

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR MANYETİK FÜZYON NÜKLEER REAKTÖRÜNÜN
NÖTRONİK ANALİZİNİN YAPILMASI

ALPER KARAKOÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
2019

**BİR MANYETİK FÜZYON NÜKLEER REAKTÖRÜNÜN
NÖTRONİK ANALİZİNİN YAPILMASI**

**NEUTRONIC ANALYSIS OF A MAGNETIC FUSION
NUCLEAR REACTOR**

ALPER KARAKOÇ

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır

2019

“Bir Manyetik Füzyon Nükleer Reaktörünün Nötronik Analizinin Yapılması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 09/09/2019 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Üye (Danışman) :
Dr. Öğretim Üyesi Özgür EROL

Üye :
Prof. Dr. Adem ACIR

Üye :
Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

Üye :
Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK

ONAY

..../..../2019

Prof. Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 23/09/2019

Öğrencinin Adı, Soyadı : Alper KARAKOÇ

Öğrencinin Numarası : 21710408

Anabilim Dalı : Enerji Mühendisliği

Programı : Enerji Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Adı, Soyadı : Dr. Öğr. Üyesi Özgür EROL

Eş Danışmanın Adı, Soyadı : Prof. Dr. Sümer ŞAHİN

Tez Başlığı : Bir Manyetik Füzyon Nükleer Reaktörünün Nötronik Analizinin Yapılması

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 50 sayfalık kısmına ilişkin, 18/09/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

"Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esasları"nı inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası

ONAY

23/09/2019

ONAY

23/09/2019

Öğrenci Danışmanı Dr. Öğr. Üyesi Özgür EROL

Öğrenci Eş Danışmanı Prof. Dr. Sümer ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin ders aşamasından başlayarak, tez çalışmamın bitimine kadar bana rehberlik eden ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Özgür EROL hocama en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Lisans eğitimimin ders aşamasından başlayarak, çalışmalarım boyunca beni daima destekleyen, bilgi ve deneyimi ile beni yönlendirerek benim bu çalışmayı yapmaya teşvik eden tez eş danışmanım Prof. Dr. Sümer ŞAHİN hocama bu süreçte gösterdiği anlayış ve desteği için bir teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışması sürecinde, çok değerli tecrübe ve bilgilerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN ve Dr. Öğretim Üyesi Güven TUNÇ hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde sonsuz desteği ve sabrı ile yanımda olan aileme beni bugünlere getirdikleri için sonsuz teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca destek ve katkılarını benden esirgemeyen değerli dostlarım, Öğr. Görevlisi Yalım GÜLTEKİN, Filolog Filiz İrem ULUSOY, Yazılım Müh. Enes Kaan KORUKLUOĞLU ve geleceğin mimar adayı Burçin Emine CAN'a teşekkür ederim.

Son olarak, lisans eğitimim esnasında kaybettiğim çok değerli dostum Kubilay TÜRK'ü özlemle anıyor ve bu çalışmayı onun aziz hatırasına atfediyorum.

ÖZ

BİR MANYETİK FÜZYON NÜKLEER REAKTÖRÜNÜN NÖTRONİK ANALİZİNİN YAPILMASI

Alper KARAKOÇ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmada, ilk duvar yükü 5 MW/m^2 ve 500 MW füzyon gücü değeri için küresel geometride manyetik füzyon reaktörü modellemesi tamamlanmıştır. Modellenen füzyon reaktöründe plazma bölgesinde D-T yakıtı kullanılmıştır. Yapılan sekiz farklı model kapsamında ilk duvar bölgesinde 1DS-ODS çeliği, SiC ve reaktörün soğutucu bölgesinde FLiBe, FLiNa, FLiNaK ve Li malzemeleri kullanılmış olup değişen ilk duvar ve soğutucuların reaktörün nötronik performansına etkileri incelenmiştir.

Çalışmada ilk olarak, değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre oluşturulan sekiz farklı modelin trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), reaktörde üretilen ısı ve elektrik gücü değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, reaktörün her katmanı için ısı akısı, nükleer ısı üretimi, ilk duvar bölgesinde ki gaz üretimi ve DPA değerleri hesaplanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, soğutucu malzemesindeki lityum izotoplarının yoğunluk değerleri ile TBR, M ve reaktörde üretilen güç değerlerinin doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Çalışmanın ilk dört modelinde ilk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS çeliği kullanıldığında gaz üretimi ve DPA değerlerinin SiC kullanılan modellere göre çok daha düşük miktarda olduğu tespit edilmiştir. İlk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS çeliği ve soğutucu malzeme olarak FLiBe kullanılan birinci modelin bütün hesaplamalar göz önünde bulundurulduğunda en uygun model olduğu görülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Manyetik Füzyon, TBR, Enerji Çoğaltım Faktörü, Gaz Üretimi, DPA

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Özgür EROL, Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü.

Eş Danışman: Prof. Dr. Sümer ŞAHİN, Bahçeşehir Üniversitesi Enerji Sistemleri
Mühendisliği Bölümü



ABSTRACT

NEUTRONIC ANALYSIS OF A MAGNETIC FUSION NUCLEAR REACTOR

Alper KARAKOÇ

Başkent University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Engineering

In this study, magnetic fusion reactor modeling with spherical geometry has been completed for the first wall load 5 MW/m^2 and 500 MW fusion power. In the modeled fusion reactor, D-T fuel was used in the plasma region. Within the scope of eight different models, 1DS-ODS steel, SiC in the first wall region and FLiBe, FLiNa, FLiNaK and Li materials were used in the cooling zone of the reactor.

In the study, firstly, tritium breeding ratio (TBR), energy multiplication factor (M), heat and electric power values of the reactor were calculated for eight different models, which were formed according to the changing first wall and cooling materials. In the second stage of the study, for each layer of reactor heat energy, in the first wall region gas production and DPA values were calculated. As a result of the study, it was observed that the density of lithium isotopes in the coolant material and produced in the reactor TBR, M and reactor power values were directly proportional. In the first four models of the study, when 1DS-ODS steel was used as the first wall material, gas production and DPA values were found to be much lower than models which contains SiC as a first wall material. The first model, which uses 1DS-ODS steel as the first wall material and FLiBe as the cooling material, is the most suitable model considering all the calculations.

Keywords: Magnetic Fusion, TBR, Energy Multiplication Factor, Gas Production, DPA

Advisor: Asts. Prof. Dr. Özgür EROL, Başkent University Department of Mechanical Engineering.

Co-Advisor: Prof. Dr. Sümer ŞAHİN, Bahçeşehir University Department of Energy Systems Engineering.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1. Temel Kavramlar.....	1
1.2. Literatür Taraması.....	3
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı	6
2. FÜZYON REAKTÖRLERİ.....	7
2.1 Füzyon	7
2.2. Füzyon Yakıtları	7
2.2.1. Döteryum	7
2.2.2. Tritiyum.....	7
2.3. Füzyon Reaksiyonları.....	8
2.3.1. Döteryum – Döteryum (D-D) Reaksiyonları	9
2.3.2. Döteryum – Tritiyum (D-T) Reaksiyonları	10
2.4. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması.....	11
2.5. Füzyon Reaktörleri	12
2.6. Füzyon Reaksiyonunun Gerçekleşmesi İçin Gereken Koşullar	13
2.6.1. Sıcaklık	13
2.6.2. Yoğunluk.....	14
2.6.3. Sınırlandırma Süresi	14
2.7. Manyetik Sınırlandırma	15

2.7.1. TOKAMAK	15
2.7.2. Stellarator	17
2.7.3. Manyetik Aynalar	18
2.8. Manyetik Füzyon Reaktörünün Manto Yapısı	19
2.8.1. Yakıt Bölgesi.....	20
2.8.2. Birinci Duvar Bölgesi.....	21
2.8.3. Soğutucu Bölgesi	21
2.8.4. Yansıtıcı Bölgesi	21
2.8.5. Yalıtım Bölgesi.....	22
2.8.6. Boşluk Bölgesi	22
2.8.7. Mıknatıs Bölgesi.....	22
3. METOD VE YÖNTEM	23
3.1. Teori.....	23
3.1.1. Yoğunluk Hesaplamaları.....	23
3.1.2. Nötron Taşınım Denklemi	24
3.1.3. Reaktör Güç Dengesi Hesaplamaları.....	25
3.2. Sayısal Hesaplama Yöntemi	26
3.2.1. Monte Carlo N – Parçacık Taşınım Kodu (MCNP).....	26
4. SAYISAL SONUÇLAR VE İRDELEME	27
4.1. İzotop Yoğunlukları	28
4.2. Tritiyum Üretim Oranı (Tritium Breeding Ratio).....	29
4.3. Enerji Çoğaltım Faktörü	31
4.5. Isı Akısı ve Nükleer Isı Üretimi	34
4.6. Gaz Üretimi	35
4.7. Atom Başına Yer Değiştirme (Displacement Per Atom).....	36
4.8. Sayısal Sonuçların Değerlendirilme Esasları	38
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	40

5.1. Sonuçlar	40
5.2. neriler	41
6. KAYNAKLAR.....	42
7. EKLER	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Tritiyum üretim reaksiyonunun temsili resmi.....	8
Şekil 2.2. Döteryum-Döteryum füzyon reaksiyonunun temsili resmi (DDn)	9
Şekil 2.3. Döteryum-Döteryum füzyon reaksiyonunun temsili resmi (DDp)	10
Şekil 2.4. Döteryum-Tritiyum füzyon reaksiyonunun temsili resmi	11
Şekil 2.5. TOKAMAK'ın temsili resmi	16
Şekil 2.6. Torus yüzeyindeki toroidal ve poloidal manyetik alanlar	17
Şekil 2.7. Manyetik aynaların temsili resmi.....	18
Şekil 2.8. Manyetik füzyon reaktörünün manto yapısı	20
Şekil 4.1. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre sekiz modelin TBR değerleri	30
Şekil 4.2. Sekiz reaktör modelinde yer alan ^6Li ve ^7Li izotoplarının tritiyum üretim oranları	32

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Başlıca TOKAMAK cihazları	3
Çizelge 4.1. Manyetik füzyon reaktöründe kullanılan birinci duvar ve soğutucu malzemeleri	27
Çizelge 4.2. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre sekiz modelin TBR değerleri.....	29
Çizelge 4.3. Sekiz reaktör modelinin enerji çoğaltım faktörü değerleri	31
Çizelge 4.4. Modellenen manyetik füzyon reaktörünün temel parametreleri	33
Çizelge 4.5. Sekiz reaktör modelinin ısı ve elektrik gücü değerleri	33
Çizelge 4.6. Sekiz reaktör modelinin ısı akısı değerleri.....	34
Çizelge 4.7. Sekiz reaktör modelinin nükleer ısı üretimi değerleri	35
Çizelge 4.8. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre H ve ^4He izotoplarının üretim miktarları	36
Çizelge 4.9. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemesine göre DPA değerleri	37
Çizelge 4.10. Sekiz modelin ilk duvar değişim periyotları.....	37
Çizelge 4.11. Çalışmadaki sekiz reaktör modelinin sayısal sonuçları.....	39
Çizelge 7.1. Çalışmada kullanılan sekiz modelde ^6Li ve ^7Li izotoplarının TBR katkısı	54
Çizelge 7.2. Birinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları.....	46
Çizelge 7.3. İkinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları	47
Çizelge 7.4. Üçüncü modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları	48
Çizelge 7.5. Dördüncü modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları ...	49
Çizelge 7.6. Beşinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları	50
Çizelge 7.7. Altıncı modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları.....	51
Çizelge 7.8. Yedinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları	52
Çizelge 7.9. Sekizinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

R	Çap (m)
B	Manyetik alan (T)
I	Plazma akımı (MA)
K	Kelvin
akb	Atomik kütle birimi
c	Işık hızı (MeV/akb)
N	Atom yoğunluğu (atom/cm ³)
ρ	Malzeme yoğunluğu (gram/cm ³)
N _A	Avogadro sayısı (atom/mol)
A	İzotopun atom kütlesi (g/mol)
ϕ	Nötron akısı (nötron/cm ² s)
T	Zaman (s)
eV	Elektronvolt
E	Nötron enerjisi (eV)
Σ	Makroskobik tesir kesiti (cm ⁻¹)
N	Nötron sayısı (nötron/cm ³)
MCNP	Monte Carlo N – Parçacık Taşınım Kodu
TBR	Trityum üretim oranı
α	Alfa ışıması
M	Enerji çoğaltım faktörü
DPA	Atom başına yer değiştirme
FPY	Tam güç yılı

1.GİRİŞ

1.1. Temel Kavramlar

Günümüzde teknolojik gelişimin en önemli ölçütlerinden birisi enerji tüketimidir. Söz konusu gelişimin bir ölçütü olarak enerji tüketimi ülkelerin gelişmişliği ile doğru orantılı olarak yükselmektedir ve insanlık yükselen bu enerji tüketimini karşılayabilmek için mevcut enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına ve yeni enerji kaynaklarının araştırılması ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir.

Araştırılmakta olan bu enerji kaynaklarından en önemlisi nükleer enerjidir. Yapılmış olan araştırmalar ve mevcut santrallerin detaylı analizleri incelendiğinde, sürdürülebilir ve çevreci enerji üretim imkanını sunan tek enerji kaynağının nükleer enerji olduğu görülmektedir. Nükleer enerji, yenilenebilir enerji üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok daha büyük miktarda enerjiyi günün her saatinde ve aynı miktarda tüketiciye sunmaktadır. Aynı zamanda, nükleer enerji ve nükleer enerjinin üretim yöntemleri fosil yakıtların kullanıldığı enerji üretim tesisleri ile kıyaslandığında çok daha küçük hacimlerde, daha az yakıt tüketimi ve sıfır karbon salınımı ile tüketiciye ihtiyaç duyulan enerjiyi sürdürülebilir bir şekilde sağlamaktadır.

Günümüzdeki nükleer güç santralleri atomun parçalanması ile enerjinin elde edildiği fisyon reaksiyonlarını kullanır. Bir fisyon reaksiyonunun oluşması için iki tip tetikleyiciden birisi kullanılmaktadır: Termal ve hızlı nötronlar. Günümüzde işletilmekte olan nükleer santrallerin büyük bir kısmı fisyon tepkimelerini gerçekleştirmek için termal nötronları kullanmaktadır. Bu tip reaktörlerde fisyon sonucu ortaya çıkan hızlı nötronlar su, ağır su veya grafit kullanılarak yavaşlatılır ve enerjisi termal enerji adı verilen seviyeye indirilir. VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor, Hafif su moderatörlü), GT-MHR (Gas Turbine-Modular Helium Reactor, Grafit moderatörlü) ve CANDU (CANada Deuterium Uranium, Ağır su moderatörlü) reaktörleri bu tip reaktörlere örnektir. Fisyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılan uranyum ve plütonyum rezervlerinin sınırlı olması fisyon reaktörlerinde sürdürülebilir enerji üretiminin önündeki en büyük engeldir. Fisyon reaktörlerinin işletilmesi sırasında açığa çıkan uzun ve kısa ömürlü radyoaktif atıklar protokollere uygun depolanmadığı takdirde çevre felaketlerine sebep olabilmektedir. Söz konusu atıkların depolanma ve çevre için risk oluşturmaları sebebi ile fisyon

reaktörlerinin işletilmesi yakıt maliyetleri ve temini açısından maliyetli olması fisyon reaktörlerinin avantajlarını baskılamaktadır.

Ancak fisyon reaktörlerinin aksine füzyon reaktörleri neredeyse sınırsız yakıt potansiyeli ile sürdürülebilir nükleer enerji ihtiyacını karşılama potansiyeline sahiptir. Füzyon reaksiyonlarında kullanılan yakıtların bol miktarda bulunması, kolay elde edilebilmesi, reaktör erimesi veya kontrol kaybı riskinin olmayışı günümüzde bilim adamları ve mühendisleri füzyon teknolojisinin uygulanabilir olması konusunda çalışmalar yapmaya şevk etmiştir. 1920'li yıllarda yapılan çalışmalarda füzyon reaksiyonlarının işleyiş prensipleri araştırılmış ve yıldızlarda üretilen enerjinin kaynağının füzyon reaksiyonları olduğu bulunmuştur [1]. Robert d'Escourt Atkinson ve Fritz Houtermans tarafından yapılan çalışmalarda, yıldızlarda gerçekleşen füzyon reaksiyonlarının matematiksek formülasyonları ve modellemeleri oluşturulmuştur [2]. Atkinson ve Houtermans yaptıkları çalışmalarda, füzyon reaksiyonlarının yıldızlardaki reaksiyonlara göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebileceğini kanıtlamışlardır. 1920'li yıllarda yapılan bu çalışmalar sayesinde 1950'li yıllarda uygulanabilirliği tartışılan füzyon reaktörlerinin gelişimi ivmelenerek hız kazanmıştır. 1951 yılında Lyman Spitzer tarafından keşfedilen Stellerator ve 1950'li yılların ortalarında keşfedilen Richard F. Post ve Gersh Budker tarafından birbirinden bağımsız çalışmarla keşfedilen manyetik ayna konsepti füzyon reaktörlerinin gelişimi incelendiğinde en önemli iki örnektir [3]. Ancak 1960'ların sonunda Sovyet araştırmaları ile geliştirilen TOKAMAK, füzyon reaktörlerinin en umut verici konfigürasyonu olarak benimsendi. 1960'lı yıllardan günümüze kadar geçen ilerleyen zamanda, TOKAMAK konfigürasyonu geliştirilmiş olup diğer füzyon reaktörlerinin aksine enerji kazancı sağlayacak konuma gelmiştir. 2010 yılında, Çin, Avrupa Birliği, Hindistan, Japonya, Rusya ve Amerika Birleşik Devletleri'nin iş birliği ile oluşturulan ve günümüzde 35 ülkeninde katkılarıyla Dünya'nın en büyük füzyon reaktörü projesi olan ITER projesinin inşaatına başlanmıştır. 2035 yılında işletmeye alınacak bu reaktör ile füzyondan net enerji kazancı sağlayan ilk füzyon reaktörü tamamlanacaktır. Bu sayede füzyon reaktörleri çok daha önemli bir konuma gelecek ve Dünya'nın enerji sorununun çözümü olabilecek seviyeye gelecektir.

1.2. Literatür Taraması

Amerikalı bilim adamı Langmuir, 1929'da plazmayı ilk kez keşfetmiş olsa da füzyon 1950'lerin başlarına kadar potansiyel bir enerji kaynağı olarak değerlendirmeyi başaramamıştır. Günümüzde manyetik füzyon, plazmanın en önemli uygulamasıdır. 1950'li yıllardan günümüze kadar manyetik füzyon reaktörleri kategorisinde TOKAMAK, Stellarator ve Manyetik Aynalar konseptleri geliştirilmiş olup çoğu deney ve çalışmada döteryum-trityum (D-T) yakıt çevrimi kullanılmıştır. Son 50 yılda gerçekleşen gelişmeler değerlendirildiğinde geleceğin manyetik füzyon enerjisi trendleride anlaşılabilir. El-Guebaly [4] tarafından yapılan çalışmada, manyetik füzyon reaktörlerinin 50 yılı ve gelecekteki trendleri değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmada, geleceğin manyetik füzyon araştırmalarının TOKAMAK cihazları üzerinde yoğunlaşacağı öngörülmüştür. Çizelge 1.1'de başlıca TOKAMAK cihazları listelenmiştir.

Çizelge 1.1. Başlıca TOKAMAK cihazları [5-8]

Cihaz	Konum	R (m)	B (T)	I (MA)
TFTR	ABD	2,4	6	3
DIII D	ABD	1,67	2,1	1,6
TSX	ABD	5,0	1,0	0,045
ASDEX-U	Almanya	1,65	3,9	1,4
TEXTOR 94	Almanya	1,75	2,8	0,8
JET	Birleşik Krallık	3,0	4	7
CFETR	Çin	5,7	5	10
ITER	Fransa	6,2	5,3	15
Tore Supra	Fransa	2,37	2,8	0,8
WEST	Fransa	2,5	3,7	1
IR-T1	İran	0,45	1,2	0,06
TCV	İsviçre	0,88	1,4	0,17
FTU	İtalya	0,93	8	1,3
JT-60	Japonya	3,4	4	3
T-10	Rusya	1,5	4,5	0,68

Yapılmakta olan çalışmalar sonucunda, günümüzde TOKAMAK tipi manyetik füzyon reaktörlerinin diğer manyetik füzyon cihazlarına göre üzerinde daha sıklıkla çalışılmış ve deneyler yapılmıştır. TOKAMAK tipi manyetik füzyon reaktörlerinden en önemlilerinden birisi olan ITER projesinin Kasım 2017 de %50 si tamamlanmıştır ve projenin 2020 yılında tamamlanması planlanmaktadır [10].

Şahin ve arkadaşları [11] tarafından yapılmış olan çalışmada, bir manyetik füzyon reaktöründe ilk duvar için sıvı korumalı manyetik füzyon enerji reaktörü için nötronik hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, HYLIFE-II füzyon reaktörü geometrisi kullanılarak tasarlanan manyetik füzyon reaktör geometrisi için optimum soğutucu kalınlıkları bulunmuştur.

Catalán ve arkadaşları [12] tarafından yapılmış olan çalışmada, DEMO füzyon reaktörü için ikili He/LiPb soğutucularının trityum üretim performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre soğutucuların performansı sürdürülebilir trityum üretimi için yeterli olmaktadır. Bu avantajlarına rağmen, He gazının ısı kapasitesinin düşük olması ve ısının sorunsuz bir şekilde aktarılabilmesi için yüksek basınç ve sıcaklıkta reaktörün işletilmesini gerektirdiği için reaktörün güvenliği için ek önlemler gerektirmektedir.

Şahin ve arkadaşları [13] tarafından yapılmış olan çalışmada, Li_2C_2 trityum üretim materyali ile birlikte FLiBe, FLiNaK, Li ve LiPb soğutucuları kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, bütün soğutucular trityum üretimi için yeterli performansa sahip olsalar da FLiBe ve FLiNaK trityum üretiminde diğer soğutuculara göre daha düşük performans göstermişlerdir.

Übeyli [14] tarafından yapılmış olan çalışmada, füzyon-fisyon hibrit reaktöründe FLiBe, FLiNaBe ve LiSn soğutucularının trityum üretim performansları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, FLiBe en iyi trityum üretim performansına sahiptir.

Zandi ve arkadaşları [15] tarafından yapılmış olan çalışmada, ITER reaktörü için manto simülasyonu ve trityum üretim oranı hesaplanmıştır. Soğutucu olarak He kullanılan reaktörde, trityum üretim oranı reaktörün kendi kendini sürdürebilmesi için yeterli olmuş ve hesaplamalar MCNPX kodu kullanılarak yapılmıştır.

Ishibashi ve arkadaşlarının [16] ITER modülünden yola çıkarak yapmış oldukları çalışmada değişen soğutuculara göre trityum üretim oranları hesaplanmıştır.

Sato ve arkadaşları [17] tarafından yapılmış olan çalışmada, zırh malzemelerinin füzyon reaktör mantosunda trityum üreme oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Zırh malzemesi kullanılmadan en iyi trityum üretim oranı elde edilmiş olsada, nötron çoğaltıcı malzemeler ile zırh malzemesinin trityum üretimindeki olumsuz etkisi ortadan kaldırılabilir.

Şahin ve arkadaşları [18] tarafından yapılmış olan çalışmada, VISTA uzay aracı için 17500 MW füzyon gücüne kadar kullanımı elverişli olan mıknatıs ve zırhlama tasarımı yapılmıştır.

Şahin ve arkadaşları [19] tarafından yapılmış olan çalışmada, VISTA uzay aracı için tasarlanan mıknatıs ile ITER için tasarlanan mıknatısların nükleer ısı üretimleri karşılaştırılmış ve VISTA için tasarlanan mıknatısın ITER’de kullanılan mıknatıslara göre nükleer ısı üretim değerlerinin çok daha düşük çıktığı hesaplanmıştır.

Bohm ve arkadaşları [20] tarafından yapılmış olan çalışmada ITER reaktöründe yer alan mıknatısların ısı yükleri MCNP5 kullanarak hesaplanmıştır.

Şahin ve Übeyli [21] tarafından yapılmış olan çalışmada, APEX hibrit reaktörünün enerji üretimi ve trityum üretimi performansının düzenlenmesi için akıcı sıvı duvar kullanılmıştır. Bu sayede yüksek termodinamik verim ve trityum üretimi sağlanmıştır.

Kwakowski ve arkadaşları [22] tarafından yapılmış olan çalışmada, TOKAMAK yapısında ilk duvar malzemesi olarak SiC kullanılmıştır. Katı duvar konseptinin ilk örneği olan bu çalışmada, katı duvar konseptinin sıvı duvar konseptine göre daha basit bir tasarım olması, nötron ve yüklü parçacık hasarına karşı dayanıklı olması sebebiyle uygulanabilir bir konsept olduğu tespit edilmiştir.

Cadwallader [23] tarafından yapılmış olan çalışmada, füzyon reaktörü tasarımlarında katı ve sıvı duvar konseptleri incelenmiştir. Katı duvar konseptinde kullanılabilir soğutucu sayısının fazla olması ve Tore Supra projesinde alınan iyi sonuçlar sebebiyle, katı duvar konseptinin avantajlarının dezavantajlarından çok daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Tunç ve arkadaşları [24] tarafından yapılmış olan çalışmada, döteryum-trityum hibrit reaktörlerinin ilk duvarında oksit dispersiyonla güçlendirilmiş (ODS) çelik alaşımlarının radyasyon hasar parametreleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada yapılan tüm sayısal hesaplamalar göz önüne alındığında, ikinci nesil oksit

dispersiyonla güçlendirilmiş (1DS-ODS) çeliği diğer incelenen ODS çeliklerine göre en uygun ilk duvar malzemesi olduğu görülmüştür.

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

Günümüzde teknolojik gelişimin en önemli ölçütlerinden birisi enerji tüketimidir ve enerji tüketimine bağlı gelişmenin sürdürülebilmesi için yeni enerji kaynaklarının araştırılması gerekmektedir. Yapılan araştırmaların sonucunda enerji tüketimini sürdürülebilir olarak karşılayacak en önemli enerji kaynağı nükleer enerjidir. Yapılmış olan araştırmalar ve mevcut santrallerin detaylı analizleri incelendiğinde, sürdürülebilir ve çevreci enerji üretim imkanını sunan tek enerji kaynağının nükleer enerji olduğu görülmektedir. Nükleer enerji fisyon ve füzyon tepkimeleri adı altında iki yöntem ile üretilmektedir. Fisyon tepkimeleri kütle numarası çok büyük bir atom çekirdeğinin parçalanarak kütle numarası küçük iki çekirdeğe dönüşmesi olayıdır ve günümüzde ticari nükleer reaktörlerde fisyon tepkimeleri ile enerji üretilmektedir. Nükleer füzyon, iki hafif elementin nükleer reaksiyonlar sonucu birleşerek daha ağır bir element oluşturmalarıdır. Füzyon enerjisi yıldızlara güç veren süreçtir. Henüz ticari füzyon reaktörleri bulunmasada gelecekte tamamen temiz ve güvenilir bir enerji kaynağı olan füzyon enerjisi Dünya'nın enerji sorununun çözümü olacaktır. Günümüzde füzyon reaktörleri lazer atalet füzyonu ve manyetik füzyon konsepti ile çalışmaktadır.

Yapılan tez çalışması ile bir manyetik füzyon reaktöründe yakıt olarak döteryum-trityum plazması kullanılmış olup, değişen ilk duvar ve soğutucuların nötronik performansları, trityum üretim oranları, ısı akısı, nükleer ısı üretimi, ^1H üretimi ^4He üretimi ve atom başına yer değiştirme (DPA) incelenmiştir. Modellemesi yapılan reaktörde ilk duvar materyali olarak SiC ve 1DS-ODS çeliği, soğutucu olarak FLiBe (LiF-BeF), FLiNa (LiF-NaF), FLiNaK (LiF-NaF-KF) ve Li kullanılmıştır.

Denenmiş olan ilk duvar ve soğutucuların nötronik performansları, trityum üretim oranları, ısı akısı, nükleer ısı üretimi, ^1H , ^4He üretimi ve DPA hesaplamaları Monte Carlo N – Parçacık Taşınım Kodu (MCNP) kullanılarak yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, manyetik füzyon reaktörünün nötronik performansının artırılması hedeflenmektedir. Böylece yapılan bu çalışma, gelecekte uygulanabilir çalışmalar için önemli bir kaynak olacaktır.

2. FÜZYON REAKTÖRLERİ

2.1 Füzyon

Nükleer füzyon, atom çekirdeklerinin daha ağır elementlere dönüştüğü süreçtir. Nükleer füzyon tepkimelerinin gerçekleşmesi için, iki atom çekirdeğinin arasında Coulomb itme kuvvetinin aşılması gerekmektedir. Bu itme kuvveti sadece çekirdeklerin kinetik enerjilerinin artırılması ile aşılabilmektedir. Enerji kazanımının zorunlu olmadığı bir tepkime için hızlandırıcılar ile atom çekirdeklerinin kinetik enerjisi artırılabilir ve füzyon reaksiyonu meydana gelebilmektedir. Güneş ve diğer yıldızlarda meydana gelen ve enerji kazanımının olduğu füzyon reaksiyonlarında ise hidrojenin döteryuma füzyonu, ekzotermik reaksiyonlar zincirindeki ilk adımdır. Ürünün kütlesi, füzyon çekirdeklerinin toplam kütesinden daha küçüktür ve aradaki kütle farkı enerji olarak açığa çıkar.

2.2. Füzyon Yakıtları

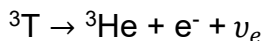
Füzyon reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için farklı izotoplar eşleştirilebilse de döteryum-trityum (D-T) reaksiyonu füzyon reaktörleri için en verimli reaksiyon olarak tanımlanmıştır. Döteryum (D) ve trityum (T) izotoplarının füzyonu, laboratuvarlarda en düşük sıcaklıklarda en yüksek enerji kazancını sağlamaktadır.

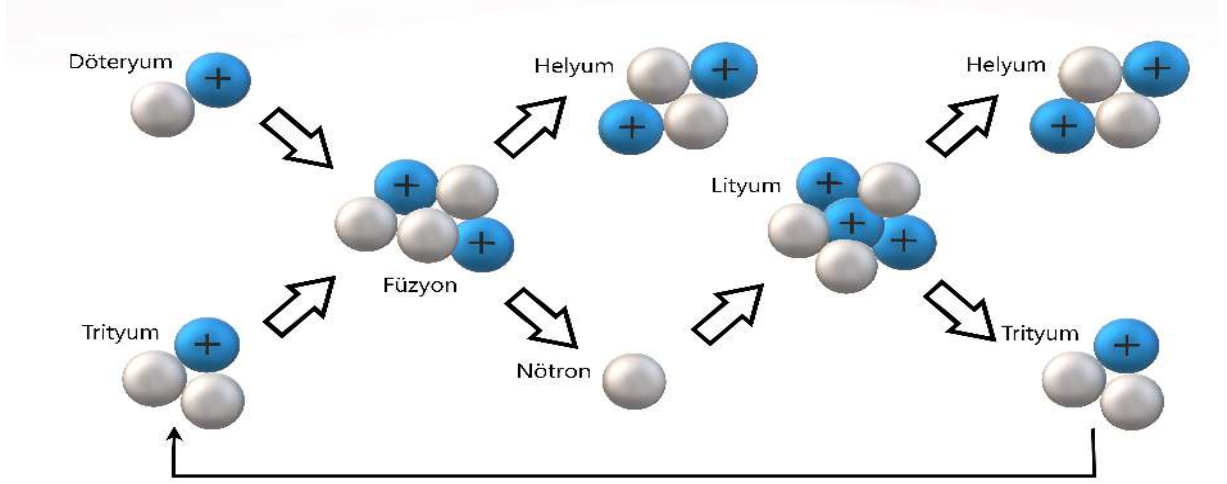
2.2.1. Döteryum

Döteryum, hidrojenin iki kararlı izotopundan biridir. Döteryum çekirdeği, bir döteron olarak adlandırılır, bir proton ve bir nötron içerir. Döteryumun bulunduğu ağır su molekülleri suda kütlece %0,02 oranında bulunmaktadır. Yaygın olarak bulunabilen, zararsız ve neredeyse tükenmez bir kaynaktır.

2.2.2. Trityum

Trityum, hidrojenin radyoaktif izotopudur. Trityum çekirdeği bir proton ve iki nötron içerirken, hidrojen çekirdeği sadece bir proton içerir. Doğal yollarla oluşan trityum, atmosferin kozmik ışınlarla etkileşimi ile yeryüzünde çok düşük miktarlarda bulunmaktadır. Trityum kararsız bir izotopdur ve yarılanma ömrü 12,3 yıl olan ^3He izotopuna bozunur.

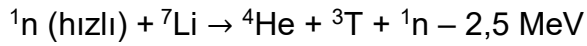
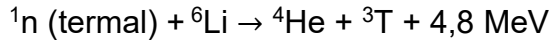




Şekil 2.1. Tritiyum üretim reaksiyonunun temsili resmi

Kararsız olması nedeniyle, doğada önemli miktarda trityum bulunmamaktadır, ancak D-T reaksiyonu sonucunda açığa çıkan nötronların lityum ile tepkimeye girmesi ile nükleer reaktörlerde trityum üretimi yapılabilmektedir. Şekil 2.1’de trityum üretim reaksiyonunun temsili resmi gösterilmiştir.

Gösterilen reaksiyon irdelendiğinde trityum üretimi için gerçekleşen ekzotermik ve endotermik reaksiyonlar sırasıyla;

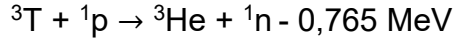
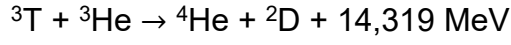
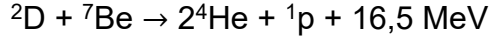
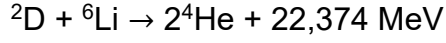


Reaksiyonlarıdır. Tritiyum üretilen ekzotermik tepkime termal nötronlarla gerçekleşir. Bunun aksine endotermik reaksiyon ise hızlı nötronlarla gerçekleşir ve endotermik reaksiyonlardan farklı olarak reaksiyon başına bir adet nötron açığa çıkmaktadır.

2.3. Füzyon Reaksiyonları

En temel füzyon reaksiyonları döteryum-döteryum (D-D) ve döteryum-trityum (D-T) reaksiyonlarıdır. Füzyon reaktörlerinde, döteryum ve trityum izotopları, hidrojen izotopları olduğu ve hidrojenin bol miktarda bulunması sebebiyle, D-D ve D-T reaksiyonları reaktörlerdeki en temel füzyon reaksiyonlarıdır. Bununla birlikte, diğer yakıt döngüleri gelişmiş füzyon sistemleri için cazip alternatifler haline gelebilir. Alternatif füzyon reaksiyonları aşağıda listelenmektedir.



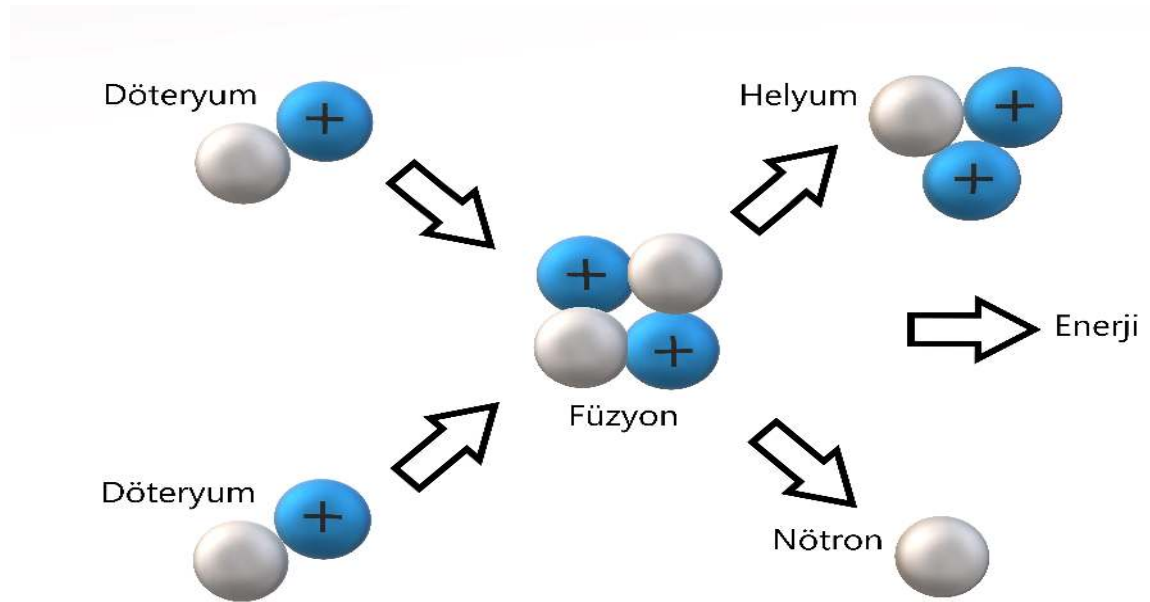


2.3.1. Döteryum – Döteryum (D-D) Reaksiyonları

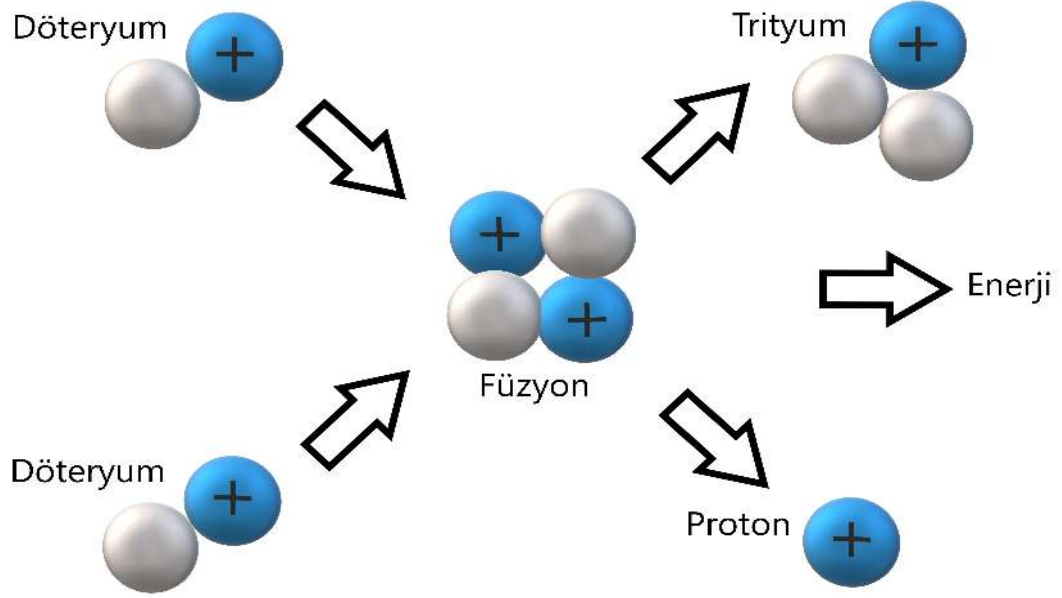
Enerji üreten bir sistemin yakıtının bol miktarda bulunabilmesi gerekmektedir. Döteryum doğal olarak suyun kütlece 3.3×10^{-5} 'lik bir kısmını oluşturmaktadır. Okyanuslardaki su miktarı göz önüne alındığında, döteryum kaynaklarının miktarı azımsanamayacak kadar fazladır. Bu sebeplerle döteryum, füzyon sistemleri için cazip bir yakıt haline gelmektedir. Hidrojen atomunun bir izotopu olan döteryum ^2D veya D ile gösterilir. İki döteryum çekirdeğinin meydana getirdiği füzyon tepkimeleri,



Tepkimeleridir.



Şekil 2.2. Döteryum-Döteryum füzyon reaksiyonunun temsili resmi (DDn)

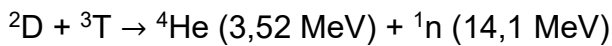


Şekil 2.3. Döteryum-Döteryum füzyon reaksiyonunun temsili resmi (DDp)

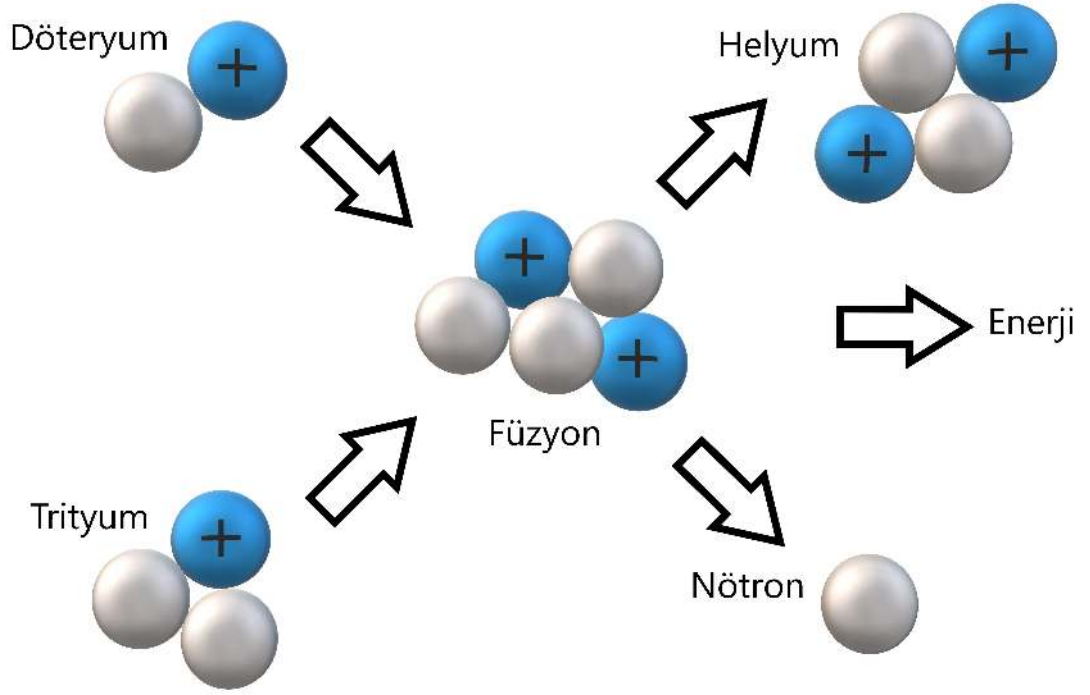
Şekil 2.2 ve 2.3’de gösterilen D-D reaksiyonlarında (DDn,DDp) her bir reaksiyonun oluşma ihtimali birbirine eşittir.

2.3.2. Döteryum – Trityum (D-T) Reaksiyonları

Füzyon reaksiyonlarında, reaksiyonun gerçekleşme ihtimalini artırmak için yüksek tesir kesitli izotopların seçilmesi gerekmektedir. Diğer bir husus ise reaksiyon sonucunda açığa nötron çıkmasının gerekliliğidir. D-D reaksiyonlarının aksine D-T reaksiyonları sonucunda nötronların açığa çıkmama gibi bir ihtimal söz konusu değildir. Belirtilen hususlara ek olarak döteryum-trityum reaksiyonu, olası tüm füzyon reaksiyonları arasında gerçekleşmesi en kolay olan füzyon reaksiyonu olduğu için füzyon reaktörlerinde enerji üretimi için tercih edilen bir reaksiyondur. Reaksiyonun sürdürülebilmesi için gereken trityum, füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan nötronların lityum ile tepkimesi sonucunda üretilebilmektedir. ^3T veya T ile gösterilen trityum ile döteryum çekirdeğinin meydana getirdiği füzyon tepkimesi,



olarak yazılmaktadır.



Şekil 2.4. Döteryum-Trityum füzyon reaksiyonunun temsili resmi

Şekil 2.4’de gösterilen D-T füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan yüksek enerjili nötron, füzyon reaktörlerinde hızlı nötron kaynağı olarak kullanılabilir.

2.4. Füzyon Enerjisinin Hesaplanması

Füzyon enerjisinin hesaplanması için iki yöntem kullanılmaktadır. Örnek olarak füzyon yapan iki döteryum (^2_1H) çekirdeği incelendiğinde,

$^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He}$ açığa çıkan enerji bağlanma enerjisinin değişimi ve kütle değişimi ile bulunabilmektedir.

Yöntem 1 (bağlanma enerjisi değişimi)

$$BE(^A_Z\text{X}) = [ZM(^1_1\text{H}) + (A-Z)m_n - M(^A_Z\text{X})]c^2 \quad (2.1)$$

Denklemleri ile hesaplanabilmektedir. Denklemlerde yer alan Z proton sayısını, A – Z nötron sayısını ifade etmektedir. Denklem sonucunda ^4_2He izotopunun bağlanma enerjisi 23,396 MeV, ^2_1H izotopunun bağlanma enerjisi 2,225 MeV olarak hesaplanmaktadır. Füzyon yapan iki döteryum çekirdeğinden açığa çıkan enerji ise $28,296 - 2(2,225) = 23,85$ MeV olarak hesaplanmaktadır.

Yöntem 2 (kütle değişimi): Füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerji, bozunan kütlelerin enerjisine eşit olmalıdır.

$$E_{\text{füzyon}} = [2m({}_1^2\text{H}) - m({}_2^4\text{He})] (\text{akb}) \times 931,5 \text{ MeV/akb} \quad (2.2)$$

Denklemden yer alan 931.5 MeV/akb değeri 1 atomik kütle biriminin enerji cinsinden değerini ifade etmektedir. Söz konusu değer,

$$E = mc^2 = \left(\frac{1.6606 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ akb}} \right) \left(2.998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 931,5 \text{ MeV} \quad (2.3)$$

Denklemleri ile elde edilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda kütle değişimi sonucunda füzyon yapan iki döteryum çekirdeğinden açığa çıkan enerji 23,85 MeV olarak hesaplanmaktadır.

2.5. Füzyon Reaktörleri

Yeryüzünde bir füzyon reaktörü inşa etmek için iki temel koşulun yerine getirilmesi gerekmektedir [25].

Isıtma: DT yakıtının yaklaşık 120 milyon Kelvin sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir. Pozitif yüklü yakıt iyonları birbirlerini iterler ve füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi izotopların yüksek hızlarda olması ve birbirine yakın olması gerekmektedir. Bu gereklilik ısıtma ile yerine getirilebilmektedir. Füzyon reaksiyonu için gerekli olan yüksek sıcaklık altında, yakıtlar tamamen iyonize olacak ve plazma durumuna dönüşecektir. Genel olarak, plazma, eşit sayıda pozitif ve negatif yüklü parçacık içeren bir tür iyonize gazdır. Katı, sıvı ve gaz hallerine ek olarak maddenin dördüncü halidir. Yıldızlar, floresan lambalar, alevler, patlamalar, iyonosfer ve gazlı lazerlerin hepsi plazmaya örnektir. Bir füzyon reaktörü, gravitasyon kuvveti yerine manyetik alan basıncı ile bir arada tutulan minyatür bir güneş gibi olacaktır.

Sınırlandırma: Sınırlandırma, füzyon reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için plazmanın yeterince yüksek sıcaklıklarda ve basınç altında tutulabilmesi için gerekli olan tüm yöntemleri ifade etmektedir ve plazma altı yolla sınırlandırılabilir:

1- Katı duvarlar: Floresan lambalar gibi düşük sıcaklıktaki plazmalar, cam veya metal borularda bulunabilir. Katı duvarlar, manyetik alanlarda kısa süre boyunca sıcak plazma tutulmasını sağlayabilir, ancak uzun süreli temas plazmayı ısı iletimi ile hızlı bir şekilde soğutur ve duvara zarar verir.

2- Yerçekimi: Güneş gibi yıldız plazmaları yerçekimi tarafından sınırlandırılırsa, laboratuvar plazmasının kütlesi kendi kendine yerçekimi yaratamayacak kadar düşüktür.

3- Atalet: Lazer ışınları veya parçacık ışınları, 10^{30} iyon/m³ gibi son derece yüksek yoğunluğa sahip küçük bir yakıt topağını sıkıştırabilir. Atalet, sıkıştırılmış yakıt plazmasının genleşme miktarını sınırlar, böylece ateşleme ve füzyonun gerçekleşmesi için yeterli olan sınırlamayı sağlar.

4- Elektrostatik alanlar: Yüksek voltajlı elektrotlar, elektrostatik potansiyelin pozitif ve negatif maksimumlarını oluşturabilir. Pozitif potansiyeller iyonları iter ve negatif potansiyeller elektronları iter.

5- Manyetik alanlar: Manyetik alanlar Lorentz kuvveti ile plazmaları sınırlayabilir. Lorentz kuvveti, elektronların ve iyonların manyetik alan çizgileri etrafında sarmallar oluşturmalarına neden olur ve söz konusu manyetik alan dışına çıkmalarını engeller. Manyetik alan çizgileri, bir torusta olduğu gibi büyük daireler ise, plazma oldukça iyi sınırlandırılmış olur.

6- Elektromanyetik dalgalar: Radyo frekansı ve mikrodalga alanları düşük basınçlı plazmayı iyi sınırlayabilir, ancak yüksek basınçlı plazmaları sınırlandırmak için çok büyük güç girişleri gerekir. Elektromanyetik dalgalar, manyetik hapsi arttırmak için de kullanılabilir.

2.6. Füzyon Reaksiyonunun Gerçekleşmesi İçin Gereken Koşullar

Füzyon reaksiyonun gerçekleşebilmesi için sıcaklık, yoğunluk ve sınırlandırma süresinin yeterli miktarda olması gerekmektedir. Bu üç kriterin bir arada olma durumu üçlü çarpım (triple product) olarak tanımlanmaktadır. Füzyon reaksiyonu için gereken bu kriterlerden biri veya daha fazlası sağlanamazsa plazmada yeterince ısı tutulamaz ve füzyon reaksiyonu durur.

2.6.1. Sıcaklık

Nükleer füzyonu gerçekleştirebilmek için, parçacıkların Coulomb kuvvetini aşması gerekmektedir. Bunun için çok yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Çok yüksek sıcaklıklar kullanılarak yapılan bu füzyon reaksiyonuna termonükleer füzyon denir. Termonükleer füzyon yapan parçacıkların enerjileri 1-10 keV, sıcaklıkları ise 10^8 –

10⁹ K aralığında olmalıdır. Buna göre döteryum – trityum füzyonunun yapılabilmesi için,

$$E = k.T \quad (2.4)$$

Denklemleri ile D-T füzyon reaksiyonu için gereken sıcaklık bulunabilmektedir. Denklemlerde yer alan E enerjiyi (keV), k Boltzman sabitini (8,617 x 10⁻⁵ eV/K) ve T (K) D-T plazma sıcaklığını ifade etmektedir. Buna göre, D-T plazma sıcaklığı 10 keV enerji seviyesi için 116.000.000 K olarak hesaplanmaktadır.

2.6.2. Yoğunluk

Nükleer füzyona karşı coulomb bariyerini aşmak için yeterince yüksek bir sıcaklık verilmesine rağmen, reaksiyondan net bir enerji verimi elde etmek için yeterince yüksek çarpışma olasılığının bulunması gerekmektedir. Bu olasılığı arttırmak için kritik bir iyon yoğunluğuna ulaşılmalıdır. Buna göre D-T füzyonunun yapılabilmesi için gereken iyon yoğunluğu [26];

$$n = \frac{2 \times 10^{14}}{\tau} \quad (2.5)$$

Denklemleri ile bulunabilmektedir. Denklemlerde yer alan n plazmadaki nötron yoğunluğunu ve τ sınırlandırma süresini ifade etmektedir.

2.6.3. Sınırlandırma Süresi

Nükleer füzyon cihazlarındaki sınırlandırma süresi, plazmanın kritik ateşleme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta muhafaza edildiği zaman olarak tanımlanır. Füzyondan plazmayı ısıtmak için verileden daha fazla enerji elde etmek için, plazma minimum bir süre için bu sıcaklığa kadar tutulmalıdır. Söz konusu süre D-T plazması için [27]:

$$\tau = \frac{2 \times 10^{14}}{n} \quad (2.6)$$

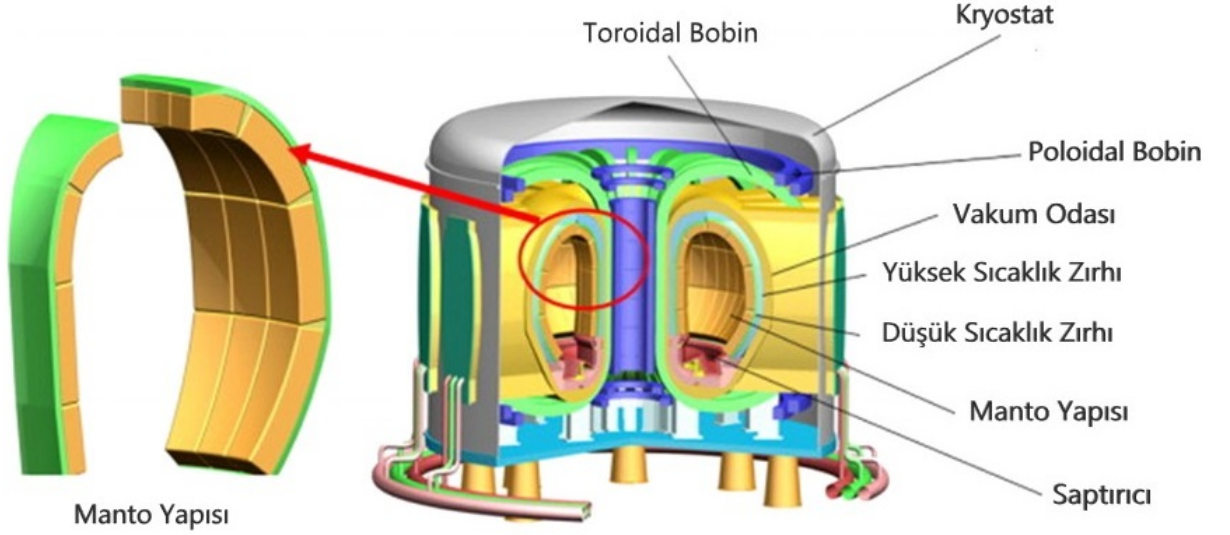
Denklemleri ile bulunur. Denklemlere göre plazmadan açığa çıkan nötron yoğunluğu yükselirse, ters orantılı olarak plazmanın sınırlandırma süresi azalmaktadır. Denklemlerde yer alan sınırlandırma süresinin ve iyon yoğunluğunun çarpımı her zaman sabittir ve bu çarpımın minimum değerine Lawson Kriteri denilmektedir. Bu kritere göre D-T plazması için $n \times \tau$ değeri en az 2 x 10¹⁴ s/cm³ değerinde olmalıdır.

2.7. Manyetik Sınırlandırma

Manyetik sınırlandırma, plazmayı oluşturan parçacıkların elektromanyetik özelliklerini manyetik çizgiler boyunca sınırlandırmak için kullanır. Yüklü parçacıklardan oluşan yüksek sıcaklıktaki plazma, Lorentz kuvveti yenilerek manyetik bir alanda tutulur. Lawson kriterlerine göre tasarımı yapılan bu cihazlarda çalışmanın önceki bölümlerinde belirtilen plazma oluşturma kriterleri sağlanmalıdır. Söz konusu kriterlerin sağlanması dahilinde bu koşullar altında plazmanın bulundurulabileceği bir malzeme bulunmamaktadır. Bu ikilemin bir çözümü, sıcak plazmayı, yüklü parçacıklar üzerindeki manyetik kuvvet sayesinde dairesel veya sarmal yollarda hareket ettirerek, reaktör kabının duvarları ile temas etmemesidir. Manyetik kuvvet yoluyla plazma sınırlandırması üç ana cihazla yapılmaktadır.

2.7.1. TOKAMAK

Bir TOKAMAK, sıcak bir plazmayı torus şeklinde sınırlamak için güçlü bir manyetik alan kullanan bir cihazdır. Füzyon enerjisini kullanmak için tasarlanmış deneysel bir makine ve en gelişmiş manyetik hapsedme sistemi olan TOKAMAK ile gelecekteki füzyon reaktörlerinin tasarımının temeli atılmıştır. Bir TOKAMAK içinde füzyon reaksiyonları sonucunda oluşan plazma manyetik alanlar ile reaktör duvarına temas etmeyecek bir şekilde elektromıknatıslar tarafından sınırlandırılır. Bu sayede reaktörün manto yapısının gördüğü ısı hasarında azaltılmış olur. Elektromıknatıslar tarafından sınırlandırılan plazma ile kontrollü termonükleer füzyon tepkimeleri başlatılarak enerji üretimi gerçekleştirilir. Reaktörde termonükleer füzyon reaksiyonları sonucunda üretilen enerji, reaktörün duvarlarında manto tabakası tarafından ısı enerjisine çevirilir. Füzyon gücünün manto katmanlarında ısı enerjisine dönüştürülmesi ile açığa çıkan bu ısı soğutucu katmanları ile reaktörden tahliye edilerek tıpkı konvansiyonel bir elektrik santrali gibi, bir füzyon reaktöründe buhar türbinleri ve jeneratörleri kullanarak elektrik enerjisi üretmek için bu ısıyı kullanır. Şekil 2.5'de TOKAMAK'ın temsili resmi gösterilmektedir.



Şekil 2.5. TOKAMAK'ın temsili resmi [5]

Şekil 2.5'de temsili resmi bulunan ana tokamak bileşenleri ve fonksiyonları aşağıdaki gibidir [28]:

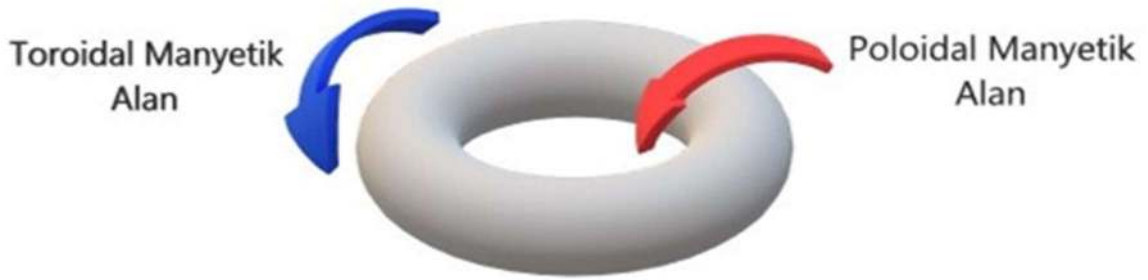
- Sıcak plazma, reaktör duvarlarından uzak tutan bir manyetik alan tarafından bulunur. Toroidal ve poloidal alan bobinleri olarak bilinen iki manyetik bobin kümesinin kombinasyonu, plazmayı tutmak ve şekillendirmek için manyetik bir 'kafes' olarak hareket eden hem dikey hem de yatay yönde bir alan oluşturur. Plazma akımı bir transformatör tarafından indüklenir, merkezi manyetik bobin birincil sargı ve plazma ikincil sargı olarak hareket eder. Plazma akımı tarafından sağlanan ısıtma, füzyonun gerçekleşmesi için gereken 100 milyon santigrat derece sıcaklığın üçte birine kadar ulaşır. Ek plazma ısıtması nötr ışın enjeksiyonu ile sağlanır. Bu süreçte, nötr hidrojen atomları plazmaya yüksek hızda enjekte edilir, iyonize edilir ve manyetik alan tarafından sıkıştırılır. Yavaşladıkça, enerjilerini plazmaya aktarırlar ve ısıtırlar.
- Kryostat, füzyon reaktörünün bileşenlerinin bulunduğu hazne görevi yapar.
- Plazma bir vakum kabında bulunur. Vakum harici pompalar tarafından korunur.
- Düşük ve yüksek sıcaklık zırhı, reaktörün manto yapısındaki bileşenleri ısı ve radyasyon hasarına karşı koruma görevini üstlenmektedir.
- Manto yapısı, füzyon reaktörlerinde üretilen füzyon enerjisinin ısı enerjisine dönüştürüldüğü, trityum üretiminin yapıldığı ve radyasyon zırhlamasının yapıldığı katmanlardır.

- Saptırıcı, plazmanın reaktörün ilk duvar ve zırh yapısına temasını engelleyerek plazmayı saf halde tutulmasını sağlayan ve tüketilen yakıtın tahliye edildiği katmandır.

2.7.2. Stellarator

Stellarator, sıcak plazmayı sınırlandırmak için karmaşık manyetik bobinler kullanarak sınırlayan manyetik füzyon cihazıdır. Dış manyetik bobinler, klasik bir konfigürasyonda esasen toroidal alan bobini ve helisel sargılardan oluşan bir stellaratorun en büyük ve en önemli bileşenleridir. Bir solenoid gibi sarmallar eksenel doğrultuda uzar ve poloidal manyetik alan üretmek için kullanılır. Toroidal alan bobini, toroidal manyetik alanı üretmek için kullanılır. Şekil 2.6'da Torus yüzeyindeki toroidal ve poloidal manyetik alanlar gösterilmektedir.

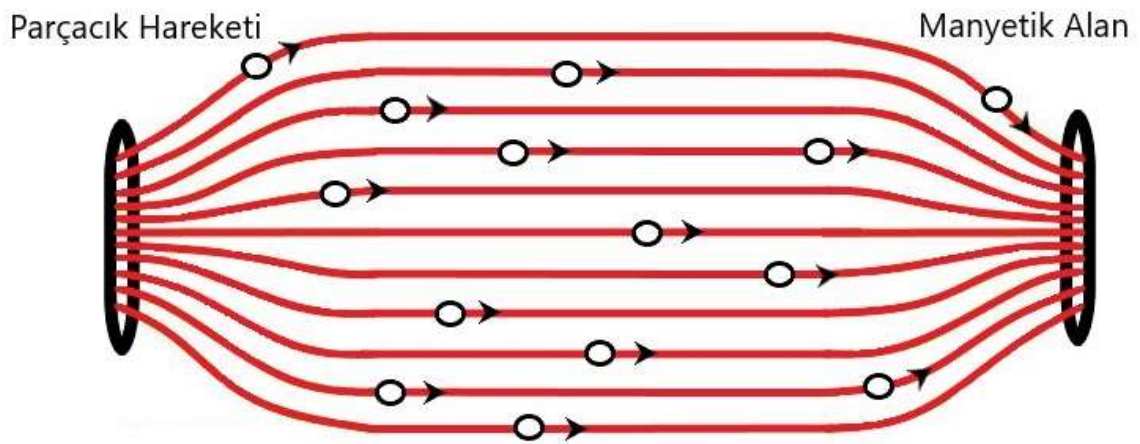
Klasik stellarator tasarımının avantajı, harici bobinlerin yeterli plazma rotasyonu sağladığından sabit durumda çalıştırılabilmesidir. Bu nedenle, plazma akımının poloidal manyetik alan üretmesine gerek yoktur. Bu nedenle, çok az miktarda net toroidal akım akarken, TOKAMAK'a kıyasla plazmanın bozulma olasılığı çok daha düşüktür. Ancak, Stellarator'ün TOKAMAK'a kıyasla bir dezavantajı vardır. Stellaratordeki bobin sistemi, iç içe sabit basınç yüzeyleri ve dolayısıyla plazma dengesi ve hapsi sağlamak için üç boyutlu bir geometri olmalıdır ve bunun sağlanması için TOKAMAK'a göre çok daha karmaşık bir teknoloji kullanılması zorunludur. Bu, bobinler sisteminin hassas olmasına ve elde edilebilen maksimum manyetik alan üzerinde daha sıkı sınırlamalara yol açar. Bu sınırlamalar sebebiyle stellarator, TOKAMAK'a göre daha düşük miktarlarda manyetik alan ile çalışmak zorundadır. Bu kısıtlamalarla birlikte, stellarator TOKAMAK tipi reaktörlere göre daha düşük kapasitede enerji üretimi gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 2.6. Torus yüzeyindeki toroidal ve poloidal manyetik alanlar

2.7.3. Manyetik Aynalar

Manyetik bir aynada, sınırlama alanının her iki ucunda artan bir manyetik alan çizgisi oluşturmak için bir elektromıknatıs konfigürasyonu kullanılır. Oluşturulan bu konfigürasyon, en basit ve en düşük maliyetli plazma deney cihazıdır. Şekil 2.7’de manyetik aynaların temsili resmi gösterilmektedir. Uçlara yaklaşan parçacıklar, ters yönde hareket etmelerine sebep olacak ikinci bir manyetik alan kuvveti ile karşılaşılır ve sınırlandırma bölgesine tekrar yollanırlar. Uçlarda güçlü, orta kısımda uçlara göre çok daha düşük miktarda manyetik alanın bulunduğu bu konseptte, parçacıklar sınırlandırma bölgesine tekrar yollandığında manyetik alan çizgileri etrafında sarılarak manyetik alanda sıkışırlar. Bu sıkışma ile parçacıklar manyetik alanlarla sınırlandırılmış olur ve gereken koşullar oluştuğunda plazma elde edilmiş olur. Yüklü parçacıkların manyetik alanlar ile sıkıştırılamaması sebebi ile manyetik ayna konseptinde yüklü parçacık kayıpları yaşanmaktadır. Füzyon reaksiyonu sayısı zamana bağlı olarak arttıkça kaybedilen yüklü parçacık miktarı artacaktır. Bunun sonucunda plazma sıcaklığı azalacak ve füzyon reaksiyonunu gerçekleştirmek diğer sistemlere göre çok daha zor olacaktır. Karşılaşılan bu zorluklar sonucunda manyetik aynalar konsepti ile ilgili çalışmalar 1984 yılında Birleşmiş Milletler’in MFTF-B projesinin iptali ile manyetik füzyon reaktörleri arasında geliştirilmesi en düşük öncelikli konuma gerilemiştir. Günümüzde Çin’in halihazırda işletme halinde bulundurduğu KMAX ve Kore’nin işletme halinde bulundurduğu HANBIT projeleri devam eden manyetik ayna projelerinin en önemlileridir.



Şekil 2.7. Manyetik aynaların temsili resmi

2.8. Manyetik Füzyon Reaktörünün Manto Yapısı

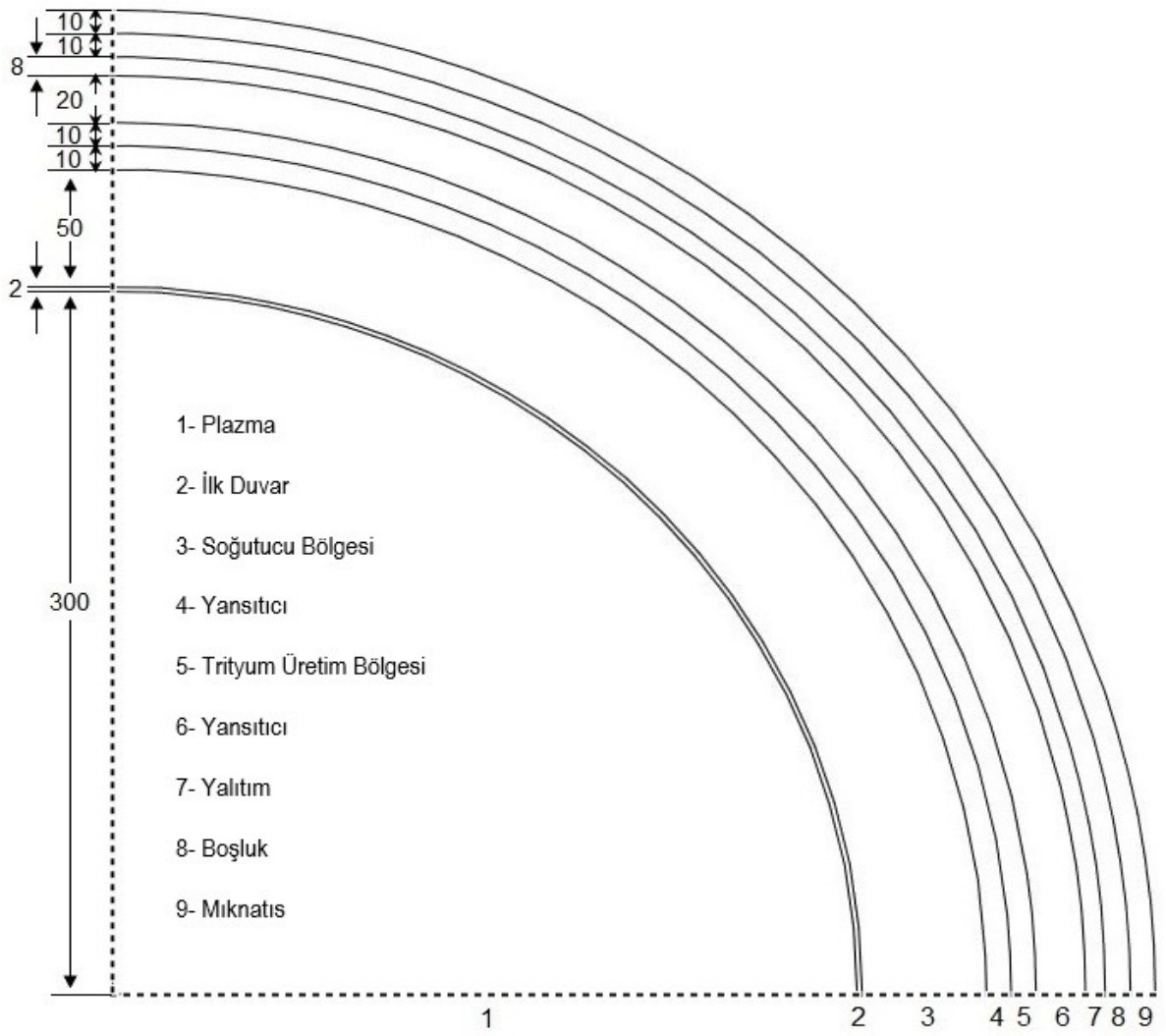
Manto yapısı füzyon enerjisini ısı ve elektrik enerjisine çevirmede anahtar görevi görmektedir. Manto yapısının ısı ve nötronik performansı reaktör gücüne ve ekonomisine büyük etkileri vardır. Manto yapısı sayesinde;

- Manto yapısı füzyon reaksiyonları sonucunda üretilen enerjiyi ısı enerjisine çevirir ve soğutucu yardımıyla güç üretim sistemine aktarılır.
- Doğada çok nadir bulunan trityum izotoplarının üretilmesini sağlar. Bu sayede füzyon reaktörü için gereken yakıt üretilmiş olur.
- Füzyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan yüksek radyasyon mıknatıslara ve diğer sistemlere nötron hasarı verir. Manto yapısı sayesinde plazmadan açığa çıkan yüksek miktarda nötron ve gama radyasyonuna karşı reaktör katmanlarındaki malzemeler radyasyon hasarından korunmuş olur.

Yapılan bu çalışma kapsamında literatürde bulunan manyetik füzyon reaktörlerinin bileşenleri ve malzeme içerikleri temel alınarak oluşturulan sekiz farklı modelde aynı reaktör geometrisi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan reaktörde küresel nötron kaynağı ile plazma odası benzetimi yapılmış olup reaktörün plazma katmanı manto katmanı ile çevrelenmiştir. Füzyon katmanı sırasıyla, ilk duvar, soğutucu bölgesi, yansıtıcı, trityum üretim bölgesi yalıtım, boşluk ve mıknatıs katmanları ile çevrelenmektedir. Reaktör manto yapısında sırasıyla;

- Plazma
- İlk duvar
- Trityum üretim bölgesi
- Yansıtıcı
- Yalıtım
- Boşluk
- Mıknatıs

Katmanları bulunmaktadır. Şekil 2.8’de bu çalışmada modellenen manyetik füzyon reaktörünün manto yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Manyetik füzyon reaktörünün manto yapısı

2.8.1. Yakıt Bölgesi

Füzyon reaktörlerinde kullanılan yakıtların yüksek enerji potansiyeline sahip olması gerekmektedir. İhtiyaç duyulan enerjiyi sağlayabilecek iki temel yakıt vardır. Bunlardan birincisi döteryum-döteryum, ikincisi döteryum-trityum füzyon yakıtıdır. Deneysel füzyon reaktörlerinde döteryum-döteryum yakıtı kullanılırken, enerji üretim amaçlı tasarlanan füzyon reaktörlerinde yakıt olarak döteryum-trityum yakıtı kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada manyetik füzyon reaktöründe yüksek enerji potansiyeli nedeni ile döteryum-trityum füzyon yakıtı kullanılmıştır. Yakıtın füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan hızlı nötronlar ile reaktörün nötron dengesi sağlanmakta ve reaktörün sürdürülebilir çalışması için gereken trityum üretilmektedir.

2.8.2. Birinci Duvar Bölgesi

Füzyon reaktörlerinde en önemli tasarım parametrelerinden birisi birinci duvar materyalinin seçimidir. Birinci duvar materyali seçerken materyalin yüksek sıcaklık oksidasyonu, yüksek radyasyon direnci, iyi sertlik ve korozyon direnci özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bahsedilen özelliklere sahip olan SiC ve 1DS-ODS çeliği modellemesi yapılan manyetik füzyon reaktöründe ilk duvar malzemesi olarak kullanılmıştır.

2.8.3. Soğutucu Bölgesi

Füzyon reaktörlerinde iki döngülü soğutucu sistemi kullanılmaktadır. Birinci döngüde yer alan soğutucularının ana işlevi, reaktör katmanlarındaki nükleer ısı üretimini ve birinci duvarın yüzey ısını azaltarak ısıyı ikinci katmana aktarmak için ısı değiştiriciye aktarmaktır. Bu bölgede kullanılan soğutucular su, helyum, sıvı metal, erimiş tuz içermektedir. Su, mükemmel ısı transfer özelliği, düşük pompalama gücü gereksinimi ve iyi nötron moderasyon özelliği nedeniyle nükleer reaktörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, suyun düşük kaynama noktasından dolayı yüksek çalışma sıcaklığı elde edilmesi zordur. Bunun yanında su, trityum üretimi için gereken malzemelerle reaksiyona girebildiği için reaktörün trityum üretimini olumsuz etkiler. Helyum, çoğu alaşımla uyumlu asal gazlardan biri olarak, manyetik alandan etkilenmez ve trityum ekstraksiyonu için uygundur. Ancak düşük ısı kapasitesi ile, helyumun verimli ısı transferi özellikleri elde etmek için yüksek bir basınca ihtiyacı vardır. Sıvı metal soğutucu yüksek kaynama noktası, ısı iletkenliği ve ısı kapasitesine sahiptir, düşük basınçla yüksek sıcaklık ve ısı akısı elde edebilir. Erimiş tuzlar yüksek kaynama noktasına, düşük buhar basıncına ve düşük elektrik iletkenliğine sahiptir. İkinci döngü soğutucuları ise, birinci soğutucu döngüsünden gelen ısı ile ısınır ve bu sayede sıradan enerji santrallerinde olan aynı prensip ile elektrik enerjisi üretilir.

2.8.4. Yansıtıcı Bölgesi

Nükleer reaktörlerde yansıtıcı materyaller yüksek enerjili nötronları inelastik saçılma ile yansıtırlar. Yansıtıcılar, hızlı nötronların enerjisini düşürerek trityum üretim tepkimelerinin gerçekleşme olasılığını artırarak trityum üretim oranını da artırmaktadır. Buna ek olarak yansıtıcıların mantodan nötron kaçağını engelleme ve

reaktör katmanlarını koruma işlevleri de vardır. İdeal yansıtıcı materyali seçilirken, yansıtıcı materyalin düşük nötron yutma tesir kesitine sahip olması, yüksek saçılma tesir kesitine sahip olması ve radyasyon hasarına karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Yansıtıcı bölgesinde TiC, ZrC ve ZrH₂ malzemeleri trityum üretimi ve zırhlama performansına göre kıyaslandığında oldukça verimli olmalarına rağmen reaktör maliyetini oldukça artırıcı bir etkiye sahip oldukları için [29] bu çalışmada yansıtıcı materyal olarak grafit kullanılmıştır.

2.8.5. Yalıtım Bölgesi

Füzyon reaktörlerinde yalıtım katmanı reaktör içerisinde üretilen ısıyı dışarı sızdırmamak ve mıknatısı ısı yükünden korumak için mıknatısa yakın bölgelerde konumlandırılır. Yapılan çalışmada termal yalıtım malzemesi olarak SiO₂ kullanılmıştır.

2.8.6. Boşluk Bölgesi

Füzyon reaktörü modellemesi yapılırken yüksek miktarda ısı enerjisinin birikmemesi gereken bölgelerde herhangi bir izotop içermeyen boşluk bölgesi bulunmalıdır. Bu sayede taşınım ve iletim ile meydana gelen ısı transferi engellenmiş olur. Çalışma kapsamında modellemesi yapılan manyetik füzyon reaktöründe mıknatısın ısı yükü sebebiyle özelliğini kaybetmemesi için yalıtım katmanı ile mıknatıs arasında boşluk katmanı bulunmaktadır.

2.8.7. Mıknatıs Bölgesi

Manyetik füzyon reaktörlerinde plazma sınırlaması mıknatıslar yardımı ile yapılmaktadır. Reaktörün en dış katmanını çevreleyen mıknatıslar ile plazma tasarlanan reaktörün limitlerine göre plazmayı manyetik kuvvet ile sınırlandırmaktadır. Mıknatısların diğer işlevi ise manyetik kuvvet ile plazmayı reaktörün merkezinde tutarak dağılmasını engellemektedir. Çalışmada VISTA uzay aracının mıknatısının bileşenleri temel alınarak mıknatıs katmanı manyetik füzyon reaktörünün manto yapısına eklenmiştir [18].

3. METOD VE YÖNTEM

3.1. Teori

3.1.1. Yoğunluk Hesaplamaları

Reaktör hesaplamalarında, belirlenen geometride kullanılacak malzemelerin yoğunluklarının bulunması gerekmektedir. Bir izotopun atomik yoğunluğunun hesaplanmasında temel olarak;

$$N = \frac{\rho \times N_A}{A} \quad (3.1)$$

Denklemini kullanılır [30]. Bu denklemde yer alan;

N = atom yoğunluğu (atom / cm³)

ρ = malzeme yoğunluğu (atom / cm³)

N_A = Avogadro sayısı = 0,6022 x 10²⁴ (atom / mol)

A = İzotopun atom kütlesi (g/mol)

İfade etmektedir.

Birden fazla izotopun bir arada bulunduğu bir karışım söz konusu olduğunda atomik yoğunluk;

$$N_i = \frac{\rho_{\text{karışım}} \times N_A \times w_{f_i}}{A_i} \quad (3.2)$$

Denklemini ile bulunmaktadır [30]. Denkleminde yer alan;

N_i = i. malzemenin atomik yoğunluğu (atom / cm³)

$\rho_{\text{karışım}}$ = karışım yoğunluğu (atom / cm³)

w_{f_i} = i. malzemenin karışımdaki kütle oranı

A_i = i. malzemenin karışımdaki atomik yoğunluğunu

İfade etmektedir.

3.1.2. Nötron Taşınım Denklemleri

Nötron taşınım denklemi, nükleer reaktör çekirdeklerinin ve deneysel veya endüstriyel nötron ışınlarının davranışını belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Bu denklem, nötronların belirli bir hacim içindeki konumunu temel alan bir denklemdir ve bu hacim içerisinde oluşan ve kaybolan nötronların değişimi zamana bağlı olarak söz konusu denklem ile incelenebilmektedir. Buna göre nötron taşınım denklemi temel olarak;

$$\left(\frac{1}{v}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Omega \nabla_{\phi} + \sum_t (r, E) \phi(r, E, \Omega, t) = \iint_{4\pi} \left\{ \sum_s (E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E', \Omega', t) \right\} dE' d\Omega' + S(r, E, \Omega, t) \quad (3.3)$$

Şeklinde tanımlanır [31]. Nötron taşınım denkleminde yer alan, ϕ açısal nötron akısını, v nötron hız vektörünü, t zamanı, E nötron enerjisini, Σ malzemenin belirli bir reaksiyon için makroskopik tesir kesitini ve S ise nötron kaynağını ifade etmektedir. Nötron taşınım denkleminde yer alan kaynak DT füzyon enerji kaynağı olarak denkleme dahil edildiğinde;

$$\left(\frac{1}{v}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Omega \nabla_{\phi} + \sum_t (r, E) \phi(r, E, \Omega, t) = \iint_{4\pi} \left\{ \sum_s (E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E', \Omega', t) \right\} dE' d\Omega' + \left[\frac{1}{4\pi} (X_{DT}(E) < \sigma v > n_D(r, t) n_T(r, t)) \right] \quad (3.4)$$

Denkleme dönüşmektedir. Nötron taşınım denkleminde yer alan,

$$\sum_t (r, E) \phi(r, E, \Omega, t) \quad (3.5)$$

Reaktördeki nötron kayıplarını,

$$\sum_s (E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E', \Omega', t) \quad (3.6)$$

Nötronların saçılma ile akıya etkisini,

$$\left[\frac{1}{4\pi} (X_{DT}(E) < \sigma v > n_D(r, t) n_T(r, t)) \right] \quad (3.7)$$

Füzyon nötron kaynağını ifade etmektedir. Nötron taşınım denkleminin DT füzyon kaynağı kısmında yer alan $X_{DT}(E)$ füzyon netron spektrumunu, $\langle \sigma v \rangle$ parçacık hızının füzyon tesir kesiti ile çarpımını, n_D ve n_T sırasıyla döteryum ve trityum izotoplarının yoğunluklarını ifade etmektedir. Füzyon nötronlarının izotropik yayılması sebebiyle denklem 4π ile bölünmektedir [32].

3.1.3. Reaktör Güç Dengesi Hesaplamaları

Füzyon reaktörlerinde yapılan güç hesaplamalarında, reaktörde üretilen güç kaynağın hacim değeri ile doğru orantılı, alan ile ters orantılıdır. Yarıçapın r olarak tanımlandığı bir küresel geometride sırasıyla hacim ve alan;

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (3.8)$$

$$A = 4\pi r^2 \quad (3.9)$$

denklemleri ile bulunmaktadır.

DT plazması ile sürdürülen füzyon reaksiyonlarında enerjinin %80'i nötronlar tarafından taşındığı için reaktörün ilk duvarındaki nötron güç akısı akısı;

$$P_W = 0,8 \times P_{DT} \times V/A \quad (3.10)$$

Denklemi ile bulunmaktadı [25]. Denklemden yer alan 0,8 katsayısı nötronlar tarafından taşınan enerji yüzdesini ifade etmektedir. Bu denklemde yer alan;

P_{DT} = füzyon gücü yoğunluğunu ifade etmektedir. (MW/m³)

Füzyon reaktöründe üretilen elektrik enerjisini bulabilmek için;

$$P_E = M \times \eta_C \times P_{DT} \times V \quad (3.11)$$

denklemi kullanılır. Söz konusu denklemde yer alan;

η_C = reaktörde üretilen füzyon enerjisinin, elektrik enerjisine dönüşme yüzdesini ve denklemde yer alan M , reaktörün katmanlarında biriken füzyon enerjisi sebebi ve füzyon gücündeki artışı ifade eden enerji çoğaltım faktörünü ifade etmektedir.

3.2. Sayısal Hesaplama Yöntemi

Modellemesi yapılan manyetik füzyon reaktöründe yakıt olarak döteryum – trityum plazması kullanılmış olup, değişen zırh ve soğutucuların nötronik performansları, trityum üretim oranları, ısı akısı, nükleer ısı üretimi, ^1H , ^4He üretim oranları ve DPA incelenmiştir. Kullanılan plazma, ilk duvar, zırh ve soğutucuların reaktör içerisindeki davranışları için MCNP5 kodu kullanılmıştır.

3.2.1. Monte Carlo N – Parçacık Taşınım Kodu (MCNP)

MCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code/ Monte Carlo N – Parçacık Taşınım Kodu) kodu nötron, foton ve elektronların zamana bağlı sürekli enerji geçişini (transport) üç boyutlu geometride çözen genel bir koddur. MCNP kodunda hem sabit kaynak hem de kritik altı problemleri çözebilir. MCNP'nin sağladığı üç boyutlu geometrik tanımlamaları ile reaktör aslına uygun modellenebilmektedir. Yapılan modelleme sonucunda akımlar, akılar, enerji oluşumu, detektör verimi ve reaksiyon oranları olarak elde edilir. Spesifik uygulama alanları arasında, bunlarla sınırlı olmamak üzere, radyasyondan korunma ve dozimetri, radyasyon kalkanı, radyografi, tıbbi fizik, nükleer kritik güvenlik, detektör tasarımı ve analizi, hızlandırıcı hedef tasarımı, fisyon ve füzyon reaktörü tasarımı, bulunmaktadır [33]. MCNP'yi çok yönlü ve kullanımı kolay kılan önemli standart özellikler arasında yüzey kaynaklarının kolay ve geniş çaplı kullanımı, geometri ve kaynağa bağlı uzantıların analiz edilebilmesi ve geniş çaplı tesir kesiti kütüphanesine sahip olması nükleer reaktör tasarımı için, programı oldukça yararlı bir hale getirmektedir.

4. SAYISAL SONUÇLAR VE İRDELEME

Yapılan bu çalışmada, değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerinin trityum üretim oranına, enerji çoğaltım faktörüne, reaktör güç dengesi hesaplamalarına, ısı akısına, nükleer ısı üretimine, ^1H gazı ^4He gazı üretimine, atom başına yer değiştirme değerlerine etkileri incelenmiştir. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerinin karşılaştırılması için, sekiz farklı model kullanılmıştır. Literatürde yer alan malzeme ve reaktör geometrileri dikkate alınarak seçilen malzemelerin izotop yoğunlukları reaktör hesaplamalarının ilk adımıdır. İkinci adım olarak, nötron taşınım denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Söz konusu denklemin analitik çözümü mümkün değildir. Bunun yerine, ancak tesir kesitleri kullanılarak numerik olarak çözüm yapılabilir. Malzeme, geometri ve nötron ilişkisine göre çözümü yapılan bu denklemde yer alan tesir kesitleri CLAW-IV kütüphanesinden alınmıştır. 30 enerji grubundan oluşan bu kütüphane kullanılarak çalışmada yer alan 4.2 ve sonrasındaki bölümlerde yer alan hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde yapılan hesaplamalara dair temel kavramlar, tanımlamalar ve hesaplama sonuçları bu bölümde incelenecektir. Modellemesi tamamlanan manyetik füzyon reaktöründe kullanılan birinci duvar ve soğutucu malzemeleri Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Manyetik füzyon reaktöründe kullanılan birinci duvar ve soğutucu malzemeleri

Model	Birinci Duvar	Soğutucu
1. Model	1DS-ODS	FLiBe
2. Model	1DS-ODS	FLiNa
3. Model	1DS-ODS	FLiNaK
4. Model	1DS-ODS	Li
5. Model	SiC	FLiBe
6. Model	SiC	FLiNa
7. Model	SiC	FLiNaK
8. Model	SiC	Li

4.1. İzotop Yoğunlukları

Bilgisayar programları ile hesaplamaları yapılan reaktör modellemelerinde, modellerde kullanılan izotopların atomik yoğunlukları hesaplanmalıdır. Geometrisi tanımlanan manyetik füzyon reaktörünün manto yapısında bulunan ve sekiz modelde kullanılan malzemelerin atomik yoğunlukları Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan denklemler, atomların izotoplarında geçerli olmakla beraber karışımlar içinde aynı denklemler geçerli olmaktadır. Farklı izotoplardan oluşmakta olan bir moleküldeki atom yoğunluklarının hesaplanması sırasında ağırlık ve yoğunluk değerleri, atom ağırlığı ve atom yoğunluğu değerleri halini alacaktır.

Buna göre 0,2 g/cm³ yoğunluğuna ve 60,08 g/mol molekül ağırlığına sahip SiO₂ molekülünün yoğunluğu;

$$N_{SiO_2} = \frac{(0,2 \text{ g/cm}^3) \times (0,6022 \text{ molekül} - \text{cm}^2/\text{mol} - b)}{60,08 \text{ g/mol}} = 2,005 \times 10^{-3} \frac{\text{molekül}_{SiO_2}}{b - \text{cm}}$$

Olarak bulunur. SiO₂ molekülünde bir adet Si, iki adet O atomu bulunmaktadır. Si ve O atomik yoğunluklarını bulmak için SiO₂ molekülünün molekül yoğunluğu Si için bir ile, O için iki ile çarpılmalıdır. Buna göre Si ve O atom yoğunlukları;

$$N_{Si} = 2 \times N_{SiO_2} = 2,005 \times 10^{-3} \frac{\text{atom}}{b - \text{cm}}$$

$$N_O = 2 \times N_{SiO_2} = 4,01 \times 10^{-3} \frac{\text{atom}}{b - \text{cm}}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Aynı şekilde bir elementin izotop yoğunluğu hesaplanmak istenirse, bulunan atomik yoğunluk değeri, izotopun bolluğu ile çarpılır. Bulunan izotop yoğunlukları daha önceki bölümde ifade edilen sekiz modelde yer alan bütün malzemeler için hesaplanmalıdır. Yapılmış olan MCNP modelinde girdi dosyasında yer alan atomik yoğunluk değerleri Çizelge 7.1-7.8'de listelenmektedir. Elde edilen sonuçlara göre reaktör katmanlarında yer alan izotop yoğunlukları ve bu yoğunluk değerlerinin değişiminin etkisinin çalışmanın sonraki bölümlerinde yer alan hesaplama sonuçlarına etkileri gözlemlenebilmektedir.

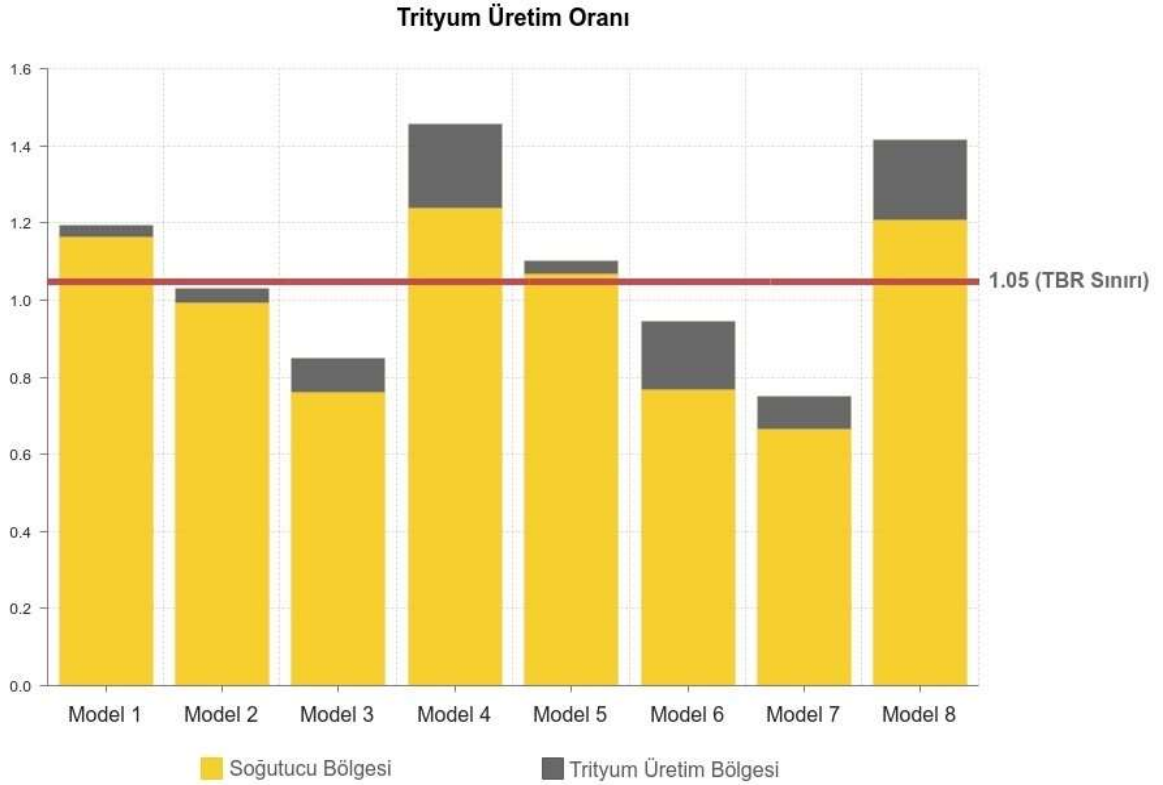
4.2. Tritiyum Üretim Oranı (Tritium Breeding Ratio)

Füzyon reaktörünün manto yapısında üretilen trityum üretim miktarının, plazmadaki trityumun yanma miktarına oranı trityum üretim oranı (TBR) olarak tanımlanmaktadır. DT füzyon reaksiyonunun temeli olan trityum izotopu doğada bulunmamaktadır ve füzyon reaksiyonunun devamlılığı için reaktör manto yapısında üretimi yapılmalıdır. Tritiyum, kararsız ve kısa sürede bozunan bir izotop olduğu için üretildikten kısa bir süre içerisinde reaktörde kullanılmalıdır. Rezerv olarak bekletildiği zaman reaktörün işletilmesi için gereken TBR değeri zamana bağlı olarak artmaktadır. Tritiyumun bozunma süresi ve diğer kayıplar dikkate alındığında, yeterli miktarda trityum üretiminin yapılabilmesi ve sürdürülebilir füzyon reaksiyonları için $TBR \geq 1,05$ olmalıdır [34]. Tritiyum, reaktörün lityum izotopları içeren soğutucu ve trityum üretim bölgesinde üretilmektedir. Toplam trityum üretim oranı soğutucu ve trityum üretim bölgesindeki TBR değerlerinin toplanması ile hesaplanmaktadır. Füzyon reaktörlerinde TBR değerini etkileyen üç temel etkenden birincisi olan nötron yavaşlatma özelliğidir. İlk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS çeliğinin nötron yavaşlatma yeteneği SiC'e göre daha yüksek olması sebebiyle TBR değerleri ilk dört modelde diğer modellere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bunun sebebi, yavaşlayan nötronlar sayesinde soğutucu bölgesi malzemelerinde bulunan lityum izotoplarının TBR değerinin artmasıdır.

Çizelge 4.2. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre sekiz modelin TBR değerleri

Model Numarası	Soğutucu Bölgesi	Tritiyum Üretim Bölgesi	Toplam
1	1,162	0,031	1,193
2	0,993	0,038	1,031
3	0,760	0,089	0,849
4	1,238	0,219	1,457
5	1,069	0,033	1,102
6	0,769	0,177	0,946
7	0,666	0,084	0,750
8	1,209	0,208	1,417

Çizelge 4.2’de listelenen TBR değerleri incelendiğinde ilk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS çeliğinin kullanıldığı modellerde sadece model 1 ve model 4’ün reaktörün kendi kendini çalıştırabilmesi için gereken TBR değeri sınırını geçebildiği görülmüştür. SiC’in ilk duvar malzemesi olarak kullanıldığı modellerde ise model 5 ve 8 in yeterli TBR değerine ulaştığı görülmektedir. TBR değerine etki eden ikinci etken olan soğutucu malzemelerindeki lityum izotoplarının yoğunluk değerleridir. Çizelge 7.2-7.9’da listelenen atomik yoğunluk miktarları incelendiğinde model 4 ve model 8’in en yüksek lityum yoğunluk miktarına sahip olduğu görülmektedir. Bu sayede model 4 ve model 8’in TBR değerleri çalışmada kullanılan bütün modellere göre çok daha yüksektir. TBR değerine etki eden üçüncü etken ise soğutucu malzemelerdeki inelastik saçılma yaparak nötronların enerjisini azaltan F ve nötron çoğaltma özelliğine sahip olan Be izotoplarının miktarıdır. Bu sayede lityum yoğunluğu fazla olması, F ve Be izotoplarının nötron artışı olumlu şekilde etkilemesi sebebiyle sebebiyle model 1 ve model 5’de soğutucu malzemesi olarak kullanılan FLiBe yeterli TBR değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.1. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre sekiz modelin TBR değerleri

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, model 1, 4, 5 ve 8 reaktörün kendi kendine yetebilmesi için gerekli olan TBR sınır değerinin üzerinde TBR değerine sahiptir. Ayrıca reaktör katmanları plazmadan uzaklaştıkça nötron akısı azalmaktadır. Bu sebeple, trityum üretim bölgesi plazmaya soğutucu bölgesine göre daha uzak olduğu için trityum üretimindeki katkısı soğutucu bölgesinden daha az olduğu görülmüştür.

4.3. Enerji Çoğaltım Faktörü

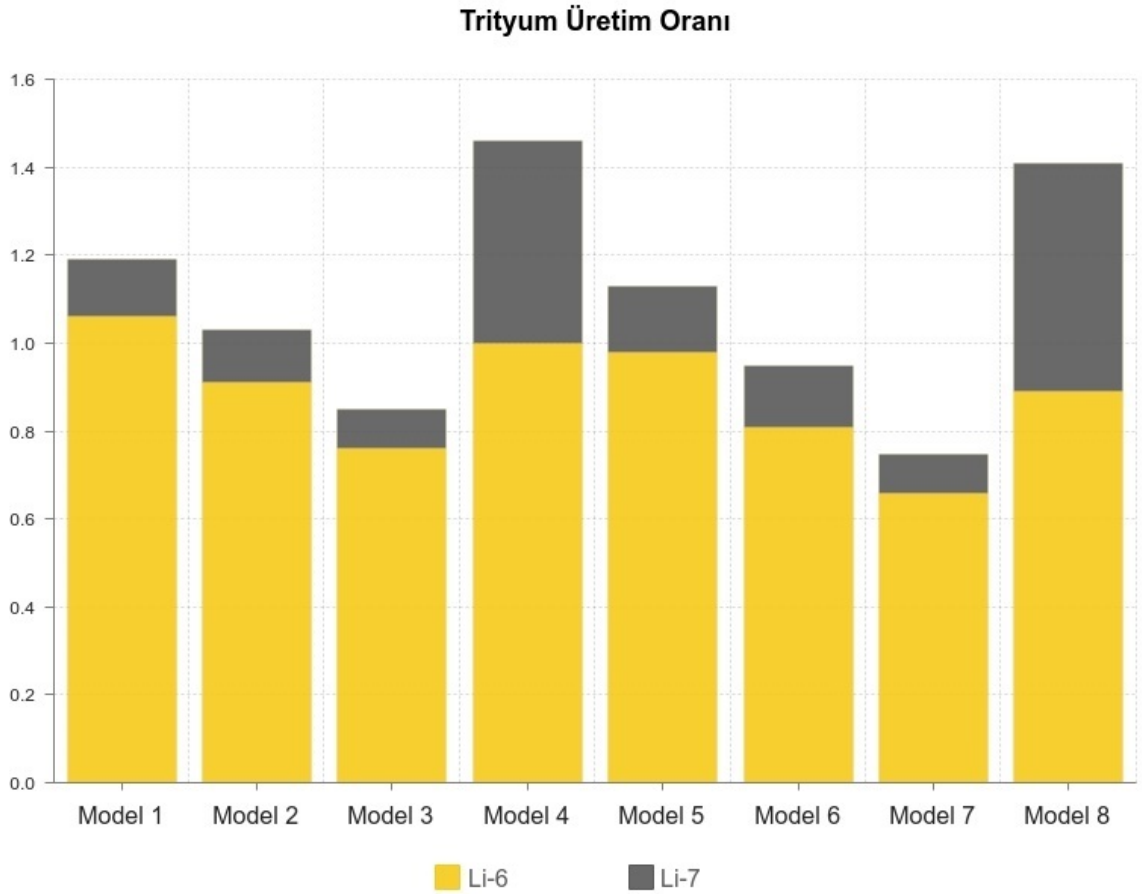
Enerji çoğaltım faktörü, sistemde depolanan toplam enerjinin nötron kinetik enerjisine oranı olarak ifade edilmektedir. Reaktörde gerçekleşen füzyon reaksiyonları sonucu açığa çıkan nötron, alfa ve gama ışımaları sebebiyle reaktörde güç kaybı yaşanmaktadır. Söz konusu güç kaybını telafi etmek ve daha yüksek termal güç üretilebilmesi için, reaktörde üretilen enerji plazmanın enerjisinden yüksek olmalıdır. Bunun için, enerji çoğaltım faktörünün yüksek ve en az 1,2 değerinde olması gerekmektedir [35]. Enerji çoğaltım faktörü hesaplanmasında ısı enerjisi üretimi ve tüketimi açısından en önemli olan iki etken, ekzotermik ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ ve endotermik ${}^7\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ reaksiyon enerjileri göz önüne alındığında;

$$M = 1 + \frac{4.784 * T_6 - 2.467 * T_7}{14.1} \quad (4.1)$$

Denklemleri ile hesaplanmaktadır. Denklemlerde yer alan T_6 ve T_7 değerleri sırasıyla ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ izotoplarının trityum üretim oranlarını ifade etmektedir. Çalışmada yer alan bütün modellerin enerji çoğaltım faktörü sonuçları, Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Sekiz reaktör modelinin enerji çoğaltım faktörü değerleri

Model	İlk Duvar	Soğutucu	Enerji Çoğaltım Faktörü
1	1DS-ODS	FLiBe	1,338
2	1DS-ODS	FLiNa	1,288
3	1DS-ODS	FLiNaK	1,242
4	1DS-ODS	Li	1,259
5	SiC	FLiBe	1,308
6	SiC	FLiNa	1,297
7	SiC	FLiNaK	1,208
8	SiC	Li	1,212



Şekil 4.2. Sekiz reaktör modelinde yer alan ^6Li ve ^7Li izotoplarının trityum üretim oranları

Çizelge 4.3’de listelenen sonuçlara göre çalışmada kullanılan bütün modellerin yüksek termal güç için gerekli olan $M > 1,2$ şartını sağladığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre FLiBe’nin soğutucu malzeme olarak kullanıldığı model 1 ve model 5’in en yüksek M değerine ulaştığı görülmektedir. TBR değeri model 4 ve model 8 de en yüksek değerlere ulaşmasına rağmen M değerinde bu sıralamanın aynı şekilde kalmamasının sebebi soğutucu malzeme olarak lityum kullanıldığında endotermik reaksiyon enerjisi ile ^7Li izotop miktarının yüksek olması sebebiyle M değerinde düşüş meydana gelmektedir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2 göz önünde bulundurulduğunda, T_7 değerinin en yüksek olduğu model 8’in enerji çoğaltım faktörü oldukça düşük bir seviyededir. Hesaplamalar sonucu elde edilen ^6Li ve ^7Li izotoplarının trityum üretim oranları, Çizelge 7.9’da listelenmektedir.

4.4. Reaktör Güç Dengesi Hesapları

Füzyon reaktörlerinde plazmada açığa çıkan güç ilk duvardaki nötron akısı ile doğru orantılı olarak bulunmaktadır. Plazmada açığa çıkan güç;

$$P_{\text{Plazma}} = \phi \left(\frac{n}{s} \right) \times 14.1 \left(\frac{\text{MeV}}{n} \right) \times 1.609 \times 10^{-13} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{MeV}} \right) \quad (4.2)$$

Denklemleri ile bulunmaktadır. Denklemlerde yer alan ϕ ilk duvardaki nötron akısını ifade etmektedir. İlk duvardaki nötron akısı $2.22 \times 10^{14} \left(\frac{n}{s} \right)$ olarak hesaplamalara dahil edildiğinde, P_{Plazma} 500 MW olarak hesaplanmaktadır. Reaktördeki ısı güç ise;

$$P_{\text{Isıl}} = 0.8 \times M \times P_{\text{Plazma}} \quad (4.3)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Reaktörün elektrik gücünü, Denklem 3.8, 3.9, 3.10 ve 3.11 kullanılarak hesaplanmaktadır. Çalışmada yer alan sekiz modelin enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri Çizelge 4.4 ve 4.5’de listelenmiş olup hesaplamalara dahil edildiğinde;

Çizelge 4.4. Modellenen manyetik füzyon reaktörünün temel parametreleri

Parametre	Kısaltma	Birim	Sonuç
Plazma hacmi	V	m ³	113,097
Plazma alanı	A	m ²	113,097

Çizelge 4.5. Sekiz reaktör modelinin ısı ve elektrik gücü değerleri

Model No.	Reaktör Gücü (MWth)	Reaktör Gücü (MWe)
1	535,1	214,0
2	515,2	206,1
3	496,9	198,8
4	503,7	201,5
5	523,0	209,2
6	500,1	200,0
7	483,0	193,2
8	484,6	193,9

Çizelge 4.13’de listelenen reaktör gücü değerlerine göre, enerji çoğaltım faktörünün azaldığı modellerde reaktörün termal ve elektrik gücünde azaldığı görülmektedir.

4.5. Isı Akısı ve Nükleer Isı Üretimi

Füzyon reaksiyonu sonucunda, plazmadan açığa çıkan nötronlar reaktörün ilk duvar, soğutucu ve trityum üretim bölgelerinde nükleer reaksiyonlara sebep olmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda reaktör katmanlarında nükleer ısı üretimi gerçekleşmektedir. Çalışmada, kullanılan sekiz modeldeki reaktörün bütün katmanları için ısı akısı ve nükleer ısı üretimi hesaplanmıştır.

Isı akısı ve nükleer ısı üretimi hesapları sonucunda en yüksek nükleer ısı üretimi ilk duvar ve soğutucu katmanlarında açığa çıkarken reaktörün plazmaya en uzak bölgesi olan mıknatıs katmanında ise ısı akısı ve nükleer ısı üretimi oldukça küçük bir değere sahiptir. Reaktörün en yüksek verimle ve en uzun sürede işletilebilmesi için birinci duvar katmanındaki ısı akısının ve nükleer ısı üretiminin olabildiğince düşük değerlere sahip olması gerekmektedir. Bununla birlikte, reaktörden daha yüksek ısı enerjisi elde edebilmek için soğutucu katmanında yüksek, mıknatısın yapısının bozulmaması için olabildiğince düşük miktarda nükleer ısı üretimi olmalıdır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen ısı akısı ve nükleer ısı üretimi değerleri Çizelge 4.6 ve 4.7’de listelenmiştir.

Çizelge 4.6. Sekiz reaktör modelinin ısı akısı değerleri

Isı Akısı (W/cm ²)								
Model Bölge	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,81E+01	1,80E+01	1,79E+01	1,74E+01	3,38E+01	3,36E+01	3,32E+01	3,25E+01
3	3,90E+02	3,51E+02	3,31E+02	3,62E+02	3,99E+02	3,55E+02	3,36E+02	3,69E+02
4	1,73E+00	1,89E+00	3,88E+00	2,53E+01	1,93E+00	2,11E+00	4,29E+00	2,77E+01
5	5,83E+00	7,01E+00	1,63E+01	4,51E+01	6,30E+00	7,29E+00	1,55E+01	4,43E+01
6	6,75E-01	7,18E-01	1,49E+00	9,98E+00	7,57E-01	7,99E-01	1,65E+00	1,11E+01
7	8,14E-02	8,96E-02	1,83E-01	1,30E+00	9,43E-02	1,01E-01	2,08E-01	1,44E+00
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	6,62E-04	6,27E-04	1,32E-03	9,49E-03	7,74E-04	7,52E-04	1,47E-03	1,05E-02

Çizelge 4.7. Sekiz reaktör modelinin nükleer ısı üretimi değerleri

Nükleer Isı Üretimi (W/cm ³)								
Model Bölge	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,20E-01	1,20E-01	1,16E-01	1,19E-01	2,23E-01	2,25E-01	2,16E-01	2,21E-01
3	2,14E+00	2,38E+00	2,21E+00	2,02E+00	2,16E+00	2,44E+00	2,25E+00	2,05E+00
4	1,06E-02	9,68E-03	1,42E-01	2,17E-02	1,18E-02	1,08E-02	1,55E-01	2,40E-02
5	3,82E-02	3,18E-02	2,46E-01	8,88E-02	3,97E-02	3,43E-02	2,41E-01	8,43E-02
6	3,76E-03	3,53E-03	5,23E-02	7,79E-03	4,18E-03	3,96E-03	5,81E-02	8,65E-03
7	4,52E-04	4,11E-04	6,54E-03	9,26E-04	5,12E-04	4,76E-04	7,29E-03	1,05E-03
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	3,02E-06	3,19E-06	4,58E-05	6,38E-06	3,63E-06	3,73E-06	5,08E-05	7,07E-06

İlk duvar malzemelerindeki değişimin reaktörün manto yapısında açığa çıkan ısı akısı ve nükleer ısı üretimi miktarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de listelenen sonuçlara göre ilk duvar malzemesi olarak SiC kullanılan modellerde ısı akısı ve nükleer ısı üretimi 1DS-ODS çeliği kullanılan modellere göre yüksek olduğu görülmektedir. İlk duvarda nükleer ısı üretiminin yüksek olması, ilk duvar malzemesinin ömrünü oldukça azaltmaktadır. Buna ek olarak soğutucu bölgesindeki nükleer ısı üretimi miktarı reaktörden elde edilen ısı ve elektrik gücüne etki etmektedir. Söz konusu etkiyi artırabilmek için nötronlarla ekzotermik reaksiyon yapan ⁶Li izotop miktarının artırılması yani lityum zenginleştirilmesi yapılması gerekmektedir. 1DS-ODS çeliği kullanılan model 1 ve model 2’nin mıknatıs katmanındaki ısı akısı ve nükleer ısı üretimi değerinin en az olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplamaların sonuçları ITER’in mıknatıs katmanındaki nükleer ısı üretimi değerleri ile karşılaştırıldığında, elde sonuçlar ITER mıknatısındaki sonuçlara göre oldukça düşük hesaplanmıştır. Söz konusu duruma göre, yapılan modellemelerde kullanılan mıknatıs malzemelerinin bu çalışma için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Nükleer ısı üretimi hesaplamaları sonucunda, sekiz modelden ilk duvar ve mıknatısın en az ısı hasarına maruz kalan model 1 ve model 2’nin malzeme ömrü diğer modellere göre çok daha uzun olmaktadır.

4.6. Gaz Üretimi

Füzyon reaksiyonlarında açığa çıkan yüksek enerjik nötronlar reaktörün ilk duvarında reaksiyonlara girerek radyasyon hasarına neden olur. Bu reaksiyonların

sonucunda birinci duvar malzemesinde helyum ve hidrojen gazı üretimi gerçekleşir. Hidrojen gazı yüksek çalışma sıcaklıklarında malzemenin yapısından dışarı çıkarken helyum gazı malzemenin içerisinde kalır ve zamanla ilk duvar malzemesinin özelliğini yitirmesine ve malzeme ömrünün önemli derecede azalmasına neden olur. Bu nedenle ilk duvarda helyum gazı üretiminin incelenmesi gerekmektedir ve ilk duvar malzemesinin değiştirilme periyodunu hesaplamak için, helyum gazının üst üretim değeri 500 appm olarak belirlenmiştir ve hesaplamalar bir tam güç yılına (FPY) göre yapılmıştır [23]. Çizelge 4.8'de listelenen sonuçlara göre 1DS-ODS çeliği kullanılan modellerin SiC kullanılan modellere göre ilk duvar malzemesinin çok daha uzun ömürlü olacağı görülmektedir.

Çizelge 4.8. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre H ve ^4He izotoplarının üretim miktarları

Model	İlk Duvar	Soğutucu	H (appm)/FPY	^4He (appm)/FPY
1	1DS-ODS	FLiBe	1290	460
2	1DS-ODS	FLiNa	1280	458
3	1DS-ODS	FLiNaK	1280	456
4	1DS-ODS	Li	1250	446
5	SiC	FLiBe	1460	1520
6	SiC	FLiNa	1440	1500
7	SiC	FLiNaK	1420	1490
8	SiC	Li	1410	1470

4.7. Atom Başına Yer Değiştirme (Displacement Per Atom)

İlk duvar malzemesinde, plazmadan açığa çıkan yüksek enerjili nötronlar ve helyum izotoplarının etkisiyle malzemenin yapısındaki atomların yer değiştirmesi DPA olarak tanımlanmaktadır. Reaktörün ilk duvar malzemesindeki radyasyon hasarının ölçülmesinde kullanılan bu parametrenin, ilk duvar malzemesinin bozulması ve işlevini yitirmesi gibi istenmeyen durumlardan kaçınılması için olabildiğince düşük seviyelerde olması gerekmektedir. Çalışma kapsamında DPA üst limit değeri 100 appm olarak belirlenmiştir [23] ve değişen ilk duvar ve soğutucu malzemelerine göre DPA değerleri ve ilk duvar değişim periyotlarının sonuçları Çizelge 4.9 ve 4.10'da listelenmektedir.

Çizelge 4.9. Değişen ilk duvar ve soğutucu malzemesine göre DPA değerleri

Model	İlk Duvar	Soğutucu	DPA/FPY
1	1DS-ODS	FLiBe	54,6
2	1DS-ODS	FLiNa	54,5
3	1DS-ODS	FLiNaK	53,6
4	1DS-ODS	Li	51,6
5	SiC	FLiBe	48,9
6	SiC	FLiNa	48,5
7	SiC	FLiNaK	47,0
8	SiC	Li	46,3

He/DPA oranı hangi hasar parametresinin öncelikli olarak değerlendirileceğini belirler. He ve DPA arasındaki oran (500/100 appm) 5'ten büyük olduğunda, helyum gazı üretimi atomların yer değiştirmesinden daha erken ortaya çıkmaktadır ve ilk duvarın değişim periyodu helyum gazı üretimine göre hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.9'da gösterilmekte olan sonuçlara göre bütün modellerin DPA değerleri birbirine oldukça yakındır ve Çizelge 4.10'da listelenen sonuçlara göre 1DS-ODS çeliği kullanılan modellerde ilk duvarın değişim periyodu SiC kullanılan modellere göre çok daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 4.10. Sekiz modelin ilk duvar değişim periyotları

Model	İlk Duvar	Soğutucu	⁴ He/DPA	Değişim Periyodu (yıl)
1	1DS-ODS	FLiBe	8,42	1,088
2	1DS-ODS	FLiNa	8,40	1,093
3	1DS-ODS	FLiNaK	8,51	1,096
4	1DS-ODS	Li	8,65	1,120
5	SiC	FLiBe	31,13	0,329
6	SiC	FLiNa	31,01	0,333
7	SiC	FLiNaK	31,67	0,336
8	SiC	Li	31,77	0,340

4.8. Sayısal Sonuçların Değerlendirilme Esasları

Çizelge 4.2’de listelenen sonuçlara göre, TBR değeri 1,05 değerinin altında kalan modeller reaktörün çalışması için gereken TBR değerinin altında kalması sebebiyle değerlendirme kapsamı dışında bırakılması gerekmektedir.

Çalışmadaki modellerin hepsi minimum M kriterini sağladıkları için, TBR kriterini sağlayan modeller dikkate alınmalı ve çalışmanın diğer adımlarında sadece bu modeller değerlendirme kapsamına alınmıştır. Yeterli M değerine sahip olan modellerin ısı ve elektrik güç üretim değerleri M değeri ile doğru orantılı olarak artacak veya azalacaktır. Reaktör modellemelerinin değerlendirilmesi aşamasında TBR ve M alt limit değerlerinin üzerinde olan modellerin performans değerlendirilmesi reaktörde üretilen ısı ve elektrik gücü değerlerine göre yapılmıştır.

Reaktör geometrisinin, manto yapısının ve bileşenlerinin doğru olarak belirlenmesinin reaktör performansı üzerinde hayati önemi vardır. Bu esaslara göre doğru modellenmiş olan füzyon reaktörlerinde yapılan ısı akısı ve nükleer ısı üretimi hesaplamaları tamamlandıktan sonra modeller arasında değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirme kapsamında, reaktörün ilk duvar ve mıknatıs kapsamındaki ısı akısı ve nükleer ısı değerlerinin olabildiğince düşük tutulması gerekmektedir. Yapılan hesaplamalarda elde edilen bulgular literatürdeki bilgilerle kıyaslanmıştır.

Sürdürülebilir enerji üretimi ve reaktördeki malzemelerin uzun ömürlü olması füzyon reaktörü modellemesi yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisidir. Füzyon reaksiyonu sonucunda üretilen ^1H ve ^4He izotopları reaktör malzeme ömrünü ve malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Buna ek olarak reaktörün ilk duvar bölgesinde DPA hesaplamaları da yapılarak modeller arasında en uygun olanı bulunmalıdır. Bütün değerlendirme süreçleri ve Çizelge 4.11’de listelenen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda seçilen en uygun model ile, diğer modellere göre daha verimli ve daha uzun süre işletilebilecek manyetik füzyon reaktörü modeli belirlenmiş olur.

Çizelge 4.11. Çalışmadaki sekiz reaktör modelinin sayısal sonuçları

Model No.	TBR	M	Reaktör Gücü (MWth)	Reaktör Gücü (MWel)	Isı Akısı (W/cm ²) (Mıknatıs Katmanı)	İNükleer Isı Üretimi (W/cm ³) (Mıknatıs Katmanı)	H (appm)	He (appm)	DPA (appm)	Birinci Duvarın Değişim Periyodu (yıl)
1	1,193	1,338	535,1	214,0	6,62E-04	3,19E-06	1290	460	54,6	1,088
2	1,031	1,288	515,2	206,1	6,27E-04	3,02E-06	1280	458	54,5	1,093
3	0,849	1,242	496,6	198,8	1,32E-03	6,38E-06	1280	456	53,6	1,096
4	1,457	1,259	503,7	201,5	9,49E-03	4,58E-05	1250	446	51,6	1,120
5	1,102	1,308	523,0	209,2	7,74E-04	3,73E-06	1460	1520	48,9	0,329
6	0,946	1,297	500,1	200,0	7,52E-04	3,63E-06	1440	1500	48,5	0,333
7	0,750	1,208	483,0	193,2	1,47E-03	7,07E-06	1420	1490	47,0	0,336
8	1,417	1,212	484,6	193,9	1,05E-02	5,08E-05	1410	1470	46,3	0,340

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada modellemesi tamamlanan manyetik füzyon reaktörünün sekiz farklı model ile trityum üretim oranları, ısı akısı, nükleer ısı üretimi, gaz üretimi ve atomik yer değişimi (DPA) miktarları incelenmiştir. Manyetik füzyon reaktöründe ilk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS çeliği ve SiC, soğutucu bölgesinde ise sırasıyla FLiBe, FLiNa, FLiNaK ve Li kullanılarak sekiz farklı model oluşturulmuştur. Reaktörün yansıtıcı bölgesinde grafit kullanılırken, yalıtım bölgesinde SiO₂ kullanılmıştır. Hesaplamalarda reaktör geometrisi olarak küresel geometri kullanılmıştır. Bu koşullar altında modellerde kullanılan malzemelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.

Soğutucu malzemelerindeki değişimin trityum üretim miktarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. İlk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS çeliği kullanılan modellerde, SiC kullanılan modellere göre daha yüksek trityum üretim oranları hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan sekiz modelde, model 1,4,5 ve 8'in reaktörün işletilebilmesi için yeterli TBR değerine sahip olduğu görülmüştür.

Hesaplanan enerji çoğaltım faktörü değerlerine göre, çalışmada kullanılan bütün modellerin yeterli enerji çoğaltım faktörü değerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre FLiBe'nin soğutucu malzeme olarak kullanıldığı model 1 ve model 5'in en yüksek M değerine ulaştığı görülmektedir.

İlk duvar malzemelerindeki değişimin reaktörün manto yapısında açığa çıkan ısı akısı ve nükleer ısı üretimi miktarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre ilk duvar malzemesi olarak SiC kullanılan modellerde ısı akısı ve nükleer ısı üretimi 1DS-ODS çeliği kullanılan modellere göre yüksek olduğu görülmektedir. 1DS-ODS çeliği kullanılan model 1 ve model 2'nin mıknatis katmanındaki ısı akısı ve nükleer ısı üretimi değerinin en az olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplamaların sonuçları ITER'in mıknatis katmanındaki nükleer ısı üretimi değerleri ile karşılaştırıldığında, elde sonuçlar ITER mıknatisindeki sonuçlara göre oldukça düşük hesaplanmıştır. Söz konusu duruma göre, yapılan modellemelerde kullanılan mıknatis malzemelerinin bu çalışma için uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, çalışmada kullanılan sekiz model için gaz üretim miktarları ve DPA değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 1DS-ODS çeliği kullanılan modellerin SiC kullanılan modellere göre ilk duvar malzemesinin çok daha uzun ömürlü olacağı görülmüştür. Hesaplama sonuçlarına göre bütün modellerin DPA değerleri birbirine oldukça yakındır. Elde edilen ^4He üretimi ve DPA sonuçlarına göz önünde bulundurulduğunda 1DS-ODS çeliği kullanılan modellerde ilk duvarın değişim periyodu SiC kullanılan modellere göre çok daha yüksek çıkmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre ilk duvar malzemesi olarak 1DS-ODS ve soğutucu olarak FLiBe kullanılan model 1 değerlendirilmeye alınan diğer modellere göre en iyi sonuçlar elde edilen modeldir. Söz konusu model değerlendirme kriterleri esas alındığında en iyi nötronik performansa sahip modeldir.

5.2. Öneriler

Yapılan çalışmada değerlendirilen malzeme kombinasyonları ve değerlendirme yöntemleri ile elde edilen sonuçların gelecekte yapılan manyetik füzyon reaktörleri ile ilgili çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir ve bundan sonra yapılacak çalışmalar için aşağıdaki önermeler dikkate alınabilir.

- Katı duvar konsepti yerine sıvı duvar konsepti değerlendirmeye alınarak farklı ilk duvar malzemelerinin nötronik performansı karşılaştırılabilir.
- Soğutucu bölgesinde yer alan soğutucu malzemelerin lityum izotopları oranları artırılabilir.
- Soğutucu olarak ^6Li yönünden zenginleştirilmiş soğutucu ve trityum üretim malzemesi kullanılarak TBR ve M değerleri hesaplanarak mevcut çalışma ile karşılaştırması yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] EDDINGTON, Arthur, The Internal Constitution of the Stars, Cambridge University Classics, 321s., 1988.
- [2] Greenberger, D., Hentschel, K., Weinert, F., Compendium of Quantum Physics. Greenberger, D., Hentschel, K. and Weinert, F. (eds.), Springer, Berlin. 799–802s., 2009.
- [3] POST, R., Summary of UCRL Pyrotron Programme, Journal of Nuclear Energy vol.7, no.3, s.282, 1954.
- [4] EL-GUEBALY, L. A., Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958–2008): Brief Historical Overview and Discussion of Future Trends, Energies, vol.3, no.6, s.1067-1086, 2010.
- [5] Wu, Y., Şahin, S., Comprehensive Energy Systems, Fusion Energy Production. Dincer, I. and Yıldız, I. (eds.), Elsevier, Amsterdam. 545s., 2018.
- [6] Tokamak Energy, <https://www.tokamakenergy.co.uk/st40/>, (Eriřim: 14.06.2019).
- [7] WHAT IS ITER?, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>., (Eriřim: 14.06.2019).
- [8] Conventional TOKAMAKs, <http://www.TOKAMAK.info>., (Eriřim: 16.06.2019).
- [9] Hartwig, S.Z., Podpaly, A.Y., The Magnetic Fusion Energy Formulary, <http://www.psfc.mit.edu/search?query=magnetic+fusion+formulary>., (Eriřim: 13.05.2019).
- [10] BIGOT, B., ITER Construction and Manufacturing Progress Toward First Plasma, Fusion Engineering and Design, vol.146, no.30, s.124-129, 2019.
- [11] ŞAHİN S., ŞAHİNASLAN A., KAYA M., Neutronic Calculations for a Magnetic Fusion Energy Reactor with Liquid Protection for the First Wall, Fusion Technology, vol.34, no.2, s.95-108, 1998.
- [12] CATALÁN, J., OGANDO, F., SANZ, J., PALERMO, I., VEREDAS, G., GÓMEZ-ROS, 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.

- [13] 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.
- [14] ÜBEYLİ, M., On the Tritium Breeding Capability of Flibe, Flinabe, and Li20Sn80 in a Fusion-Fission (Hybrid) Reactor, Journal of Fusion Energy, vol.22, no.1, s.51-57, 2003.
- [15] 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.
- [16] İSHİBASHİ, K., FUJİMOTO, S., MATSUMOTO, T., An Optimization Study of Structure Materials, Coolant and Tritium Breeding Materials for Nuclear Fusion-Fission Hybrid Reactor, Progress in Nuclear Science and Technology, vol.4, s.130-133, 2014.
- [17] SATO, S., NİSHİTANİ, 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.
- [18] ŞAHİN, S., ŞAHİN, H. M., SÖZEN, A., Evaluation of the Neutron and Gamma-Ray Heating in the Radiation Shielding and Magnet Coils of the VISTA Spacecraft, Fusion Technology, vol.33, no.4, s.418-434, 1998.
- [19] ŞAHİN, S., ŞAHİN, H. M., Radiation Shielding Mass Saving for the Magnet Coils of the VISTA Spacecraft, Annals of Nuclear Energy, vol.26, no.6, s.509-521, 1999.
- [20] BOHM, T. D., SAWAN, M. E., JACKSON, S. T., Wilson, P. P., Detailed Nuclear Analysis of ITER ELM Coils, Fusion Engineering and Design, vol.87, no.5, s.657-661, 2012.
- [21] ŞAHİN, S., ÜBEYLİ, M., Modified APEX Reactor as A Fusion Breeder, Energy Conversion and Management, vol.45, no.9, s.1497-1512, 2004.
- [22] KRAKOWSKI, R. A., BATHKE, C. G., MILLER, R. L., WERLEY, K. A., Lessons Learned from the Tokamak Advanced Reactor Innovation and Evaluation Study (ARIES), Fusion Technology, vol.26, no.3, s.1111-1118, 1994.

- [23] CADWALLADER, L., Qualitative Reliability Issues for In-Vessel Solid and Liquid Wall Fusion Designs, Fusion Technology, vol.39, no.2, s.991-995, 2001.
- [24] TUNÇ, G., ŞAHİN, H. M., ŞAHİN, S., Evaluation of the radiation damage parameters of ODS steel alloys in the first wall of deuterium-tritium fusion-fission (hybrid) reactors, International Journal of Energy Research, vol.42, no.7, s.198-206, 2018.
- [25] Dolan, J.T., Moir, R.W., Manheimer, W., Cadwallader, L.C., Magnetic fusion technology. Dolan, J.T. (ed.), Springer, Londra. 18s., 2013.
- [26] Conditions for Fusion, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/lawson.html>, (Eriřim: 26.07.2019).
- [27] Nuclear Fusion, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fusion.html#c2>, (Eriřim: 26.07.2019).
- [28] The TOKAMAK, <http://www.ccf.ac.uk/Tokamak.aspx>, (Eriřim: 29.07.2019).
- [29] Acır A., ThO₂ Yakıtlı Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Reflektör Malzemelerin Nötronik Performansa Etkisi, Politeknik Dergisi, vol.10, no.3, s.263-270, 2007.
- [30] Los Alamos National Laboratory X-5, "Criticality Calculations with MCNP5: A Primer 2nd Edition", LANL, LA-UR-04-0294, s.130-140, 2003.
- [31] Masterson, R., Introduction to Nuclear Reactor Physics, CRC Press, Taylor & Francis Group. 484s., 2018.
- [32] Barroso, D.E.G., A Numerical Solution of the Time-Dependent Neutron Transport Equation Using the Characteristic Method. Applications to ICF and to Hybrid Fission-Fusion Systems, <https://arxiv.org/abs/1704.02861>, (Eriřim: 11.07.2019).
- [33] A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code, <https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/mcnp5.shtml>, (Eriřim: 14.05.2019).
- [34] Sawan M., Abdou M. Physics and technology conditions for attaining tritium self-sufficiency for the DT fuel cycle, Fusion Engineering and Design, vol.81, no.12, s.1131-1144, 2006.

[35] Jolodosky A., & Fratoni M., Neutronics Evaluation of Lithium-Based Ternary Alloys in IFE Blankets. <https://www.osti.gov/biblio/1182705/>, (Eriřim: 13.06.2019).



7. EKLER

Çizelge 7.1. Birinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	1DS-ODS	C-12 C-13 O Ti Cr-50 Cr-52 Cr-53 Cr-54 Fe-54 Fe-56 Fe-57 Fe-58 Y W	7,32	3,629E-04 4,074E-06 2,755E-04 3,684E-04 4,218E-04 7,822E-03 8,702E-04 2,126E-04 4,067E-03 6,157E-02 1,397E-03 1,827E-04 1,983E-04 6,474E-04
2	FLiBe	Li-6 Li-7 Be F	2,031	2,193E-03 2,276E-02 1,227E-02 4,946E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.2. İkinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	1DS-ODS	C-12 C-13 O Ti Cr-50 Cr-52 Cr-53 Cr-54 Fe-54 Fe-56 Fe-57 Fe-58 Y W	7,32	3,629E-04 4,074E-06 2,755E-04 3,684E-04 4,218E-04 7,822E-03 8,702E-04 2,126E-04 4,067E-03 6,157E-02 1,397E-03 1,827E-04 1,983E-04 6,474E-04
2	FLiNa	Li-6 Li-7 F Na	2,145	2,108E-03 2,188E-02 3,992E-02 1,597E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.3. Üçüncü modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	1DS-ODS	C-12 C-13 O Ti Cr-50 Cr-52 Cr-53 Cr-54 Fe-54 Fe-56 Fe-57 Fe-58 Y W	7,32	3,629E-04 4,074E-06 2,755E-04 3,684E-04 4,218E-04 7,822E-03 8,702E-04 2,126E-04 4,067E-03 6,157E-02 1,397E-03 1,827E-04 1,983E-04 6,474E-04
2	FLiNaK	Li-6 Li-7 F Na K	2,097	1,256E-03 1,304E-02 3,058E-02 3,516E-03 1,283E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.4. Dördüncü modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	1DS-ODS	C-12 C-13 O Ti Cr-50 Cr-52 Cr-53 Cr-54 Fe-54 Fe-56 Fe-57 Fe-58 Y W	7,32	3,629E-04 4,074E-06 2,755E-04 3,684E-04 4,218E-04 7,822E-03 8,702E-04 2,126E-04 4,067E-03 6,157E-02 1,397E-03 1,827E-04 1,983E-04 6,474E-04
2	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.5. Beşinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	SiC	C-12 C-12 Si-28 Si-29 Si-30	3,2	4,003E-02 4,493E-04 3,733E-02 1,890E-03 1,255E-03
2	FLiBe	Li-6 Li-7 Be F	2,031	2,193E-03 2,276E-02 1,227E-02 4,946E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.6. Altıncı modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	SiC	C-12 C-12 Si-28 Si-29 Si-30	3,2	4,003E-02 4,493E-04 3,733E-02 1,890E-03 1,255E-03
2	FLiNa	Li-6 Li-7 F Na	2,145	2,108E-03 2,188E-02 3,992E-02 1,597E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.7. Yedinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Manto Bölgesi	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	SiC	C-12 C-12 Si-28 Si-29 Si-30	3,2	4,003E-02 4,493E-04 3,733E-02 1,890E-03 1,255E-03
2	FLiNaK	Li-6 Li-7 F Na K	2,097	1,256E-03 1,304E-02 3,058E-02 3,516E-03 1,283E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.8. Sekizinci modelde kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

Bölge	Malzeme	İzotoplar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Atomik Yoğunluk (atom/b.cm)
1	SiC	C-12 C-12 Si-28 Si-29 Si-30	3,2	4,003E-02 4,493E-04 3,733E-02 1,890E-03 1,255E-03
2	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
3	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
4	Doğal Lityum	Li-6 Li-7	0,485	3,702E-03 3,843E-02
5	Grafit	C-12 C-13	2,26	1,122E-01 1,162E-03
6	Yalıtım	O Si-28 Si-29 Si-30	0,2	1,098E-01 3,172E-01 1,606E-02 1,066E-02
7	Boşluk			
8	Mıknatıs	H-1 H-2 C-12 C-13 Al V Ga	4,3	9,558E-03 1,434E-06 5,107E-03 5,732E-05 7,030E-03 5,875E-03 6,823E-04

Çizelge 7.9. Çalışmada kullanılan sekiz modelde ^6Li ve ^7Li izotoplarının TBR katkısı

Model Numarası	Soğutucu Bölgesi		Trityum Üretim Bölgesi		Toplam
	^6Li	^7Li	^6Li	^7Li	
1	1,032	0,130	0,031	0	1,193
2	0,873	0,120	0,038	0	1,031
3	0,680	0,080	0,089	0	0,849
4	0,781	0,457	0,219	0	1,457
5	0,920	0,149	0,033	0	1,102
6	0,631	0,138	0,177	0	0,946
7	0,574	0,092	0,084	0	0,750
8	0,686	0,523	0,208	0	1,417