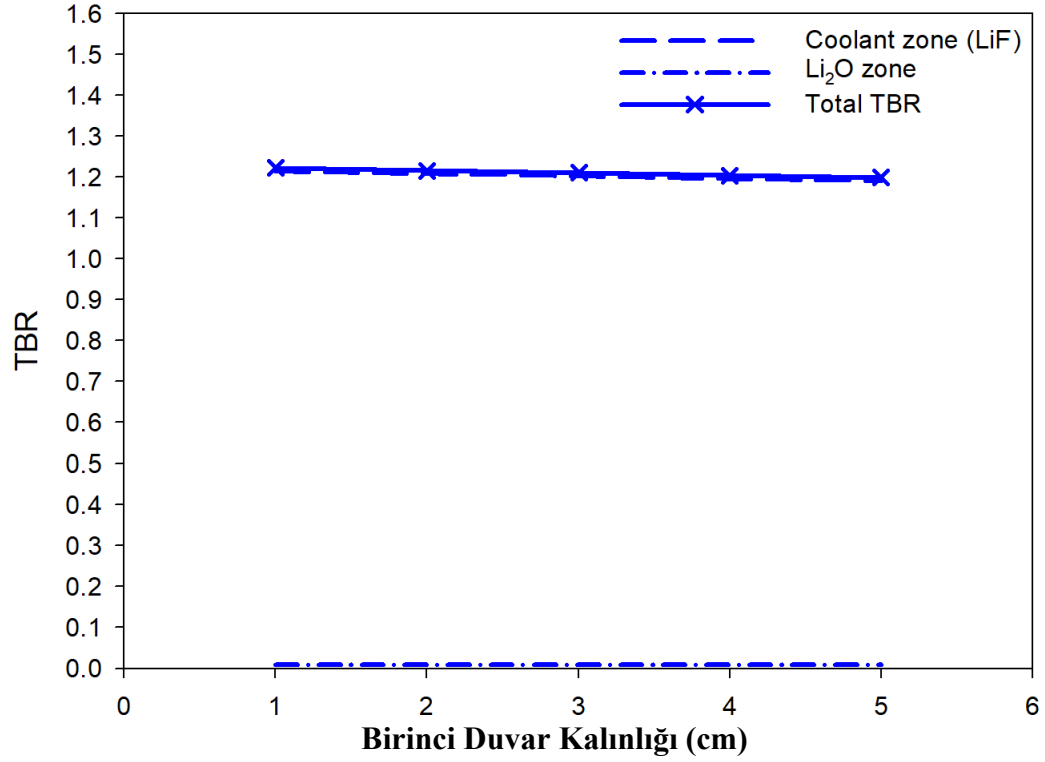


Şekil 4.5. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak FLiNaBe için TBR değişimi (Soğutucu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).

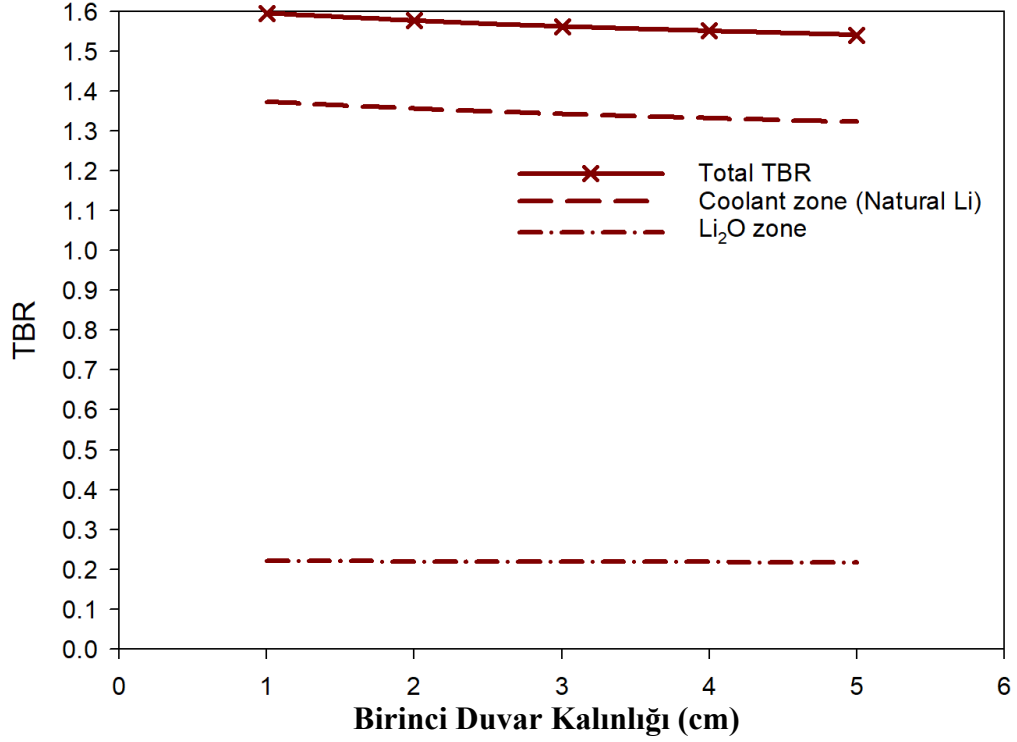
Aynı durum Şekil 4.5. için birinci duvar malzemesi (SS 316LN-IG) 1 cm'den 5 cm'ye kalınlaştıkça TBR değerleri FLiNaBe soğutucu için 1.08'den 0.94'e düşmekte ve düşüş oranı %13'dür.

Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak doğal LiF soğutucusu için TBR değişimi soğutucu ve trityum üretim bölgeleri için ayrı ayrı Figure 4.6.'da verilmiştir. Şekil

incelendiğinde birinci duvar malzemesi (SS 316LN-IG) 1 cm'den 5 cm'ye kalınlaştıkça TBR değerleri LiF soğutucu için 1.22'den 1.18'e düşmüştür. Bu azalmanın oranı %3 civarındadır.

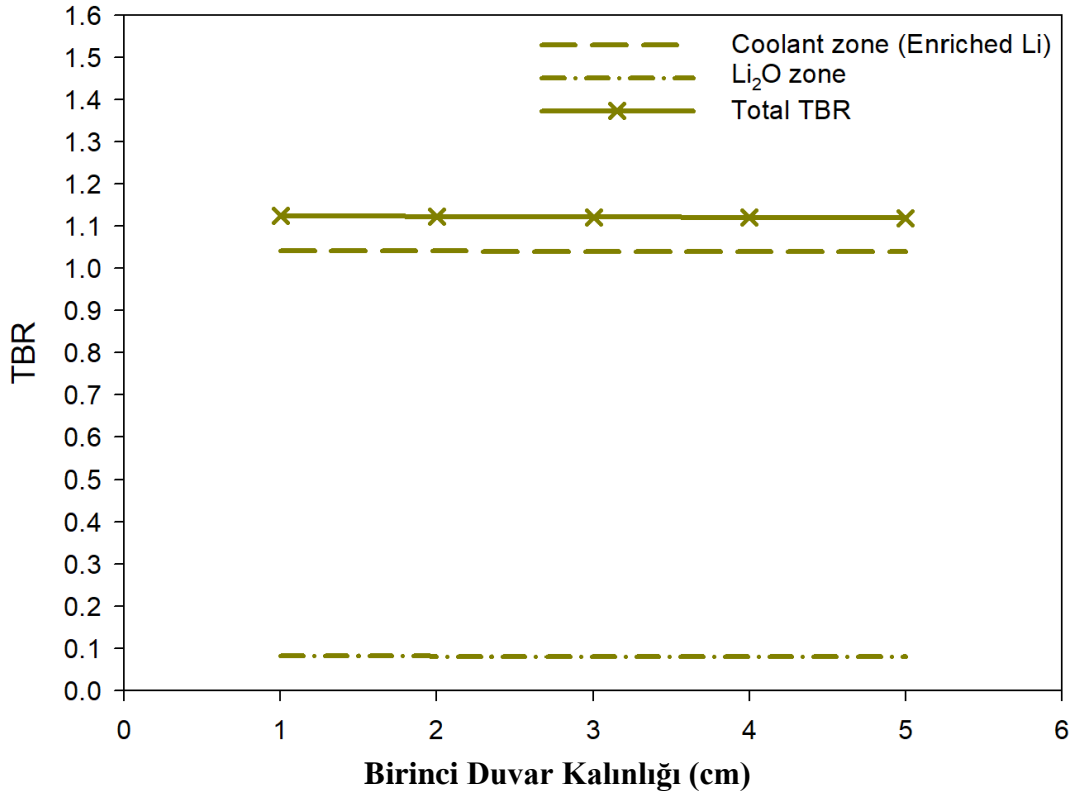


Şekil 4.6. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak LiF için TBR değişimi (Soğutucu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).



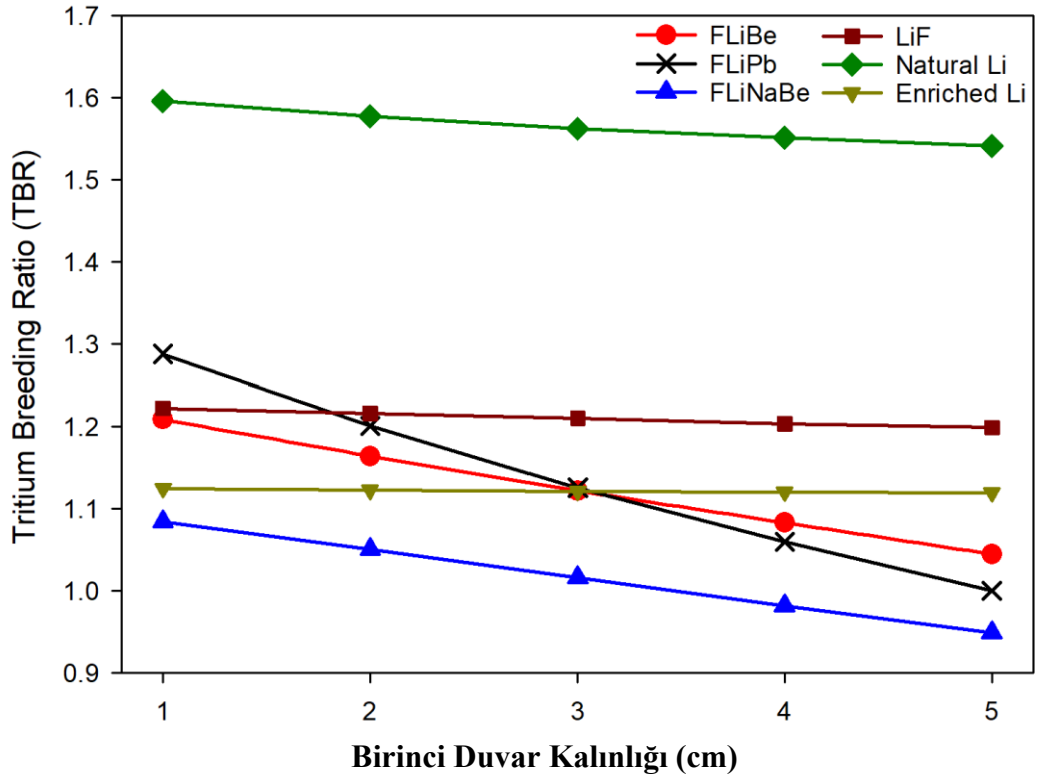
Şekil 4.7. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak doğal Li için TBR değişimi (Soğutucu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).

Figure 4.7. birinci duvar kalınlığına bağlı olarak doğal Lityum için TBR değişimi soğutucu ve trityum üretim bölgeleri için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.7.'den anlaşılacağı üzere birinci duvar malzemesi (SS 316LN-IG) 1 cm'den 5 cm'ye kalınlaştıkça TBR değerleri doğal Li soğutucu için 1.60'den 1.54'e düşmekte ve düşüş oranı ise %4 civarındadır. Nötron enerjisinin 2,5 MeV'den büyük olduğu durumlarda Li-7 (n,t)'nin trityum reaksiyon tesir kesiti yüksek iken, Li-6 (n,t)'nin ise trityum reaksiyon tesir kesiti yüksek enerji aralığında yok denecek kadar küçüktür. Bu yüzden doğal Lityum içerisinde Li-7 (%92,4)'nin etkisi oldukça yüksek olduğu için toplam TBR değeride tüm soğutular içerisinde en yüksek değere sahip olduğu sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak zenginleştirilmiş Li için TBR değişimi (soğutucu ve trityum üretim bölgeleri ayrı ayrı verilmiştir).

Şekil 4.8. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak Zenginleştirilmiş Li (%90 Li-6) için TBR değişim soğutucu ve trityum üretim bölgeleri için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.8.'den incelendiğinde birinci duvar malzemesi (SS 316LN-IG) 1 cm'den 5 cm'ye kalınlaştıkça TBR değerleri Zenginleştirilmiş Li soğutucu için 1.12'den 1.1'e düşmektedir. Termal nötronların Li-6 (n,t)'nin trityum reaksiyon tesir kesiti oldukça yüksek olması ve füzyon manto yapısındaki yüksek enerjili nötronların etkisi yüksek olduğu için toplam TBR değeri düşük olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Birinci duvar kalınlığına bağlı olarak tüm soğutucular için TBR değişimi.

Şekil 4.9.'de altı farklı soğutucu için toplam TBR değeri verilmiştir. Şekil incelendiğinde en iyi performansı doğal lityum soğutucusunun verdiği görülmektedir.



## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ITER parametrelerine bağlı kalınarak bir manyetik füzyon manto yapısı belirlenerek soğutucu olarak florür erimiş tuz malzemeleri (FLiBe, FLiNaBe, FLiPb) ile LiF, doğal Li ve zenginleştirilmiş Li kullanılmıştır. Manto yapısında trityum üretim malzemesi olarak ise LiO<sub>2</sub> göz önüne alınmıştır. Nötronik analizler ve hesaplamalar MCNP5 bilgisayar programı ve EDNF/B-V ve EDNF/B-VI nükleer veri kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır. Bu manto yapısına yerleştirilen TBR değerleri karşılatırılmıştır.

Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Birinci duvar malzemesi olarak SS 316LN-IG paslanmaz çeliği 1 cm'den 5 cm'ye kadar ele alınmıştır.
- Birinci duvar kalınlığı arttıkça;
  - ✓ FLiBe soğutucu için TBR değerleri 1.20'den 1.00'e düşmekte,
  - ✓ FLiPb soğutucu için TBR değerleri 1.28'den 1.00'e düşmekte,
  - ✓ FLiNaBe soğutucu için TBR değerleri 1.08'den 0.94'e düşmekte,
  - ✓ LiF soğutucu için TBR değerleri 1.22'den 1.18'e düşmekte,
  - ✓ Doğal Li soğutucu için TBR değerleri 1.60'den 1.54'e düşmekte
  - ✓ Zenginleştirilmiş Li soğutucu için TBR değerleri 1.12'den 1.1'e düşmektedir.
- Altı farklı soğutucu için toplam TBR değerleri incelendiğinde en iyi performansı doğal lityum soğutucusu olduğu anlaşılmıştır.

Aşağıdaki öneriler verilmiştir.

- Plazmadan kaçan nötronlar, trityumu üretmek için battaniyede bulunan lityum ile etkileşime girmelidir.
- Termal nötronlarla trityum reaksiyonu tesir kesiti Li-6 (n,t) reaksiyonu için artarken, Li-7 (n,t)'nin trityum reaksiyon tesir kesiti çok küçüktür.
- Trityum üretim verimliliğini artırmak için tuz içerisine Be ve Pb gibi nötron çoğaltıcı malzemelerden oluşan ötektik soğutucular da füzyon reaktör materyal yapısını incelemek için düşünülmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] I. Hore, *Nuclear Energy*, The Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, (1997)
- [2] Tunç, G. (2017). Toryumun ve Çeşitli Nükleer Yakıtların Performanslarının Bir Füzyon-Fisyon Reaktör Sisteminde Nötronik Olarak İncelenmesi, (Doktora Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [3] IAEA, *Comparative Assessment of Nuclear Power and other Energy Sources, Annual Report*, (1994)
- [4] Şahin, S., Baltacıoğlu, E., Yapıcı, H., “Potential of a catalyzed fusion driven hybrid reactor for the regeneration of CANDU spent fuel,” *Fusion Technology*, 20:26-39 1991.
- [5] S.Ünalın “Rejuvenation of CANDU Spent Fuel in (D,T) Driven Hybrids Reactors”, *Fusion Technology*, 33(4):398-417, 1998.
- [6] ŞAHİN, H. M., TUNÇ, G., ŞAHİN, N., *Investigation of Tritium Breeding Ratio Using Different Coolant Material in a Fusion-Fission Hybrid Reactor, International Journal of Hydrogen Energy*, vol.41, no.17, s.7069-7075, 2016
- [7] CATALÁN, J., OGANDO, F., SANZ, J., PALERMO, I., VEREDAS, G., GÓMEZROS, J., SEDANO, L., *Neutronic Analysis of a Dual He/LiPb Coolant Breeding Blanket for DEMO, Fusion Engineering and Design*, vol.86, no.10, s.2293-2296, 2011.
- [8] ŞAHİN, S., ÜBEYLİ, M., Modified APEX Reactor as A Fusion Breeder, *Energy Conversion and Management*, vol.45, no.9, s.1497-1512, 2004.
- [9] ÜBEYLİ, M., On the Tritium Breeding Capability of Flibe, Flinabe, and Li<sub>20</sub>Sn<sub>80</sub>in a Fusion-Fission (Hybrid) Reactor, *Journal of Fusion Energy*, vol.22, no.1, s.51-57, 2003.
- [10] ZANDİ, N., SADEGHİ, H., HABİBİ, M., JALALI, I., ZARE, M., Blanket Simulation and Tritium Breeding Ratio Calculation for ITER Reactor, *Journal of Fusion Energy*, vol.34, no.6, s.1365-1368, 2015.
- [11] İSHİBASHİ, K., FUJİMOTO, S., MATSUMOTO, T., An Optimization Study of Structure Materials, *Coolant and Tritium Breeding Materials for Nuclear FusionFission Hybrid Reactor, Progress in Nuclear Science and Technology*, vol.4, s.130-133, 2014.

- [12] SATO, S., NISHITANI, T., Impact of Armor Materials on Tritium Breeding Ratio in the Fusion Reactor Blanket, *Journal of Nuclear Materials*, vol.313, no.316, s.690-695, 2003.
- [13] ŞAHİN, S., ŞAHİN, H. M., SÖZEN, A., Evaluation of the Neutron and GammaRay Heating in the Radiation Shielding and Magnet Coils of the VISTA Spacecraft, *Fusion Technology*, vol.33, no.4, s.418-434, 1998.
- [14] Şahin, H. M., Monte Carlo calculation of radiation damage in first wall of an experimental hybrid reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 34(11), 861-870. 2007
- [15] Şahin, H. M., et al.. Monte Carlo calculation for various enrichment lithium coolant using different data libraries in a hybrid reactor. *Energy Conversion and Management*, 49(7), 1960-1965. 2008
- [16] Y. Horibe and N. Oguba, "Deuterium content as a parameter of water mass in the ocean," *Journal of Geophysical Research*, vol. 73, no. 4, 1968.
- [17] B.B. Kadomtsev, *Tokamak Plasma: A Complex Physical System*, Çeviri editörü: E.W. Laing, Institute of Physics Publishing, *Bristol and Philadelphia* (1992).
- [18] The TOKAMAK, <http://www.ccf.ac.uk/Tokamak.aspx>, (Erişim: 29.07.2019)
- [19] Nuclear Fusion, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fusion.html#c2> (Erişim: 26.07.2019).
- [20] Garry McCracken, Peter Stott, Chapter 13 - Fusion Power Plants, ed. by Garry McCracken, Peter Stott, *Fusion (Second Edition)*, (Academic Press, 2013), p. 165-187 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384656-3.00013-1> (2013).
- [21] D. F. Williams et al., "The Influence of Lewis Acid/Base Chemistry on the Removal of Gallium by Volatility from Weapons Grade Plutonium Dissolved in Molten Chlorides," *Nuclear Technology*, **136**, p. 367 (2001).
- [22] G. J. Janz, *Molten Salts Handbook*, Academic Press, NY, 1967.
- [23] S. I. Cohen, W. D. Powers, and N. D. Greene, Viscosity Measurements on Molten Fluoride Mixtures, ORNL-2278, *Oak Ridge National Laboratory*, Oak Ridge, TN, 1957.
- [24] S. Cantor, W. T. Ward, and C. T. Moynihan, "Viscosity and Density in Molten LiF-BeF<sub>2</sub> Solutions," *Journal of Chemical Physics*, 50(7), p. 2874 (1969).
- [25] S. I. Cohen, W. D. Powers, and N. D. Greene, Viscosity Measurements on Molten Fluoride Mixtures, ORNL-2278, *Oak Ridge National Laboratory*, Oak Ridge, TN, 1957.
- [26] E. Veliyulin, A. Voronel, and H. A. Oye, "Universal Features in the Viscosity Behavior of Salt Melts and Their Mixtures," *Journal of Physics: Condensed Matter*, 7, p. 4821 (1995).

- [27] K. Cornwell, “The Thermal Conductivity of Molten Salts,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, pp. 441–45 (1971).
- [28] Şahin, H.M., Tunç, G., Karakoç, A., Omar, Melood Mohamad. Neutronic study on the effect of first wall material thickness on tritium production and material damage in a fusion reactor. *Nuclear Science and Techniques*, 33,43 (2022).
- [29] J.Briesmeister, RSIC Computer Code Collection MCNP, Monte Carlo N-Particle Transport Cod System, *Los Alamos National Laboratory*, New Mexico, (1993).
- [30] R. Johnston, *General Monte Carlo Neutronics Code*, LAMS-2856, Los Alamos (1963).
- [31] D. B. Pelowitz, *MCNPX User’s Manual, Version 2.5.0*, LA-CP-05-0369 (2005).
- [32] J. S. Hendricks, et al., *MCNPX Extensions, Version 2.5.0*, LA-UR-05-2675 (2005).
- [33] POST, R., Summary of UCRL Pyrotron Programme, *Journal of Nuclear Energy vol.7*,no.3,s.282,1954.

## ÖZGEÇMİŞ

Bilge MENGÜLLÜOĞLU, ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Antakya Nimet Fahri Öksüz Lisesi'nden mezun oldu. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2017 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2017-2018 yılında Prizma Electrical Industry (ANAGOLD Erzincan Şantiyesi) de Kalite Kontrol Mühendisi olarak çalıştı. 2018-2019 yılında Prizma Electrical Industry (TANAP PROJESİ MS3 Şantiyesi) de Kalite Kontrol Şefi olarak çalıştı. 2021 yılında AKSA 240 MW CCPP Relocation Project Manisa demontaj , 2021-2022 AKSA 480 MW CCPP Relocation Project Özbekistan'da montaj projesinde Kalite Kontrol Mühendisi olarak çalıştı. 23.05.2022 tarihinde itibaren Yamata Yatırım İnşaat Amur Gas Processing Plant projesinde Elektrik Mühendisi olarak çalışmaya devam ediyor.