



**BİR MANYETİK SIKIŞTIRMALI FÜZYON REAKTÖRÜNDE FARKLI
TRİTYUM ÜRETİM MALZEMELERİNİN PERFORMANSLARININ
NÖTRONİK OLARAK İNCELENMESİ**

Uğur ATALAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Uğur ATALAY

03/07/2023

BİR MANYETİK SIKIŞTIRMALI FÜZYON REAKTÖRÜNDE FARKLI TRİTYUM
ÜRETİM MALZEMELERİNİN PERFORMANSLARININ NÖTRONİK OLARAK
İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur ATALAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

İnsanoğlunun enerji ihtiyacını karşılamak için 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren füzyon reaktörleri ile ilgili çalışmalar manyetik sıkıştırımlı füzyon reaktörleri üzerinde yoğunlaşarak devam etmektedir. D-T reaksiyonu ile çalışan ve bu reaktörlerin bir tipi olan tokamak reaktörlerine ait net füzyon gücü elde edilmesi, ticari olarak uygulanabilirliği, trityum üretiminin sürdürülebilirliği ve reaktör yapısal malzemelerinin seçimi konuları reaktörün hizmet verebilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Ele alınan çalışmada, kompakt, güvenilir ve ticari olarak uygulanabilir bir kavramsal tokamak olan ARC reaktörü geometrisi uygulanmıştır. ARC reaktörü tabakaları D şekilli geometri olarak modellenip, OpenMC açık kaynak kodunda, yapısal malzemelerin ve tabakalarının nötronik performansları incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle, 2 farklı vakum kabı malzemesi (SiC kompozit ve V4Cr4Ti alaşımı), 4 farklı eriyik tuz çeşidi (FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, FLiNaRb) ve doğal Li ile 3 farklı Li-6 zenginleştirme oranlarında (%30, %60, %90) oluşturulan 32 farklı modelin trityum üretim oranı (TBR) değerleri araştırılmıştır. Ardından, $TBR \geq 1,05$ olan 12 model için toksik etkisi bulunan berilyum elementinden oluşan nötron çoğaltma tabakası çıkarılarak reaktörde trityum üretiminin sürdürülebilirliği incelenmiştir. Son kısımda ise, elde edilen modellerin vakum kabı iç-dış duvarları ile trityum üretimi tabakasındaki nötron akıları incelenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, $TBR \geq 1,05$ şartının SiC kompozit vakum kabı malzemesinin kullanıldığı modellerde FLiBe eriyik tuzu ile sağlandığı; V4Cr4Ti vakum kabı malzemesinin kullanıldığı modellerde ise FLiBe ve FLiNaBe eriyik tuzları ile sağlandığı görülmüştür. Benzer şekilde, V4Cr4Ti vakum kabı malzemesinin kullanıldığı modellerde nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığında $TBR \geq 1,05$ şartı, FLiBe_NÇB_yok ve FLiNaBe_NÇB_yok eriyik tuzları ile sağlandığı ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında incelenen tüm modellerde, plazmadan trityum üretim tabakasına doğru başlangıçta üretilen nötronların tabakaları geçtikçe moderasyona uğradığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 92805
Anahtar Kelimeler : Füzyon reaktörü, ARC reaktörü, trityum üretim oranı (TBR)
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Güven TUNÇ

NEUTRONIC INVESTIGATION OF DIFFERENT TRITIUM BREEDING MATERIALS IN A MAGNETIC CONFINED FUSION REACTOR

(M. Sc. Thesis)

Uğur ATALAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

In order to meet the energy needs of mankind, studies on fusion reactors have been continuing since the second half of the 20th century, focusing on magnetic compression fusion reactors. Obtaining net fusion power, commercial applicability, sustainability of tritium production and selection of reactor structural materials of tokamak reactors, which operate with D-T reaction and which are a type of these reactors, are of vital importance for the reactor to serve. ARC reactor geometry, which is a compact, reliable and commercially viable conceptual tokamak, is applied in the present study. ARC reactor layers were modeled as D-shaped geometry and neutronic performances of structural materials and layers were investigated in OpenMC open source code. In this context, first of all, 2 different vacuum vessel materials (SiC composite and V4Cr4Ti alloy), 4 different types of molten salt (FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, FLiNaRb) and natural Li and 3 different Li-6 enrichment rates (30%, 60%, %90), the tritium production ratio (TBR) values of 32 different models were investigated. Tritium production ratio (TBR) values of 32 different models created were investigated. Then, the sustainability of tritium production in the reactor was investigated by removing the neutron multiplication layer consisting of the toxic element beryllium for 12 models with $TBR \geq 1,05$. In the last part, the neutron fluxes in the inner-outer walls of the vacuum vessel and the tritium breeding zone of the models obtained were investigated. When all the results are evaluated, it is seen that the $TBR \geq 1,05$ condition is met with FLiBe molten salt in models using SiC composite vacuum cup material; In the models in which V4Cr4Ti vacuum cup material is used, it has been observed that it is provided with FLiBe and FLiNaBe molten salts. Similarly, in models using V4Cr4Ti vacuum cup material, when the neutron amplification layer is removed, $TBR \geq 1,05$ condition is met with FLiBe_NÇB_yok ve FLiNaBe_NÇB_yok molten salts. In all models examined within the scope of the study, it was observed that the initially produced neutrons from the plasma to the tritium production layer moderated as the layers passed.

Science Code : 92805

Key Words : Fusion reactor, ARC reactor, tritium breeding ratio (TBR)

Page Number : 81

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Güven TUNÇ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca beni yönlendiren, danışmanlığımı yaparak değerli bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Güven TUNÇ 'a, tüm eğitim hayatım boyunca üzerimde emekleri olan hocalarıma, her zaman yanımda olan değerli aileme ve arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL KAVRAMLAR	13
2.1. Atom Yoğunluğu Kavramı.....	14
2.2. Radyasyon-Madde Etkileşimi	16
2.2.1. Tesir kesiti kavramı.....	16
2.2.2. Nötron etkileşimleri	18
3. NÜKLEER FÜZYON	21
3.1. Füzyon Reaksiyonları ve Yakıtları.....	21
3.2. Füzyon Reaktörleri.....	23
4. MANYETİK SIKIŞTIRMALI FÜZYON REAKTÖRLERİ.....	25
4.1. Tokamak Reaktörü	25
4.2. ARC Tokamak Reaktörü.....	29
5. NÖTRON DİFÜZYON VE TRANSPORT TEORİLERİ	35
5.1. Nötron Difüzyon Teorisi	35
5.2. Nötron Transport Teorisi	36
6. METOD VE YÖNTEM.....	41
6.1. Sayısal Hesaplama Yöntemi	41

	Sayfa
6.2. Problem Geometrisi ve Malzeme Seçimi.....	43
7. SAYISAL SONUÇLAR.....	47
7.1. Tritiyum Üretim Oranı (TBR).....	47
7.1.1. SiC vakum kabı malzemesi.....	50
7.1.2. V4Cr4Ti vakum kabı malzemesi	54
7.2. Reaktör Tabakalarındaki Nötron Akıları	61
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. ARC reaktörü için temel tasarım parametreleri.....	31
Çizelge 6.1. ARC reaktörü tabaklarının malzemeler	43
Çizelge 6.2. V4-Cr4-Ti alaşımının atom ağırlığı %	45
Çizelge 6.3. SiC kompozitinin atom ağırlığı %	45
Çizelge 6.4. Eriyik tuz çözeltilerinin malzeme özellikleri	45
Çizelge 6.5. W-184, Be ve WB4 malzemelerinin fiziksel özellikleri	46
Çizelge 7.1. Modellerin toplam TBR değerleri	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Nötron demeti ve hedef malzeme etkileşimi	17
Şekil 3.1. Farklı füzyon reaksiyonlarının olasılık dağılımı üzerinden sıcaklığa bağlı reaksiyon hızı değerleri.....	23
Şekil 4.1. Tokamak odası ve manyetik alan profilleri	26
Şekil 4.2. Li-6 ve Li-7 izotoplarına ait trityum üretimi tesir kesitleri.....	28
Şekil 4.3. Füzyon güç santrali örneği.....	29
Şekil 4.4. ARC reaktörünün iç yapısı ve vakum kabı.....	32
Şekil 4.5. Eriyik tuz çözeltisi içerisindeki vakum kabı yapısı	33
Şekil 5.1. Nötron difüzyon teorisi ile gerçek reaktör tasarımında hesaplanan akı değerlerinin yüzeye yakın ortamdaki davranışları.....	36
Şekil 5.2. Bir küre yüzeyindeki katı açılı kavramı.....	37
Şekil 5.3. Küresel koordinat sisteminde Ω birim vektörünün ifadesi	38
Şekil 5.4. $dVdEd\Omega$ elementel hacmi	39
Şekil 6.1. Plazma ve tabakaların D şeklindeki modelde gösterimi.....	44
Şekil 7.1. Model 2 (sol) ve Model 12 (sağ)'ye ait ortalama tritium üretim değerinin dağılımı	50
Şekil 7.2. SiC vakum kabı malzemesi kullanılarak oluşturulan modellerdeki eriyik tuzların farklı Li-6 zenginleştirme oranlarına göre TBR değerlerinin değişimi.....	51
Şekil 7.3. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı	52
Şekil 7.4. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FeLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı	52
Şekil 7.5. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları	53
Şekil 7.6. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_noBe eriyik tuzu içerisindeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine yüzde katkıları	54

Şekil	Sayfa
Şekil 7.7. Model 23 (sol) ve Model 33 (sağ)'ye ait ortalama tritium üretim değerinin dağılımı	55
Şekil 7.8. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesi kullanılarak oluşturulan modellerdeki eriyik tuzların farklı Li-6 zenginleştirme oranlarına göre TBR değerlerinin değişimi	55
Şekil 7.9. Vanadyum alaşımı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı	56
Şekil 7.10. Vanadyum alaşımı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiNaBe eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı	57
Şekil 7.11. Vanadyum alaşımı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı	57
Şekil 7.12. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları	58
Şekil 7.13. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiNaBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları	59
Şekil 7.14. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları	59
Şekil 7.15. Model 22, Model 23, Model 38 ve Model 39'daki FLiBe eriyik tuzu içerisindeki izotopların TBR katkıları	60
Şekil 7.16. Model 2 ve Model 23'teki FLiBe eriyik tuzu içerisindeki izotopların TBR katkıları	61
Şekil 7.17. Model 2'de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi	62
Şekil 7.18. Model 2'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi	63
Şekil 7.19. Model 2'de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi	63
Şekil 7.20. Model 23'de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi	64
Şekil 7.21. Model 23'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi	64
Şekil 7.22. Model 23'de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi	65

Şekil	Sayfa
Şekil 7.23. Model 38’de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi	65
Şekil 7.24. Model 38’de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi	66
Şekil 7.25. Model 38’de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi.....	66
Şekil 7.26. Model 32’de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi	67
Şekil 7.27. Model 32’de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi	67
Şekil 7.28. Model 32’deki trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi.....	68
Şekil 7.29. Model 44’de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi	68
Şekil 7.30. Model 44’de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi	69
Şekil 7.31. Model 44’de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
\emptyset	Nötron akısı (Nötron /cm ² .s)
A	Atom kütlesi (gr/mol)
a/0	İzotopik bolluk
amu	Atomik kütle birimi
Be-9	Be-9 izotopu
eV	Elektronvolt
F-19	F-19 izotopu
K-39	K-39 izotopu
K-41	K-41 izotopu
kg	Kilogram
Li-6	Li-6 izotopu
Li-7	Li7 izotopu
M_A	Molekül kütlesi (gr/mol)
MWe	Megawatt elektrik
n	Füzyon reaksiyonundaki parçacık sayı yoğunluğu
N	Nötron sayısı
N_A	Avagadro sayısı (atom /mol)
Na-23	Na-23 izotopu
Rb-85	Rb-85 izotopu
Rb-87	Rb-87 izotopu
V	Nötron hızı (cm/s)
Z	Atom numarası
α	Alfa ışını
β	Beta ışını
γ	Gama ışını
τ	Füzyon reaksiyonundaki hapsedme zamanı

Simgeler	Açıklamalar
Σ	Makroskobik tesir kesiti (cm^{-1})
λ	Ortalama serbest yol (cm)
σ	Mikroskobik tesir kesiti (barn)

Kısaltmalar	Açıklamalar
D-D	Döteryum-Döteryum
D-Li-6	Döteryum-Lityum-6
D-Li-7	Döteryum-Lityum-7
DPA	Atom başına yer değiştirme
D-T	Döteryum-Trityum
ICF	Atalet kısıtlamalı füzyon
ITER	Uluslararası termonükleer deneysel reaktörü
MCF	Manyetik sıkıştırmalı füzyon
n(hızlı)	Hızlı nötron parçacığı
n(termal)	Termal nötron parçacığı
STR1	Vakum kabı iç yüzeyi
STR2	Vakum kabı dış yüzeyi
TBR	Trityum üretim oranı

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ile birlikte, insanoğlunun enerji ihtiyacı artmaktadır. Ülkeler bu talebi karşılayabilmek, insanların refahını sağlayabilmek ve gelişmişlik seviyelerini artırabilmek için enerji kaynaklarının çeşitliliğini ve miktarını artırmak için çalışmalar yapmaktadırlar. Petrol ve kömür ağırlıklı fosil yakıtlar kullanılarak üretim faaliyetleri sürdürülmesine rağmen, bu yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye verdiği zararlı etkiler, alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını hızlandırmıştır. İlk olarak, rüzgâr, güneş, biyokütle, jeotermal gibi kaynağı tükenmeyen ve çevreye olumsuz etkisi olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması bir çözüm olarak gözükmektedir. Günün her saatinde ve coğrafi şartlardan bağımsız olarak planlanan miktarda enerjinin sürekli bir biçimde tüketiciye sunulması yenilenebilir enerji kaynakları ile günümüz teknolojisi dikkate alındığında mümkün görülmektedir. Bu noktada, sürdürülebilir ve çevreci enerji imkânı sağlayan nükleer enerji sistemlerinin, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarından daha iyi bir alternatif olduğu görülmektedir. Nükleer enerji sistemleri fosil yakıtlara göre çok daha küçük hacimlerde daha az miktarda yakıt tüketerek ve sıfır karbon salınımı ile kullanıcılara ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamaktadır [1].

2. Dünya Savaşı ve sonrasındaki soğuk savaş döneminde nükleer enerji bilimi, atom bombası, nükleer silah yapımı ve geçmişte yaşanan birkaç büyük kaza nedeniyle toplumlar nezdinde olumsuz bir görünüme sahip olmasına rağmen, günümüzde geliştirilen güvenlik protokolleri ve ulaşılan teknolojik seviye ile enerji kaynakları içerisinde tercih gerekliliğini ortaya koymuştur. Nükleer bilimi, enerji tedarikinin yanı sıra, tıp, taşımacılık, uzay araştırmaları ve sanayi alanında pek çok uygulamanın içinde yer almaktadır. 20. yüzyılın yarısından günümüze kadar kullanılan ticari nükleer enerji santrallerinde, ağır atom çekirdeklerinin parçalanması ile enerji elde edilen fisyon reaksiyonları kullanılmaktadır. Geçtiğimiz asrın ikinci yarısının başında imalatı yapılan reaktörlerdeki kurulu güç 60 MWe iken, günümüzde bu rakam 1600 MWe değerlerine ulaşmıştır. Geçmişte yaşanan kazalardan dersler çıkararak, insan etkisinin asgari düzeye çekildiği, daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir enerji arzı sağlanması açısından dördüncü nesil nükleer reaktör tiplerinin 2030 ile 2050 yılları arasında tamamlanması planlanmaktadır. Buna rağmen, fisyon

reaksiyonlarına dayanan nükleer reaktör tesislerinde, ortaya çıkan radyoaktif izotopların sistemden uzaklaştırılması ve çevreden bertarafı halen çevresel temel bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. Bunun yanı sıra, fisyon reaksiyonlarında yakıt olarak kullanılan uranyum ve plütonyum miktarlarının sınırlı olması, bilim insanlarını alternatif nükleer sistemlere yönlendirmektedir. Füzyon reaktörlerinde, ihtiyaç duyulan yakıtların bol miktarda ve görece daha kolay elde edilebilmesi, radyoaktif atık miktarının hemen hemen olmaması ve kontrol kaybı riskinin daha az olması, çalışmaları bu alana yönlendirmektedir. Tüm bunların yanı sıra kurulu gücü 300 MWe'nin altında olan küçük modüler nükleer reaktörler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu tip reaktörler füzyon reaksiyonu ile çalışan, belirli bir tesiste üretimi yapıldıktan sonra faaliyet göstereceği alanda montajı yapılabilecek tasarıma sahiptir [1, 2].

Füzyon reaksiyonları ile ilgili çalışmalar, 1920'li yıllarda başlamış, ilk aşamada reaksiyonun çalışma mantığı araştırılarak, yıldızlarda füzyon ile enerji üretiminin modellenmeleri ve denklemleri ortaya konulmuştur. Sonrasında, füzyon enerjisinin Dünya şartları altında nasıl oluşturulabileceği noktasında araştırmalar yapılmış ve yıldızlardan daha düşük sıcak ve basınç şartları altında da füzyon reaksiyonlarının gerçekleştirilebileceğine yönelik modellemeler ortaya konulmuştur. Füzyon reaksiyonunun oluşturulması için, 1950'lerde L. Spitzer tarafından Stellerator yapısı, R.F. Post ve G. Budker tarafından ayrı ayrı yapılan çalışmalar neticesinde manyetik ayna konsepti ve nihayetinde 1960'lı yılların sonunda SSCB bilim adamları tarafından TOKAMAK sistemi geliştirilmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısından günümüze kadar gerçekleşen tüm füzyon reaktörü çalışmalarında, füzyon reaksiyonunu başlatacak enerjiden daha fazlasının nasıl elde edileceği ve reaksiyon başladıktan sonra belirli bir sıcaklık değerinde plazmanın nasıl tutulacağı, temel araştırma konularının başında gelmektedir. Bu noktada 2010 yılında başlatılan ve 2035 yılında işletmeye alınması planlanan Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktörü (ITER) projesi ile füzyon reaksiyonu ile net güç kazancı elde edilen ilk füzyon reaktörün elde edilmesi ön görülmektedir [3 - 5].

Ledda tarafından yapılan çalışmada, MIT ve PSFC tarafından desteklenen bir füzyon reaktörü olan ARC reaktöründeki, trityum besleme oranının (TBR) artırılıp, reaktörün sürdürülebilir ve verimli çalışması için farklı trityum üretim bölgesi malzemelerinin nötronik performansları sayısal olarak incelenmiştir. Füzyon reaktörlerinde soğutucu ve trityum üretim bölgesinde kullanılan lityum içerikli alaşım malzemelerin iyi nötron

moderasyonuna sahip olması, ısı akışlarına ve radyasyona dirençlerinin yüksek olması, mekanik ve termal özelliklerinin iyi olması beklenmektedir. Tüm bu özelliklerin aynı anda bulunamaması ve TBR değerinin uygun değerlerde olmaması, geleneksel alaşım malzemeleri yerine, metalurjik açıdan daha yüksek karıştırma entropisine sahip alaşımların, nötronik analizlerinin yapılmasını gündeme getirmektedir. Bu çalışmada, Monte Carlo yöntemi ile çalışan OpenMC kodunda, D kesitine sahip poloidal bölüm geometrisi oluşturularak D-T reaksiyonu sonucu, Be elementi kullanılmadan oluşturulan sekiz farklı kompozisyona sahip oluşturulan yüksek entropili alaşımlı modellerinin TBR değerleri karşılaştırılmıştır. Modellenen tüm denemelerde TBR'nin birden büyük değerlere sahip olduğu ortaya konulmuştur. Berilyum nötron çoğaltma tabakasının olmadığı modellerde soğutucu kanal kalınlığı artırılmış olup, bu durumda vakum kabı dış tabakasında TBR artışı olmaz iken, blanket tabakasında arttığı ve toplam TBR üretiminin büyük bir kısmının bu bölgede oluştuğu belirtilmiştir [6].

Segantin, Testoni ve Zucchetti ile Pettinari tarafından kompakt ve ticari bir tokamak olan ARC füzyon reaktöründe, farklı malzemeler ile modellenen triyum besleme tabakasının nötronik analizi yapılmıştır. Yapılan analizde saf Li, PbLi, FLiBe, FLiNaBe, FLiNaK, LiF-LiBr-NaBr, LiF-LiBr-NaF, LiF-LiI ve LiF-NaF-ZrF₄ triyum besleme blanket malzemelerinin OpenMC kodu kullanılarak, TBR, güç birikimi ve zırh verimlilikleri karşılaştırılmıştır. FLiBe, içeriğindeki ağır ve radyoaktif uranyum bulunduran Be içeriği dışında, TBR değerinin 1,2'ye yakın olması, nötron moderasyonu, radyasyon zırhı ve aktivasyon özelliklerinin iyi olması nedeniyle diğer blanket modellerinin önüne geçtiği ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra, mevcut reaktör tasarımına ek radyasyon zırhı eklemesi yapılmadan nötron çoğaltım elementi olarak Be yerine Zr kullanımının değerlendirilebileceği öngörülmüştür [7, 34].

Sorbom ve diğerleri tarafından, pilot bir füzyon reaktör tasarımı olarak ele alınan ARC reaktörünün plazma fiziği, bileşenlerinin (mıknatıs sistemi, nötron moderasyonu tabakaları, triyum üretim tabakaları, zırh tabakası) yapısı, boyutları ve diğer tasarım parametreleri ortaya konulmuştur [8].

Catalan ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, 3450 MW'lık füzyon gücünde ve ilk duvar yüklemesi 2,1 MW/m² olan DEMO füzyon reaktöründe ikili He / LiPb soğutucu malzemeleri kullanılarak, blanketin güç artırma kapasitesi, reaktörün sürdürülebilir

çalışırlığı, malzeme hasarı (dpa, He gaz birikimi) nötronik analizleri yapılmıştır. Vakum kabında 316-LN östenitik elik, blanket tabakasında dūřuk aktivasyonlu ferritik martenzitik Eurofer-97 elięi, soğutma-besleme çifti tabakasında soğutucu olarak He gazı ve besleme kısmında %90 zenginleştirilmiş Li-6 içerikli PbLi eriyik sıvısı kullanılmıştır. Soęutucu sıvının bulunduğu kanallar SiC kompozit malzemesinden imal edilmiştir. 2 boyutlu eksen simetrik fūzyon reaksiyon profilinde parçacık taşınımı için MNCPX kodu, gaz etimi ve hasar analizi için ACAB programı kullanılmıştır. Vakum kabında 316-LN östenitik elik için 40 yıllık işletme ömründe 0,1 DPA ve 4,4 appm He etimi olduğu belirtilmiştir. Ele alınan malzemeler için sūrdürülebilir TBR değerleri elde edilmesine rağmen, He gazı ısıl kapasitesinin dūřuk olması sebebiyle, yüksek basınç ve sıcaklıkta ek önlemlerin alınmasına ihtiyaç duyulduğu ortaya konulmuştur [9].

řahin, Tunç ve řahin ilk duvar malzemesi vanadyum alařımı, yakıt UO_2 , trityum üretim tabakası malzemesi Li_2C_2 , yansıtıcı yūzey malzemesi karbon olan bir fūzyon-fisyon hibrit reaktöründe 3 farklı soęutucu eriyik malzemesi (%90 zenginleřtirilmiř Li6 içeren FLiNaK, LiPb ve FLiBe) kullanarak nötronik analiz yapmıřlardır. MNCP5-1.4 kodu yardımıyla 4 farklı nūkleer veri kütüphanesi kullanılarak, TBR, DPA ve gaz etimi deęerleri elde edilmiřtir. Yapılan alıřma sonucunda, bütūn soęutucular trityum etimi için yeterli performansa sahip olsalar da FLiBe ve FLiNaK trityum üretiminde dięer soęutuculara göre daha dūřuk performans gōstermiřlerdir [10].

Zandi, Sadeghi, Habibi, Jalali ve Zare tarafından yapılan çalıřmada, ITER fūzyon reaktöründe soęutucu malzemesi olarak He ve trityum üretim blanketi olarak Li_4SiO_4 (%90 zenginleřtirilmiř Li-6) kullanılarak, MNCPX kodunda, TBR deęeri irdelenmiř ve reaktörün sūrdürülebilirlięi açısından yeterli deęerlere ulařıldıęı ifade edilmiřtir [11].

Ishibashi, Fujimoto ve Matsumoto tarafından, MNCP-4C kodu kullanılarak bir fisyon-fūzyon hibrit reaktöründe, farklı blanket malzemeleri kullanılarak, TBR, sıcaklık dağılımları ve reaktör güç dengesi değerlendirilmiştir. He gazı soğutucu malzemesi, erimiş tuz trityum besleme malzemesi ve vanadyum alaşımının yapı malzemesi olarak kullanıldığı modelde en yüksek TBR ve Q (termal güç çıkışı / fūzyon güç girişi) değerine ulaşıldığı ortaya konulmuştur [12].

Romano, Horelik, Herman, Nelson, Forget ve Smith tarafından, MIT’de XML giriş ve HDF5 çıkış dosya biçimleri kullanılarak nükleer sistemlerin sürekli enerji kesitleri ve yapıcı katı geometri kullanılarak modellenmesini sağlayan Monte Carlo parçacık taşıma yöntemi ile çalışan açık kaynak kodlu OpenMC’nin genel özellikleri ortaya konulmuştur [13].

Şahin ve Karakoç tarafından, D-T yakıtının kullanıldığı toroidal geometriye haiz TOKAMAK füzyon reaktörünün manto tabaklarından biri olan soğutucu bölgesinde kullanılan farklı malzemelerin trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörüne (M) ve atom başı kayma değeri (DPA) için değişimi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada MNCP kodu kullanılmış olup, nötronik analizde soğutucu olarak Li ve FLiBe malzemelerinin en iyi sonuçları verdiği ortaya konulmuştur [14, 33].

Segantin, Meschini, Testoni ve Zucchetti tarafından ARC tokamak füzyon reaktörünün, D kesitli 2 boyutlu bir model benzetimi yapılarak OpenMC açık kaynak kodu yardımıyla nötronik analiz yapılmıştır. Bu çalışmada, ARC reaktörünün çalışma sürekliliğinin sağlanması açısından 1,055 ile 1,065 aralığında TBR değerleri arasında, mıknatıs ve diğer dış yapının radyasyon etkisine en az seviyede maruz kalması için farklı zırh malzemeleri için radyasyon birikimleri incelenmiştir [15].

Asal ve Acır tarafından, MNCP kodu ile uranyum oksit yakıtının ve %90 doğal lityum izotopunun kullanıldığı lazer sürücülü füzyon reaktörünün (LIFE) trityum üretim oranı, enerji çoğaltım faktörü ve yakıt yanma oranı değerleri sayısal olarak incelenmiştir. Ele alınan füzyon reaktörünün 20 yıllık çalışması süresince nötronik performansının yeterli olduğu ortaya konulmuştur [16].

Kuang ve diğerleri tarafından, toroidal alan mıknatısları, manyetik alan bobinleri, erimiş tuz manto tabakası ve vakum kabından oluşan kavramsal ARC füzyon reaktörünün çalışma performansı ve nötronik analizi sayısal olarak incelenmiştir. MNCP kodu kullanılarak modellenmesi yapılan reaktörde, trityum üretim miktarı (TBR) 1,08 ve 525MW’lık çıkış gücü elde edilmiş olup, plazma sürekliliğinin sağlandığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, tungsten girdap borulu FLiBe soğutma sıvısı kanalı tasarımı ile 12 MW/m²’ye kadar ısı yüküne sahip saptırıcıdan ısının uzaklaştırılması sağlanmıştır [17].

Bocci, Hartwig, Segantin, Testoni, Whyte ve Zucchetti tarafından, ekonomik ve sağlam kompakt bir füzyon reaktörü olarak tasarlanan ARC reaktöründeki manto tabakalarında farklı malzemelerin nötronik performansları ve nötron akılarına maruziyeti sonucu oluşan radyasyon etkisi, MNCP ve FISPACT-2 kodları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Reaktör manto tabakalarından biri olarak vakum kabında Inconel-718 alaşım çeliğine en iyi alternatifin yeterli düzeydeki nötron moderasyonu ve düşük doz birikim değerleri açısından, Vanadyum alaşım çeliği (V-15Cr-5Ti) olduğu ve blanket tabakası olarak FLiBe'nin iyi bir seçim olduğu ortaya konulmuştur [18].

Segantin, Testoni, Hartwig, Whyte ve Zucchetti tarafından bir ARC tokamak füzyon reaktöründe manto tabakalarının malzeme kompozisyonunun, genişliklerinin ve bazı izotop elementlerin zenginleştirme miktarlarının trityum besleme oranı (TBR) değerine etkisi, Monte Carlo nötron transport kodları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada, 1,1 TBR değerinin, vakum kabı malzemesi olarak Eurofer 97 ve Vanadyum alaşım çeliğinin (V-15Cr-5Ti) sağladığı, ancak Inconel 718 alaşım çeliğinin başarısız olduğu ortaya konulmuştur [19].

Fausser, Puma, Gabriel ve Villari tarafından, Avrupa demonstrasyon füzyon enerji santrali (DEMO) kapsamında, yüksek veya gelişmiş sınırlandırma (H & A) modunda D-T nötron kaynağı formülleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, tokamaklar için gelişigüzel iki boyutlu (radyal ve poloidal) nötron üretimi kaynak haritaları Monte Carlo nötron parçacığı kodunda incelenmiştir. (H & A) modundaki DEMO reaktöründe ele alınan TBR ve nötron çoğaltama faktörü gibi temel nötronik parametrelerinin, düşük (L) sınırlandırma modundaki füzyon reaktöründekilere göre iyileşme gösterdiği ortaya konulmuştur [20].

Federici ve diğerleri tarafından, ITER sonrası çalışılan DEMO füzyon reaktöründeki, sürekli ve verimli bir güç santralinin elde edilebilmesi için trityum üretiminin sağlanmasına yönelik trityum üretim tabakasının tasarımı ile ilgili gelişmeler incelenmiştir [21].

Şahin, Tunç, Karakoç ve Omar ile Tajoore uluslararası termonükleer deneysel reaktörde (ITER), ilk duvar tabakasındaki malzeme ve kalınlık değeri seçiminin nötronik analizini sayısal olarak yapmışlardır. İlk duvar malzemesi olarak paslanmaz çelik (SS 316 LN-IG), oksit dağılımı artırılmış çelik alaşımı (PM2000 ODS), düşük aktivasyonlu Çin martensitik

çeliği (CLAM); soğutucu ve trityum üretim tabakası malzemesi olarak florit içerikli erimiş tuz çözeltileri ve lityum oksit kullanılmıştır. Ele alınan füzyon reaktörü, MNCP5 kodunda simüle edilmiş olup, en iyi TBR değerinin FLiPb soğutma sıvısında elde edildiği, kalınlığa bağlı olarak seçilen tüm malzeme seçimleri için ilk duvar değiştirme süresinin 6-11 yıl arasında değiştiği belirtilmiştir [22, 23].

Yalçın, Übeyli ve Acır ile Şahin, Şahin ve Acır tarafından yapılan çalışmalarda, hibrit bir reaktör olan LIFE'da 50 cm'lik soğutma sıvısı kalınlığının optimum soğutma sağladığı, reaktörün verimli ve sürdürülebilir çalışması açısından, sıvı metal ve sıvı tuz çözeltilerinde uygun TBR değerinin elde edildiği ortaya konulmuştur [24, 25].

Sawan ve Abdou tarafından, D-T yakıt döngüsü ile çalışan füzyon reaktörlerinde, trityum beslenmesinin sağlanmasının, manto tabakalarında kullanılan malzemelere ve geometriye bağlılığını ortaya koyan bir çalışma yapılmıştır. Kendi kendine yeten D-T yakıtlı füzyon reaktörü tasarlamak için trityumun en az tüketildiği kadar üretilmesi gerektiği belirtilmiştir [26].

Şahin tarafından, MNCP5 kodu kullanılarak bir hibrit reaktörün, manto tabakalarında farklı malzemeler kullanılarak nötronik performansını inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Buna göre, trityum üretiminin tüketimine oranı net trityum üreme oranı (TBR) olarak belirlenmiş ve kendi kendine yeterliliğini sağlamak için TBR'nin 1,05'ten büyük olması gerektiği belirtilmiştir [27].

Romatoski ve Hu tarafından, otonom füzyon reaktörünün çalışması için soğutucu malzemelerdeki lityum konsantrasyonu doğrudan trityum üretimini etkilediğini ortaya koyan sayısal bir çalışma yapılmıştır. Bunun yanı sıra, soğutucu tabakada kullanılacak sıvı florürü tuzu çözeltilerinin yoğunluk, ısı kapasitesi, ısıl iletkenlik ve viskozite gibi termofiziksel özellikleri araştırılmıştır [28].

Übeyli tarafından, D-T füzyon yakıtlı hibrit bir reaktörde lityum zenginleştirme oranının toplam TBR ile doğru orantılı ve atom başına yer değiştirme (DPA) ile ters orantılı olduğu ve TBR değeri açısından vanadyum alaşımı, DPA açısından en iyi sonucu bakır alaşımı olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, soğutucuların ve ilk duvar malzemelerinin değiştirilmesinin hibrit reaktörlerin nötronik performansına etkisi incelenmiştir [29].

Muroga tarafından, ilk duvar malzemesi olarak vanadyum alaşımı ve soğutucu olarak FLiBe sıvı tuz çözeltilisinin kullanıldığı DEMO füzyon reaktörünün nötronik analizi yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, reaktörün kendi kendine yeten trityum üretim oranına ulaşabildiği ve süper iletken mıknatıs sistemlerinin nötron hasarından korunduğu ortaya konulmuştur [30].

El-Guebaly tarafından, geçtiğimiz son yarım yüzyıl içerisinde füzyon reaktörlerinin gelişimi ele alınmış olup, gelecekteki füzyon enerjisine ait yeni gelişmeler ve yol haritalarına ait bir bakış açısı sunulmuştur. Tokamak tasarımı üzerinden yeni çalışmalar yapılmaya devam edilerek, manyetik füzyon uygulamalarının devam edeceği öngörülmüştür [31].

Boullon, Jaboulay ve Aubert tarafından, bir DEMO füzyon reaktöründe trityumun kendi kendine yeterliliğine, nötron korumasına ve elektrik üretimine etki eden dört gelişmiş besleme tabakası malzemelerinin (FLiBe, FLiPb, CILiPb, CILiK) temel nükleer özellikleri (TBR, nükleer ısı üretimi, nötron akısı, DPA ve gaz üretimi) ve termo hidrolik özellikleri (basınç düşümü, pompalama gücü ve en yüksek çalışma sıcaklığı) sayısal olarak incelenmiştir. Besleme tabakası malzemesi için kullanılan çeşitlik eriyik tuzların (MS) nötronik performansı TRIPOLI-4 Monte-Carlo kodunda simüle edilmiştir. Trityum üretimi ve soğutucu olarak ele alınan FLiBe'nin erime sıcaklığının yüksek olmasının getirdiği reaktörün yapısal malzemesinin korunması gerekliliği, Be'nin yüksek toksisitesi ve maliyeti dezavantaj getirmektedir. FLiBe, CILiPb ve CILiK malzemelerinin kullanılabilmesi için vakum kabı ve mıknatıs yapılarının korunması için fazladan bir nötron kalkanının geliştirilmesi ihtiyacı ortaya konulmuştur [32].

Zucchetti ve diğerleri tarafından, geliştirme çalışmaları devam eden konsept bir tokamak tasarımı olan ARC reaktörünün manto tabakasındaki radyoaktif aktivasyonlar incelenerek, çevre ve halk sağlığı açısından güvenlik limitleri ve bireylere yönelik doz değerlendirmesi ile ilgili bir analiz çalışması yapılmıştır. ITER reaktörü ile ilgili başarılı lisanslama deneyimi referans alınarak, ARC füzyon reaktörünün ITER'nin yaklaşık %45'i kadar bir trityum envanterine sahip olduğu, en kötü kaza durumunda maksimum güvenilir salınımın eşit veya daha düşük değerlerini kolayca elde edebileceği ve söz konusu salınan doz nedeniyle reaktör çevresinde yaşayan nüfusun herhangi bir tahliyesi veya barınması veya

gıda tüketiminde herhangi bir kısıtlama uygulanmasının getirilmesine gerek kalmayacağı belirtilmiştir [35].

Sohal, Ebner, Sabarwall ve Sharpe Idaho Ulusal Laboratuvarında ABD Enerji Bakanlığı Nükleer Enerji Ofisi için nükleer reaktörlerde soğutucu olarak kullanılan dört tip erimiş tuzun (FLiBe, FLiNaK, KCl-MgCl₂ ve Hitec tuzu) termofiziksel ve termokimyasal özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, reaktör içerisinde yer alan yapısal alaşımlar ile söz konusu erimiş tuzların uyumu ve kararlılıkları irdelenerek, tasarımda seçilecek malzeme kombinasyonları için seçenekler sunulmuştur [36].

Tunç, hibrit bir nükleer reaktörde kullanılan toryum ve diğer yakıtların trityum üretim oranı, enerji çoğaltım faktörü, toplam fisil yakıt zenginleştirme gibi nötronik performans parametreleri MNCP kodu ile zaman bağılı olarak sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma neticesinde, %90 ThO₂ -%10 silah sınıfı plütonyumu içeriğinde nükleer silah sınıfı plütonyum etkisiz hale getirilebilmiş, %90 ThO₂ -%10 reaktör sınıfı plütonyum içeriğinde, plütonyum oranı azaltılabildiği görülmüştür [37].

Segantin, Testoni ve Zucchetti tarafından ARC reaktöründe, reaktör tabaklarında kullanılan malzemelerdeki nötron etkileşimleri sayısal olarak incelenmiştir. Reaktörün İlk duvar 1mm tungstent, vakum kabı iç tabakası 1cm Inconel-718 malzemed, soğutucu kanallar 2 cm FLiBe eriyik tuzundan, nötron çoğaltma tabakası 1 cm berilyum malzemed ve vakum kabı dış tabakasının 3 cm Inconel-718 malzemed modellediği belirtilmiştir. Radyasyon hasarı ve malzeme izotropisini belirlemek için FISPACT-2, akı ve enerji spektrumu hesapları için OpenMC programları kullanılmıştır. Inconel-718 vakum malzemesi yerine V-Cr-Ti alaşımının kullanılması değerlendirilmiştir [38].

Übeyli ve Altınok, ThF₄ içeren erimiş tuz ile trityum üretimi yapan hibrit bir fisyon-füzyon reaktörü olan ARIES-ST'de SCALE 4.3 programını kullanarak bir boyutlu nötronik analiz yapmışlardır. Söz konusu hibrit reaktörün plazma bölgesinde füzyon reaksiyonları gerçekleşmekte olup, plazma çevresinde ferritik malzemed ilk duvar ve yüksek sıcaklıklı zırh, Li₁₇Pb₈₃ eriyik tuzu bulunan trityum üretim tabakası ve ThF₄ içeren ağır eriyik tuz tabakası bulunmaktadır. TBR değeri 1,05'den büyük elde edilmiş olup sürdürülebilir trityum üretimi için yeterli bulunmuştur [39].

Jiang ve diğeri tarafından, reaktörlerde yapı malzemesi olarak kullanılan, vanadyum içerikli V4Cr4Ti (NH₂) alaşımı ile nikel içerikli Hastelloy X (HX) alaşımlarına ısıl işlem sonrası elektrofüzyon kaynağı birleştirilmesi neticesinde, oluşan yeni intermetalik oluşumun mekanik özellikleri incelenmiştir [40].

Fenici, Farias Rebelo, Jones, Kohyama ve Snead tarafından SiC bazlı seramik matris kompozitlerin, düşük fiziksel yoğunluk, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme gibi mekanik özelliklerinin yanında, düşük nötron aktivasyonu ve radyasyon etkileşimine dayanımı hakkında bilgiler verilmiştir [41].

Smith, Chung, Loomis ve Tsai tarafından, V4Cr4Ti vanadyum alaşımının, yüksek sıcaklığa karşı direnç, yüksek duvar yükü kapasitesi, radyasyon hasarlarına karşı direnç ve geri dönüşüm uygulamalarındaki kolaylığı nedeniyle füzyon reaktörlerinde, ilk duvar ve diğer katmanlarda yapısal bir malzeme olarak kullanılabilirliği deneysel olarak gösterilmiştir [42].

Stopher tarafından nikel içeriği yüksek alaşımların reaktörlerin yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi için nötron etkileşimi altındaki radyasyon kırılgenliğine karşı direnç özelliği ve diğer mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yüksek çalışma sıcaklığına nötron etkileşimine giren yüksek Ni içerikli alaşım 600 malzemesindeki boron miktarı azaltılarak, tane boyutu küçültülerek ve helyum yakalama işlemi yapılarak, radyasyon kırılgenliğe direncinin artırılabilceği belirtilmiştir [43].

Übeyli, HYLIFE-2 olarak adlandırılan hibrit füzyon- fisyon reaktöründe, 3 farklı eriyik tuzun (FLiBe, FLiNaBe ve Li₂₀Sn₈₀) TBR performanslarını, 4 farklı yansıtıcı alaşım malzemeleri (W-5Re, TZM, T111 ve Nb-1Zr) kullanarak SCALE 4.3. programında XSDRNPM kodu kullanarak incelemiştir. Söz konusu reaktörün D-T reaksiyonun olduğu plazma bölgesini farklı yansıtıcı alaşım malzemelerinden oluşan ilk duvar bölgesi karşılamakta olup onun arkasında UO₂ fisyon yakıt çubukları ve onun çevresini saran 3 farklı eriyik tuzdan oluşan yakıt bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgelerin arkasında, birbiri ardı sıra gelen Li₂O ve karbon bölgeleri bulunmakta olup TBR değerinin artmasını sağlarken, nötron kaçaklarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek TBR değeri FLiBe, en düşük TBR değeri FLiNaBe tuzu ile

yakalanmış olup, yansıtıcı malzemeler arasında TBR değerinin değişimine ciddi etki edecek bir seçenek çıkmamıştır [44].

Moriyama, Sagara, Tanaka, Moir ve Sze tarafından, füzyon reaktörlerin ve hibrit reaktörlerde trityum üretiminde ve soğutucu kanallarda kullanılan lityum içerikli eriyik tuzların fiziksel, kimyasal ve radyolojik özellikleri incelenmiştir. FLiBe eriyik tuzunun sıvı lityuma göre zorlu bir üretim süreci gerektirdiği, ancak trityum üretim performansının tatmin ediciliği, yüksek sıcaklıklarda stabilitesinin iyi olması ve düşük manyeto-hidro dinamik kayıplarının olması HYLIFE-2 VE FFHR reaktörleri için uygun bir seçenek olduğu bildirilmiştir [45].

Şahin tarafından, füzyon reaktörlerinde yapısal malzeme olarak ferritik çelik, östenitik çelik, refraktör alaşımlar ve diğer alaşımların radyasyon hasarı, çalışma sıcaklıkları ve üretim kolaylıkları parametreleri karşılaştırılmıştır. Çelik malzemeler 500 – 600 C aralığında 5 MW/m^2 nötron duvar yüküne kadar yapı malzemesi olarak iyi bir performans gösterdiği ve üretim teknolojisinin gelişmiş olduğu, ancak SiC gibi kompozit malzemelerin üretim teknolojisinin henüz yeterli seviyeye gelmediği; vanadyum-krom içerikli alaşımlar ile tungsten yer aldığı refraktör malzemelerin daha yüksek nötron duvar yüklerine ve daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasına rağmen, üretim maliyetlerinin yüksek olduğu belirtilmiştir [46].

Beaufait ve Fischer tarafından, FLiBe malzemesinden oluşan soğutucu kanal ve trityum üretim tabakası ile tungsten malzemedan ilk duvardan oluşan ARC reaktörü tasarımında etkin bir soğutma sistemi ve ısı transferi mekanizması oluşturabilmek için soğutma kanalı ve ilk duvar malzemesi yüzey alanı geometrisini genişletme yoluna gidilmiştir. 3,5 mm yüksekliğinde kanatlara, 1 mm kanat ve kanal genişliğine ve beş sıralı girişe sahip kanallı bir tungsten bloğu ile ısı transferi miktarının artırıldığı ortaya konulmuştur [47].

Bu tez çalışmasının amacı, ITER füzyon reaktörü sonrası kavramsal bir tokamak olan ARC reaktöründe, farklı vakum kabı ile farklı soğutucu kanal-trityum üretim tabakası malzemeleri kullanılarak reaktörün nötronik performansını sayısal olarak incelemektir. Çalışmada, OpenMC açık kaynak kodu kullanılarak, trityum üretim oranı (TBR) değerleri ve tabakalardaki akı değerleri incelenmiştir. Böylece, tasarım çalışmaları süren ARC reaktöründe, farklı malzemelerin ve tasarım seçeneklerinin nötronik analizi yapılarak,

reaktörün sürdürülebilir trityum üretimini sağlaması noktasındaki performansı incelenmiştir. Bu sayede, literatüre ve ileride yapılacak çalışmalara katkı sunulmuş olacaktır.

2. TEMEL KAVRAMLAR

Nükleer enerji üretimi, atom içerisindeki çekirdeğin kendiliğinden ya da çeşitli yöntemler kullanılarak bozunması neticesinde, sahip olduğu enerjinin dışarı salınması mantığına dayanmaktadır. Bu süreç sonunda, yapısı değişmiş yeni bir çekirdekte enerji salınımı ve radyasyon (ışınım) meydana gelmektedir. Ortaya çıkan ışınlama enerjisi, radyasyon olarak ifade edilir, yayılan enerjinin miktarı ve enerjinin kaynağına göre farklı tipleri (düşük enerjili ve yüksek enerjili) bulunmaktadır. Işıma yapan yani enerji yayan bu maddeler “radyoaktif madde” olarak anılırlar [48].

Yüksek enerjili radyasyon tiplerinden biri olan X ışınları 1895 yılında Alman fizikçi Wilhem Röntgen tarafından bulunmuştur. 1897’de Fransız kimyacı Henry Becquerel, içinde uranyum bulunan kayaların fotoğraf plakasına değerlendirilmesi sonucunda, plaka üzerinde radyasyonun yarattığı izleri gözlemleyerek, radyoaktivite kavramını ortaya çıkarmıştır. Devamında, Becquerel, Marie-Pierre Curie ve Rutherford tarafından yapılan çalışmalarda, radyoaktif maddelerden, yüksek enerjili radyasyonun yayıldığı, bunlardan α (pozitif yüklü parçacıktır, kütle numarası büyük olan atomlardan yayımlanır, manyetik alanda negatif kutba sapar ve Helyum çekirdeği özelliği gösterir) ve β (negatif yüklü parçacıktır, elektron ile benzer yapıda olup, giriciliği α ışınmasından fazladır.) ışınların yayıldığı radyoaktif bozunmalarda elementin doğasının değiştiği, γ (yüksüz elektromanyetik radyasyon olup, çekirdeğin yapısında değişikliğe yol açmaz, yalnızca atomun enerji seviyesi azalır, giriciliği β ışınından fazladır.) ışınlarının enerjik fotonlar olduğu ve çekirdek yapısında bir değişikliğe neden olmadan, atomun enerji seviyesini değiştirdiği ortaya konulmuştur [49].

Nükleer mühendislik mesleğinin bilimsel temeli atom fiziği ve nükleer fizik konularına dayanmaktadır. Fiziksel dünyanın en küçük yapı taşı olan atom, küçük, yoğun ve ağır bir çekirdek yapısı ile onu çevreleyen hızlı hareketler sergileyen negatif elektron bulutundan oluşmaktadır. Atomu oluşturan ve atom yapısından daha küçük olan parçacıklara “atom altı parçacıklar (temel parçacıklar)” denilmektedir. Çekirdek içerisinde $1,60219 \times 10^{-19}$ C değerinde pozitif yüke ve $9,10954 \times 10^{-31}$ kg durgun kütleyle sahip protonlar ile elektriksel yükü olmayan (nötr) ve $1,67495 \times 10^{-27}$ kg durgun kütleyle sahip nötronlar bulunmaktadır. Nötr bir atomun çekirdeğinin etrafında çeşitli yörünge ve durumlarda proton sayısına eşit

miktarda negatif yüklü elektronlar (negatronlar) bulunmakta olup, durgun kütlesi $9,10954 \times 10^{-31}$ kg ve elektriksel yükü proton ile aynıdır. Çekirdek içerisindeki proton sayısı “atom numarası (Z)”, nötron sayısı “nötron numarası (N)”, nükleonların toplam sayısı (proton + nötron) “atomik kütle numarası (A)” ile ifade edilir. Çekirdeklerinde belirli sayıda proton ve nötron parçacıkları bulunduran atom türleri “nüklid” olarak isimlendirilmektedir. Aynı sayıda proton ve farklı sayıda nötron bulunduran nüklidler “izotop” olarak ifade edilmekte olup, doğada bulunan elementler izotopik bolluklarına (a/0) bağlı olarak farklı miktarlarda bulunmaktadır. Örneğin doğada yer alan oksijen atomlarının O-16, O-17 ve O-18 olmak üzere 3 kararlı izotopu bulunmakta olup bunların bulunma yüzdeleri sırasıyla %99,8; %0,037 ve %0,204’tür. Bir elementin izotop atomlarının kimyasal özellikleri birbirleriyle aynıdır [50].

2.1. Atom Yoğunluğu Kavramı

Atom çekirdeği yapısındaki, Einstein’ın görelilik kuramının sonuçlarından biri olarak enerji ve kütle arasındaki ilişkiden faydalanarak nükleer hesaplamalar yapılabilmektedir. Bu hesaplamalarda ele alınan atom kütlelerinin sayısal değerleri, günlük hayatta karşılaşılan miktarlardan çok küçük olup çeşitli kabullere ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada “atom ağırlığı / atomik ağırlık” kavramı karşımıza çıkmaktadır. Doğada en çok rastlanan C-12 nötr atomunun atom ağırlığı 12 kabul edilerek, herhangi bir nötr atomunun kütlesinin $m(A_Z)$, nötr bir C-12 atomunun kütlesine $m(12_C)$, oranı “atomik ağırlık $M(A_Z)$ ” olarak tanımlanmakta olup, birimsizdir. Bu ifade Eş. 2.1’de ifade edilmektedir.

$$M(A_Z) = 12 \frac{m(A_Z)}{m(12_C)} \quad (2.1)$$

Atomik ya da moleküler ağırlığa eşit bir kütleye sahip gram cinsinden madde miktarına “gram atom /molekül ağırlığı” denilmektedir. Bunun yanı sıra, atomik ya da moleküler ağırlığa eşit kütleye sahip madde miktarı “mol” olarak ifade edilmektedir. Bu sebeple, herhangi bir maddenin bir molü içerisindeki atom veya moleküllerinin sayısı maddenin doğasından bağımsız olarak sabit olup, bu olguya “Avagadro yasası” denilmektedir. Buna göre, birim mol madde miktarının içerisinde N_A ($0,6022045 \times 10^{24}$) tane atom veya molekül bulunmaktadır. C-12 nötr atomunun bir gram molü 12 g’lık bir kütleye sahip olup, içerisinde N_A adet atom barındırmaktadır. Atomik hesaplamalarda, hesaplama kolaylığı

açısından, C-12 nötr atomunun kütesinin 1/12'si “atomik kütle birimi (amu)” olarak isimlendirilmektedir. Bu, Eş. 2.2 ve Eş. 2.3’de ifade edilmektedir.

$$m(12_C) = \frac{12}{N_A} = 1,99268 \times 10^{-23} \text{ g} \quad (2.2)$$

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{12} m(12_C) \quad (2.3)$$

Herhangi bir atomun amu cinsinden kütesi (atom/molekül kütesi) ile o atomun atomik ağırlığı sayısal olarak birbirlerine eşittir. Bu durum Eş. 2.4’de belirtilmiştir.

$$m(A_Z) = M(A_Z) \quad (2.4)$$

Bir maddenin 1 cm³’nün içerdiği atom ve moleküllerinin sayısı “atom yoğunluğu (N)” olarak ifade edilmekte, nükleer reaktörlerde kullanılan malzemeler ile ilgili nötronik hesaplamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ele alınan bir malzeme tek bir tür atomdan oluşuyor ise, atom yoğunluğu Eş. 2.5’de ifade edilmektedir. Bu ifadede, ρ malzemenin fiziksel yoğunluğu [g/cm³], N_A Avagadro sayısı [atom/mol] ve M atom ağırlığı [g/mol] olarak yer alır. Atom yoğunluğu birimi [atom-molekül/ cm³] olmaktadır.

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (2.5)$$

Reaktörde yer alan malzemeyi oluşturan bir molekül içerisindeki i. atomun, atom yoğunluğu, Eş. 2.6’da belirtildiği şekilde hesaplanır. Bu eşitlikte n_i , molekülde yer alan i. atomların sayısıdır.

$$N_i = n_i \frac{\rho N_A}{M} \quad (2.6)$$

Benzer şekilde, reaktörde yer alan malzeme bir atomun farklı izotoplardan meydana gelebilir ve bu durumda, o atomun i. izotopunun atom yoğunluğu, izotopik bolluk yüzdesi (a/0) ile çapılarak Eş. 2.7’de belirtildiği üzere elde edilir. Bu eşitliğin payda kısmındaki M,

farklı izotoplardan meydana gelen atomun, atom ağırlığıdır. Bir atomun ρ fiziksel yoğunluğu, tüm izotopları için eşittir.

$$N_i = \frac{\rho N_A}{M} (a_0) \quad (2.7)$$

Kullanılan malzeme, belirli elementlerin ağırlık yüzdeleri (w_0) cinsinden oluşan bir kimyasal kompozisyon olabilir. $X_m Y_n$ formülü ile ifade edilen bir element karışımındaki, X elementinin ağırlık yüzdesi $w_0(X)$, Eş. 2.8'de ifade edilir.

$$w_0(X) = \frac{mM_X}{mM_X + nM_Y} 100 \quad (2.8)$$

Bu durumda, element karışımındaki, i. elementin atom yoğunluğu $w_0(i)$ kullanılarak, Eş. 2.9 ile ifade edilebilir. Bu ifadede, ρ element karışımının fiziksel yoğunluğu olup, M_i karışım içerisinde yer alan belirli bir izotopun ya da elementin atom ağırlığıdır [51].

$$N_i = w_0(i) \frac{\rho N_A}{M_i} \quad (2.9)$$

2.2. Radyasyon-Madde Etkileşimi

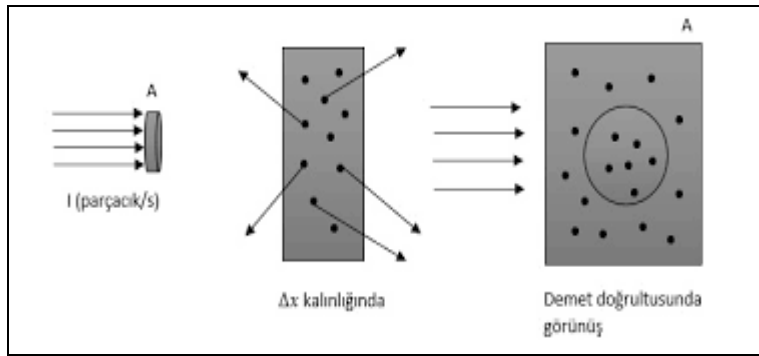
Nükleer sistemlerin tasarımı, nükleer radyasyonun madde ile etkileşiminin incelenmesine dayanmaktadır. Nötronlar elektriksel açıdan yüksüz ve çeşitli sistemler vasıtasıyla hızı ve enerjisi artırılabilen parçacıklar olduklarından, nükleer reaksiyonların başlatılmasında kullanılırlar. Farklı enerji seviyelerinde olan nötronların malzemenin çekirdeği ile atomik boyutta etkileşime girip girmeyeceği ve etkileşimin türünün belirlenmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

2.2.1. Tesir kesiti kavramı

Nötronlar atomik yapının elektron bulutundan geçerek çekirdek ile etkileşime girerler. Nötronun enerjisi, hedef çekirdeğin doğası ve meydana gelen etkileşimin türüne bağlı olarak, nötron ile hedef çekirdek arasında herhangi bir etkileşimin meydana gelme olasılığı

“tesir-kesiti (cross-section, σ)” kavramı ile ifade edilir. Tesir-kesiti, çekirdeğin etkin tesir alanı olup, barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) cinsinden ifade edilmektedir. ΔX [cm] kalınlığına ve A yüzey alanına sahip bir hedef malzeme üzerine, 1 cm^3 'lük hacim içerisinde tek enerjili (monoenerjitik) n adet nötron parçacığı bulunan bir nötron demeti, V [cm/s] hızı ile etkileşimi Şekil 2.1'de belirtilmiştir. Hedef malzemenin atom yoğunluğu N [$1/\text{cm}^3$] ve tesir kesiti σ ise, nötron demeti ile $A\Delta X$ birim hedef malzemenin etkileşme hızı “çarpışma yoğunluğu (F)” ile Eş. 2.10'da ifade edilmektedir [51].

$$F = nVN\sigma \quad (2.10)$$



Şekil 2.1. Nötron demeti ve hedef malzeme etkileşimi [51]

Çarpışma yoğunluğunun birimi [etkileşme / s] olup, bu ifadede yer alan nV ifadesi tek enerjili nötron demeti için, nötron akısı Φ [adet / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$] olarak tanımlanır. Bu durumda, çarpışma yoğunluğu Eş. 2.11'de belirtildiği gibi ifade edilir. Eş. 2.11, çarpışma yoğunluğu ifadesinde tekrar düzenlenirse, Eş. 2.12 elde edilir.

$$\Phi = nV \quad (2.11)$$

$$F = \Phi N\sigma \quad (2.12)$$

Bir nötron parçacığı, hedef malzeme içerisinde etkileşime girebilir, etkileşime hiç girmeden ortamdaki çıkabilir ya da farklı etkileşimlerde bulunabilir. Birim nötron akısı başına, nötronun hedef içerisinde aldığı yol uzunluğu başına etkileşme olasılığı “makroskobik tesir kesiti (Σ)” olarak Eş. 2.13'de belirtildiği şekilde ifade edilir ve birimi

[1/cm]'dir. Hedef ortamda bir nötronun çarpışmalar arasında kat ettiği ortalama mesafe “ortalama serbest yol (λ)” ile Eş. 2.14’de ifade edilmektedir [52].

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} \quad (2.14)$$

2.2.2. Nötron etkileşimleri

Nötron ile hedef çekirdek arasındaki etkileşim saçılma ya da soğurma (absorpsiyon) şeklinde meydana gelir. Taban düzeyinde enerji seviyesine sahip olan çekirdeğe çarpan termal (yavaş) nötron, çekirdeğin çarpışma öncesindeki enerji seviyesini değiştiremez ve çarpışma sonucu mevcut nötron çekirdek tarafından esnek saçılmaya maruz bırakılır. Bu etkileşim (n, n) etkileşimi olan “esnek (elastik) saçılma etkileşimi” olarak adlandırılır. Hedef çekirdek ile etkileşime giren nötronun sahip olduğu enerji, çekirdeği taban enerji seviyesinden uyarılmış enerji seviyesine kadar çıkarıyorsa, söz konusu etkileşim “esnek olmayan (inelastik) saçılma etkileşimi” olarak ifade edilir. Esnek olmayan etkileşimde, enerji seviyesi yüksek olan hızlı nötronlar tarafından (n, n') etkileşimleri meydana gelir. Bu durumda, enerji seviyesi artan çekirdek, etkileşim sonrası tekrar taban seviyeye dönebilmek için gama ışınları (foton) yayımlayarak bozunur. Foton yayımlanmadan önce, nötron ile çekirdeğin etkileşimi neticesinde, hızlı nötronun enerji azalırken, çekirdeğin enerjisi artar ve bu enerji çekirdek içerisinde tutulur. Bu sebeple, esnek olmayan etkileşimler endotermik tepkimelerdir [51].

Nötron ve hedef çekirdek arasındaki etkileşimde, nötronun hedef çekirdek tarafından yakalanıp bir veya daha fazla gama ışınımının yayımlanarak çekirdeğin bozunmaya uğradığı ekzotermik tepkimeler “ışınımlı yakalama etkileşimleri” olup (n, gama) olarak ifade edilirler. Işınımlı yakalamada, orijinal nötron, çekirdek tarafından soğurulur ve sonuç olarak bir enerji açığa çıkar. Nötron ile hedef çekirdek arasında (n, alfa) ya da (n, p) türü soğurma tepkimeleri meydana gelebilir ve tepkimeye giren nötron etkileşim sonucunda yok olarak, çekirdekten alfa yayını ya da proton parçacığı fırlatılabilir. Bu tip tepkimeler “yüküklü parçacık etkileşimleri” olarak adlandırılırken, tepkime endotermik ya da egzotermik olabilir. Örneğin termal nötronları soğurmak için B-10(n, alfa)Li-7 tepkimesi ve Li-6(n,

alfa)T tepkimesi yüklü parçacık etkileşimine örnek olabilir Enerjisi yüksek, hızlı nötronlar ile gevşek bağlı nötronlara sahip olan hedef çekirdekler arasında (örneğin, H-2, Be-9, vb.), etkileşime giren bir nötron sonucu iki ya da daha fazla nötron çıkan etkileşimlere “nötron üreten etkileşimler” denilmekte olup, (n,2n) ve (n, 3n) türü etkileşimler bunlardan bazılarıdır. Örneğin Li-7(n, alfa)T tepkimesi, nötron üretim bir etkileşim olup, hızlı nötronun Li-7 hedef çekirdeği ile etkileşime girmesi için 2,5MeV’lik dışarıdan enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu etkileşim sonucu enerji seviyesi daha düşük bir nötron ortaya çıkar [52].

3. NÜKLEER FÜZYON

İki hafif ve daha az kararlı çekirdeğin belirli şartlar altında kaynaşarak kütle numarası 56'dan küçük en az bir daha ağır ve daha kararlı çekirdeğin üretildiği tepkimler “füzyon reaksiyonu” olarak adlandırılmaktadır. Füzyon reaksiyonunda birim kütle başına açığa çıkan enerji, bazı durumlarda fisyon reaksiyonundan epeyce fazla olabilmekte ve çıkan radyoaktif atık açısından daha güvenilir bir kaynak nükleer enerji kaynağı olmaktadır. Bu avantajlarının yanı sıra, füzyon olayının gerçekleşmesinde çeşitli teknik güçlükler bulunmaktadır. Öncelikle, reaksiyona girecek çekirdeklerin başlangıç kinetik enerjisi Coulomb duvarını aşacak seviyede olmalıdır. İki hidrojen çekirdeği arasındaki Coulomb engeli yaklaşık olarak 200 keV'dir. Bu şartı sağlamak için çekirdeklerin, yaklaşık 100 milyon °C sıcaklığa eriştirilmesi ve ortamın korunması gerekmektedir. Füzyonun tetikleneceği bu sıcaklık değerine erişmek ve ortamın sürekliliğini sağlamak teknik sorunların başında gelmektedir. Hafif çekirdeklerin bir araya gelerek kaynaşması ve sonucunda ortaya çıkan enerjinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, açığa çıkan enerji patlama noktasına kadar ulaşır ve kontrolsüz bir termonükleer enerji sağlayan hidrojen bombası oluşturulmuş olur [52].

3.1. Füzyon Reaksiyonları ve Yakıtları

Nükleer güç üretiminde kullanılabilecek füzyon reaksiyonları ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir.



Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'de yer alan reaksiyonlar küçük tesir-kesiti değerlerine sahip olmaları ve reaksiyon sonucu γ ışınlarının ortaya çıkması (aksiyon bölgesinde oluşan tüm enerjiyi alarak kaçabilirler) sonucu reaksiyon bölgesinde uygun sıcaklığın sağlanması için fazladan güç kaynağı kullanılması gerekmektedir.





Eş. 3.3 ve Eş. 3.4'de yer alan reaksiyonlar, Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'de yer alan reaksiyonlara göre daha büyük tesir-kesiti değerlerine sahip olmalarının yanı sıra, reaksiyon sonucunda açığa çıkan parçacıklar yüklü parçacıklar ile taşınmaktadır. Böylece reaktör için sıcaklık kararlı olması ve enerji kayıplarının telafi edilebilmesi sağlanabilmektedir. D-D füzyon reaksiyonlarında tutuşturma sıcaklığı için 400 milyon °C ve 35 keV'lik başlangıç enerjisine ihtiyaç duyulur.



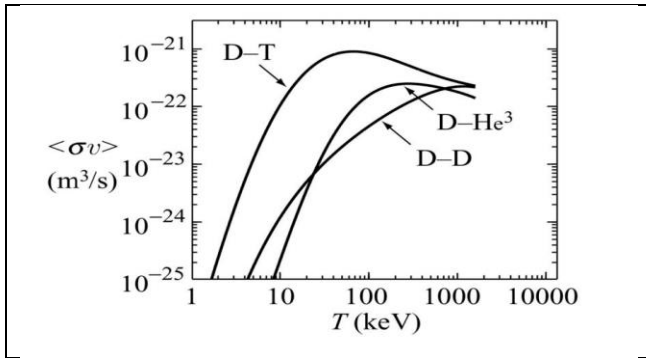
Eş. 3.5'de ilk 4 füzyon reaksiyonun daha fazla enerji açığa çıkmakta olup, yaklaşık olarak bir uranyum fisyonundan dört kat daha fazladır ($17,6/5=3,5 \text{ MeV/u}$). Bu reaksiyonun olumsuz yönü, yakıt bileşeni olan trityumun doğal olarak bulunmaması ve bunun bir füzyon reaksiyonunda üretilmek zorunda olmasıdır. Tutuşturma sıcaklığı 45 milyon °C ve 4 keV'lik başlangıç enerjisine ihtiyaç duyulur.



Eş. 3.6'da kullanılan döteron ve He-3 yakıtları radyoaktif olmayıp, herhangi bir nötron üretimi olmadığından D-T reaktöründe kaçınılmaz olan radyoaktif etkiler burada oluşmaz. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan çekirdek çok kararlı olup bağlanma enerjisi diğer reaksiyonlara göre daha yüksektir. Buna rağmen, reaksiyon yakıtlarının getirdiği yüksek Coulomb engeli ve başlangıç reaktör sıcaklığının Eş. 3.5'den 6 kat fazla olması başlıca olumsuz yanlarıdır. Tutuşturma sıcaklığı 350 milyon °C ve 30 keV'lik başlangıç enerjisine ihtiyaç duyulur [48, 52].

Yukarıda yer alan 6 füzyon reaksiyonu arasında, başlangıçta ihtiyaç duyulan ve reaksiyon sonunda ortaya çıkan enerji ile reaksiyonun gerçekleşme olasılığı dikkate alındığında, en umut verici olan Eş. 3.5'de yer alan D-T reaksiyonudur. Şekil 3.1'de belirtildiği üzere, D-T reaksiyonun gerçekleşme hızı, diğer reaksiyonlara daha düşük sıcaklıkta (yaklaşık 70keV,

800 milyon K) en tepe noktaya ulaşmış olup gerçekleşme olasılığı en yüksek olanıdır.. Döteryum (D) 1 proton ve 1 nötrondan oluşan çekirdeği ile hidrojenin kararlı bir izotopudur. Çekirdek içerisinde fazladan 1 nötron içermesi nedeniyle, döteryum hidrojenin iki katı ağırlığında olup ağır hidrojen ya da ağır su olarak ifade edilmesi bu hususa dayanmaktadır. Döteryum, okyanusların derin noktalarından alınan ağırsulardan elde edilir. Trityum (T) 2 nötron ve 1 protondan oluşan çekirdeği ile hidrojenin radyoaktif bir izotopudur. Trityum atmosferde kozmik ışınların azot ile tepkimesinden oluşur ve dünya üzerinde mevcut miktarının yaklaşık olarak 1 kg civarında olduğu tahmin edilmektedir. Trityum, yaklaşık 12 yıllık yarı ömre sahip olup Li-6 izotopunun nötron ya da berilyumun döteryum ile bombardıman edilmeleri ile oluşturulabilmektedir [55].



Şekil 3.1. Farklı füzyon reaksiyonlarının olasılık dağılımı üzerinden sıcaklığa bağlı reaksiyon hızı değerleri [55]

3.2. Füzyon Reaktörleri

Gaz fazında moleküllerin kinetik enerjisi sıvı fazındakilere yüksek olup serbest olarak hareket ederler. Gaz fazında, ısı verilmeye devam edilirse atom veya molekülün enerji seviyesi daha da artarak, sahip olduğu elektronlar buldukları orbitallerinden çekirdek çekim etkisinden kurtularak, serbest bir elektron uzayı oluştururlar. Yeterince ısıtılmış gaz fazındaki bir madde, serbest elektron, iyon ve nötr atomdan meydana gelebilir ve bu karışıma maddenin dördüncü hali olarak ifade edilen “plazma” adı verilmektedir. Plazma yapısına kavuşan gaz karışımında, yüklü parçacıklar (negatif yüklü elektronlar ile pozitif yüklü iyonlar) serbest olarak hareket ederler, elektromanyetik alanlardan kolayca etkilenirler, elektrik iletkenlikleri yüksek olup sürekli birbirleri ile etkileşim halindedirler. Plazma, sahip olduğu karışım yapısının sıcaklığı ve iyonlaşma dercesine bağlı olarak sıcak (termal) plazma ya da soğuk plazma olarak sınıflandırılmaktadır. Termal plazmada tüm

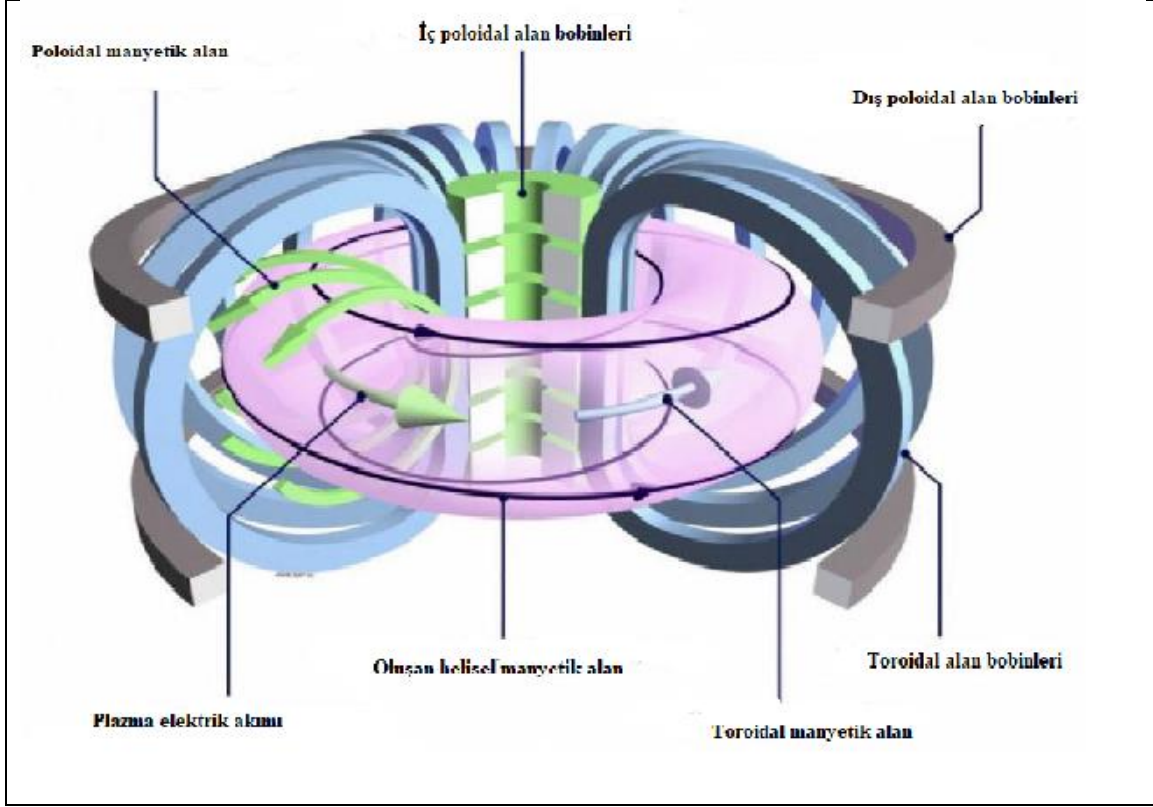
plazma yapısı termal olarak dengededir ve iyonlaşma derecesi yüksektir. Füzyon reaksiyonlarının meydana geldiği koşullarda (Güneş, yıldızlar veya laboratuvar koşullarında) termal plazma yapısı etkindir. Cam, metal ya da benzeri yapılar ile sınırlandırılabilen, iyonlaşma derecesi küçük, elektronları yüksek sıcaklıkta, ancak iyonları ve nötr atomları daha düşük sıcaklıkta olan yapılar soğuk plazma olarak değerlendirilirler [56]. Füzyon reaktörlerinin çalışır vaziyete gelebilmesi ve günlük hayatımızda kullanılabilmesi için bazı teknik ve ekonomik hususların çözülebilmesi gerekmektedir. Öncelikle, füzyon reaksiyonu sonucunda bir reaksiyonun ortaya çıktığı tesir kesitleri ve verim ölçümleri ile deneysel olarak ortaya konulmalıdır. İkinci husus, reaktöre verilen enerjiden daha fazlasının elde edilmesi ve bunun ile ilgili sisteminin çalışma temelini belirlemesi gerekmektedir. Üçüncüsü, net bir güç çıkışı sağlayabilecek bir sistemin inşaatı olup, dördüncü husus bu sistemin ekonomikliğinin sağlanmasıdır. İlk iki şart şu ana kadar sağlansa da üçüncü ve dördüncü şartların sağlanması ile ilgili çalışmalar halen sürmektedir. Füzyon reaksiyonlarının meydana gelmesi ve reaktör içinde sürekliliğin sağlanması için sıcaklık ve sınırlandırma (sıkıştırma) şartlarının sağlanması gerekmektedir. D-T yakıt çekirdeklerinin füzyon reaksiyonunu başlatabilmeleri için ilk koşul Coulomb kuvvetinin aşılarak 4,4keV’lik ideal ateşleme sıcaklığının elde edilmesi gerekmektedir. İkinci koşul ise füzyon yakıtındaki parçacık sayı yoğunluğu (n) ve reaksiyon için gereken hapsedme zamanı (τ) çarpımının belirli bir değerde olması gerekmektedir. Buna “Lawson Kriteri” denilmekte olup D-T reaksiyonu için $n \tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3$ olmalıdır. Güneş ve yıldızlarda sahip oldukları kütleli büyüklüklerinin getirdiği çekim kuvveti etkisi ile oluşan füzyon reaksiyonlarında ideal ateşleme sıcaklığı ve Lawson Kriterleri sağlanabilmektedir. Dünya üzerinde, bu şartların yapay olarak sağlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmalardan ilki katı bir duvar yapısı içerisinde oluşturulan manyetik alanda çok kısa süreliğine plazma ortamının sağlanmasıdır. İkinci olarak lazer ya da mikrodalga jeneratörleri yardımıyla atalet etkisi yüksek yoğunluklu plazmanın sıkıştırılıp genleşme miktarının sınırlandırılması temeline dayanan “Atalet Kısıtlı Füzyon (ICF)” yer almaktadır. Son olarak, torodial bir geometride oluşturulan sarmal manyetik alanlar vasıtasıyla sıcak plazmanın hapsedilmesi mantığına dayanan “Manyetik Sıkıştırımlı Füzyon (MCF)” bulunmaktadır [48].

4. MANYETİK SIKIŞTIRMALI FÜZYON REAKTÖRLERİ

İdeal ateşleme sıcaklığı ve Lawson kriterlerinin sağlandığı plazma ortamındaki yüklü parçacıklar torus geometrisine sahip poloidal ve toroidal manyetik alanlar etkisinde hareketlerini sürdürürler. Bu hareketleri esnasında, füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan enerji salınımı kontrol edilir. Bu tip füzyon reaktörleri, manyetik sınırlandırılmalı (sıkıştırılmalı) füzyon reaktörleri olarak adlandırılırlar. Plazma ortamına manyetik sınırlandırma üç farklı şekilde sağlanabilmektedir. Bunlarda ilki, yüklü parçacıkların elektromanyetik alan doğrultusunun etrafında spiral hareketi yaptıkları düzgün aksel manyetik alan sınırlandırması metodu olup ilk deneysel çalışmalar bu şekilde yapılmıştır. Diğeri, iki elektromıknatıs konfigürasyonu (manyetik aynalar) ile sınırlandırılmış belirli bir elektromanyetik alanda hareket eden yüklü parçacıkların sınır bölgelerine yaklaştıkça saptırılıp geldikleri alana tekrar yönlendirilmesine dayanan manyetik aynalar metodudur. Her iki yöntemde de yük kaybı sorunları yaşandığından Tokamak reaktörlerine tercih edilmiştir.

4.1. Tokamak Reaktörü

1950 yıllarında Sovyet fizikçiler Igor Tamm ve Andrei Sakharov tarafından toroid-haznemıknatıs-bobin (Toroid Kamera Magnit Katushka) kelimelerinin Rusça kısaltması olan ve “Tokamak” adı ile anılan füzyon reaktörü geliştirilmiştir. 1957’de Kurchatov Enstitüsünde düşük plazma parametreleri kullanılarak ilk konvansiyonel tokamak olan T-1 çalıştırılmıştır. Bundan 10 yıl sonra, daha yüksek plazma parametreleri kullanarak ve plazma içerisindeki safsızlıkları azaltarak, Lev Artsimovich liderliğinde T-3 çalıştırılmıştır. 1970 yılından itibaren, pek çok ülke ve uluslararası füzyon toplulukları pek çok deneysel tokamak tesisi yapmıştır. 1982’de ABD’de Tokamak Füzyon Test Reaktörü (TFTR), 1983’de Ortak Avrupa Tokamak (JET), 1985’de Japon Torus (JT-60) ve 1988 yılında Fransa’da Tore Supra tesisleri yapılmıştır. 1991’de JET ve 1993’de TFTR reaktörlerinde D-T yakıtı kullanarak, megavat düzeyinde füzyon çıkış gücü elde edilmiştir. Şekil 4.1’de bir tokamak yapısının plazmayı sınırlayıp yönlendirdiği vakum odası ve manyetik alan bobin ve mıknatıs sistemi görülmektedir [54].



Şekil 4.1. Tokamak odası ve manyetik alan profilleri [58]

Tokamak içerisinde füzyon reaksiyonun olduğu plazma vakum odasında yer alır. Füzyon reaksiyonu sonucu oluşan yüklü parçacıklar toroidal geometri boyunca momentum ve merkez kaç kuvvetlerinin etkisi ile hareket ederler. Toroidal geometride yüklü parçacıkların bu hareketi toroidal alan bobinlerinin sağladığı güçlü bir toroidal manyetik alan ile gerçekleşir. Yüklü parçacıkların torus geometrisi boyunca helisel hareketi boyunca, vakum kabı yüzeylerine çarpmasının en aza indirilebilmesi ve plazma kararlılığının devam edebilmesi için iç ve dış poloidal alan bobinlerinin oluşturduğu poloidal manyetik alandan yararlanır. Poloidal manyetik alan oluşturmak için torus geometrisi boyunca bir akım geçirilir. Tokamak içerisinde plazma ortamı poloidal ve toroidal manyetik alanların oluşumunu sağlayan ve plazma kaynağının özelliklerini tanımlayan boyutsuz ek sayılar ile tanımlanmaktadır. Tüm bunlar plazma fiziğinin konusu olup tez çalışması kapsamında sınırlı olarak bahsedilmektedir. Tokamak içerisinde mıknatıs sistemi dışında, plazmanın bulunduğu vakum kabı, saptırıcılar ve en dışta sistemi dışarı ile sınırlayan kriyostat bulunmaktadır. Vakum kabı içerisinde bulunan plazma ortamı ile vakum kabının yüzeyleri arasında çeşitli nötronik etkileşimler meydana gelmektedir. D-T reaksiyonu neticesinde 14 MeV'lik hızlı nötronlar yüksüz parçacıklar olup manyetik alandan etkilenmezler ve vakum

kabı içerisindeki ilk duvar ile radyoaktif etkileşime girerler. Bunun dışında, yine D-T reaksiyonu sonucu ortaya çıkan 3,5 MeV'lik 4-He parçacığı yüklü bir parçacık olup, plazma içerisinde yakıt ortamının ısıtılmasına ve reaksiyonların sürdürülmesine katkıda bulunur [54].

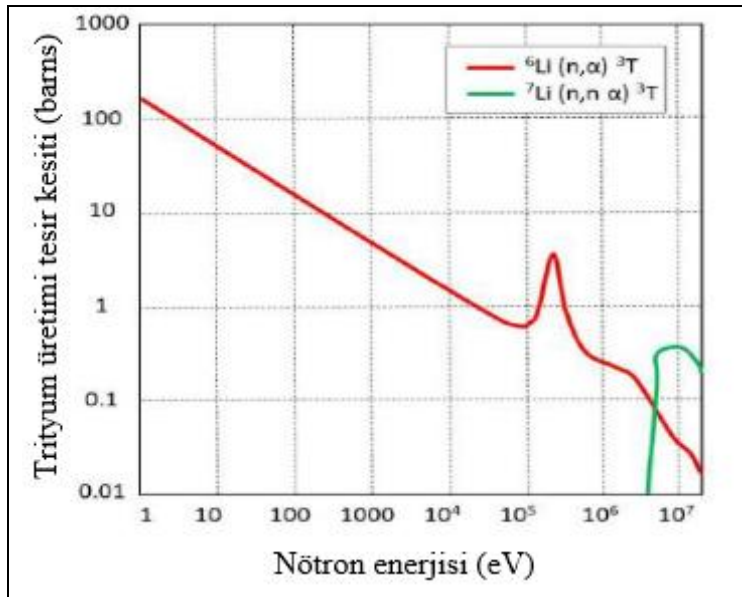
Ortaya çıkan hızlı nötronlar, plazma ortamı ile mıknatısların arasında bulunan bir dizi tabakalar vasıtasıyla nötron moderasyonuna maruz kalır. Bunun yanı sıra, reaksiyon sonucunda ortaya çıkan hızlı nötronlar ilk duvar ile etkileşime girdiklerinde malzeme üzerinde radyasyon hasarına neden olurlar. Söz konusu hasar nedeniyle zaman içerisinde elektron kaçakları meydana gelir, malzeme yüzeyinde oluşan nötron akı değerleri ve buna bağlı olarak ısınma miktarlarında artış oluşur. Sonuç olarak bu malzemeler belirli bir zaman dilimi sonrasında mekanik ve nükleer özelliklerini kaybetmeye başladıklarında değiştirilme ihtiyaçları ortaya çıkar. Malzeme içerisinde meydana gelen bu hasar atom başına yer değiştirme (DPA) değeri ile belirlenmektedir. Füzyon reaksiyonu boyunca ortaya çıkan yüksek enerjili nötronlar, lityum içerikli trityum üretim tabakaları yardımıyla reaktör içerisinde trityum üretimi sağlanırken, soğutma kanalları yardımı ile enerji üretimi sağlanır [34].

Bir füzyon reaktörü tasarımını uygulayabilmek için iki temel unsurun sağlanabilmesi gerekmektedir. Bunlardan birincisi, plazma ortamında üretilen füzyon gücünün reaktörün çalışması sırasında tükettiği güçten fazla olması gerekmektedir. Bu kavrama başa baş noktası denilmekte olup, bu değer birden büyük olması gerekmektedir. Diğer nokta ise, füzyon reaktörünün kendi kendine lityum üretimi sürekliliğinin sağlanması ile ilgili bir kavram olan trityum üretim oranı (TBR) değerinin birden büyük olmasıdır. Reaktör tabakalarında üretilen trityum miktarının, plazmada tüketilen trityum miktarına oranı trityum üretim oranı olarak ifade edilmektedir. Lityum içerikli tabakalarda nötron soğurulması Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'de verilen reaksiyonlar ile gerçekleşmektedir [19, 23].

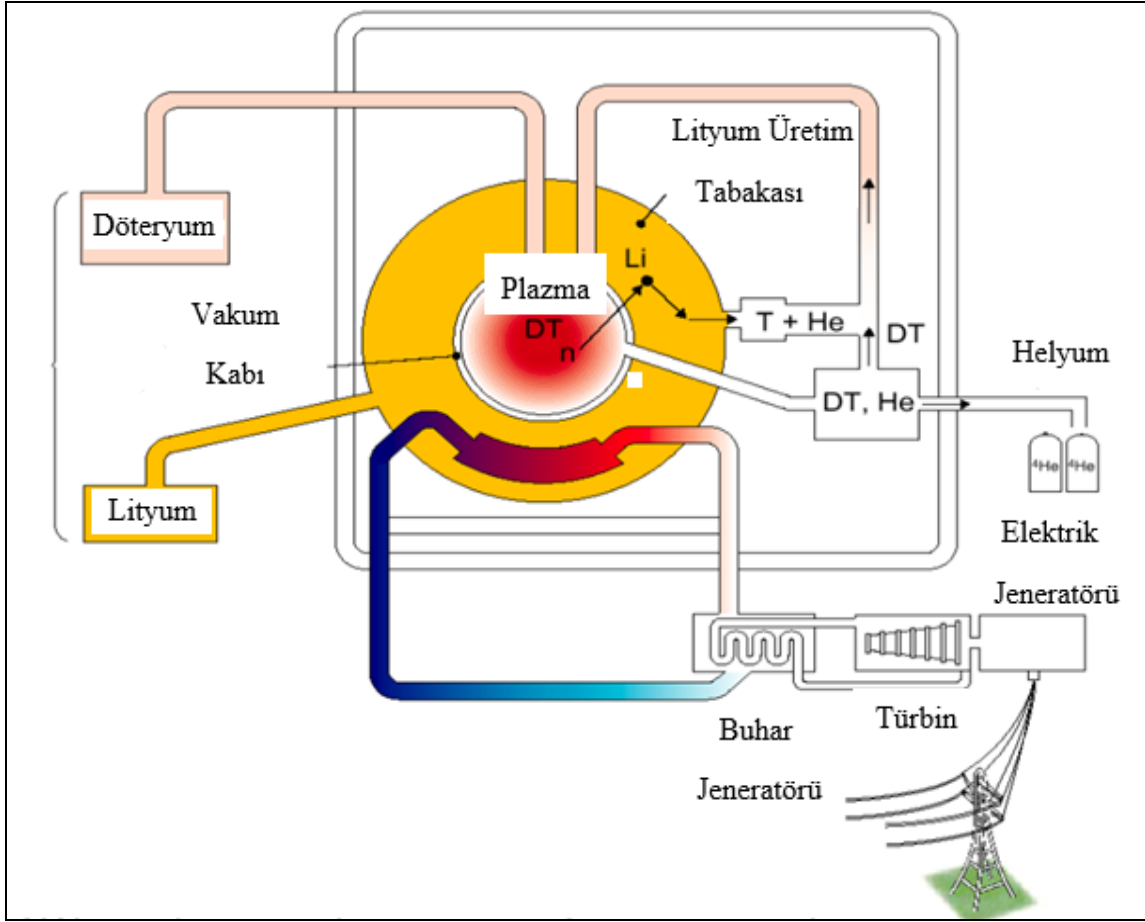


Doğada bulunan lityum elementi %7,5 Li-6 ve %92,5 Li-7 izotoplarından oluşmaktadır.

Plazma oluşan D-T reaksiyonu sonucu ortaya çıkan n(hızlı) yüksek enerji seviyesine sahip olduğundan öncelikle, Eş. 4.1'de belirtilen Li-7 tarafından absorbe edilir ve bu reaksiyon için 2,5 MeV'lik bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu reaksiyon endotermik bir reaksiyon olup, reaksiyon sonucu 1 adet nötron ve trityum ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan nötron modere edilmiş, yani enerji seviyesi ilk nötron parçasığına göre düşmüştür. Eş.4.2'de izotop bolluğu daha az olan Li-6 izotopu tarafından absorbe edilen nötron sonucu 4,8 MeV'lik bir enerji açığa ve trityum ortaya çıkar. Şekil 4.2'de 14 MeV enerji seviyesine kadar nötronun Li-6 ve Li-7 izotoplarına ait trityum üretimi tesir kesitleri belirtilmiştir. Buna göre, Li-6 izotopu daha geniş bir enerji aralığında nötron ile tepkime verirken, Li-7 yalnızca yüksek enerji aralığında tepkime verebildiği görülmektedir. Bu sebeple, öncelikle Li-7 izotopunun hızlı nötron ile sonucunda yeniden nötron oluşması nedeniyle TBR değerinin 1'den büyük çıkmasının beklenen bir durum olduğu düşünülebilir, ancak reaktör yapısı içerisinde nötron kaçaklarına yol açabilen saptırıcı ve ısıtıcı elemanları bulunmaktadır. Diğer taraftan Li-6, geniş bir enerji aralığında nötronlar ile reaksiyona girerek trityum üretimine yardımcı olmaktadır. Li-6'nın geniş bir enerji aralığında reaksiyon verebilmesi nedeniyle, trityum üretiminin sağlanabilmesi ve TBR değerlerinin yükseltilmesi için Li-6 zenginleştirilmesi yapılmak istenilmektedir. Li-6 zenginleştirilmesi maliyetli bir işlem olduğu için $TBR \geq 1,05$ şartını sağlayabilmek için (n,2n) nötron çoğaltma reaksiyonları sağlayan nötron çoğaltma tabakaları reaktör içerisinde kullanılmaktadır [19, 57].



Şekil 4.2. Li-6 ve Li-7 izotoplarına ait trityum üretimi tesir kesitleri [19]



Şekil 4.3. Füzyon güç santrali örneği [57]

Şekil 4.3’de bir füzyon güç santrali örneği verilmiştir. D-T reaksiyonu sonucu oluşan nötronlar reaktör tabakası içerisinde lityum ile tepkimeye girerek trityum üretimini sağlarken, üretilen trityum plazma ortamına tekrar verilmektedir. Trityumun depolanabilmesi radyoaktif bozunurluğunun kolay olması nedeniyle tercih edilmez iken, döteryum ve reaksiyondan çıkan helyum depolanabilir. Isı eşanjörleri yardımıyla üretilen ısı enerjisi buhar jeneratörüne iletilir ve türbinler vasıtasıyla elektrik üretimi sağlanır [57].

4.2. ARC Tokamak Reaktörü

ARC reaktörü, malzemelerin ve reaktör yapı elemanlarının radyasyon etkisi altındaki davranışlarını incelemek için D-T reaksiyonu kullanılarak bir füzyon güç santrali ve nükleer füzyon bilimi uygulamalarına örnek olması amacı taşıyan kavramsal bir tokamak tasarımıdır. Füzyon reaktörlerin boyutlarının büyüklüğüne bağlı olarak inşaat maliyetleri ve sürelerini azaltabilmek için ilk defa 2014 yılında bir füzyon projesi kapsamında MIT

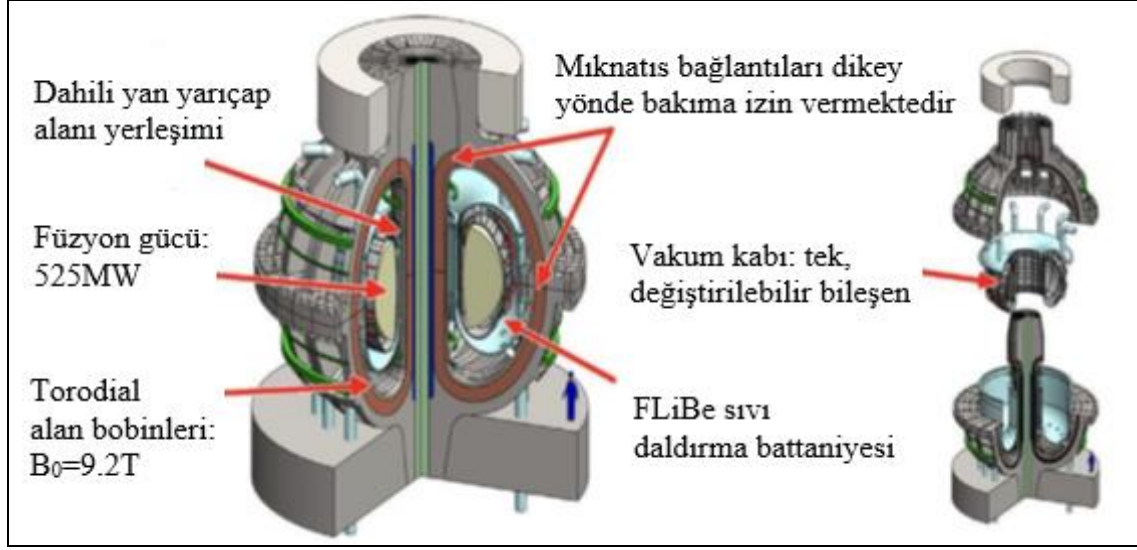
öğrencileri tarafından yapılan bir çalışma sırasında, söz konusu tasarım çalışması ortaya çıkmıştır. Bir füzyon reaktöründe öncelikle plazma ortamının sürekliliğinin sağlanması için Lawson kriterlerinin sağlanması gerekmektedir. Bunun için belirli bir hapsedileme süresi içerisinde uygun sıcaklık ve yoğunlukta plazma ortamı oluşturulabilmelidir. Füzyon reaktörlerinin uygulamaya geçme noktasında ise reaktörden elde edilen füzyon gücünün ($Q_{\text{füzyon}}$), reaktörün çalıştırılması için gereken giriş gücünden (Q_{giris}) büyük olması, yani başa başnoktasına ulaşması ($Q \geq 1$) istenilmektedir. Şimdiye kadar, tokamak tasarımlarından biri olan JET reaktöründe 1994’de $Q=0,3$ ve 1997’de $Q=0,7$ değerlerine ulaşılabilmiştir. ARC reaktörü ile, başa baş noktasında 2 değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır. Plazma ortamı ile ilgili bu hususlar dışında, plazma ortamını çevreleyen tabakaların ve mıknatıs yapısının bir bütün olarak ele alınmasını sağlayacak malzeme -nötron etkileşimlerinin istenen seviyede olması gerekmektedir. 2021 yılında MIT Plazma Bilim ve Füzyon Merkezi ile Commonwealth Füzyon Sistemleri (CFS) şirketinin iş birliği ile ARC reaktörü imalatı çalışmalarına başlanılmış olup 2033 yılına kadar enerji üretebilecek hale gelmesi planlanmaktadır [6, 53].

Reaksiyonun oluştuğu plazma ortamının çevresinde yer alan demonte edilebilen tabakalar ve baryum bakır oksit malzemedan (REBCO) yapılmaya yüksek sıcaklıklı süper iletken (HTS) mıknatıs yapısı sayesinde, ARC tasarımı ITER çapının (6,2 m) yaklaşık yarısı kadar olacak şekilde imal edilebilmesi ve makinenin bakım onarım çalışmaları sırasında iç kısımlarına erişilebilmesine imkân tanıyacak tasarıma sahip olacaktır. 3,3 m ana yarı çap ve 1,1 m küçük yarı çapa sahip, 9,2 T ve 270 MWe’lik bir tokamak reaktörü olması planlanmaktadır. Ayrıca, ITER’e benzer şekilde oluşan füzyon gücü ARC reaktöründe de 500MW’tır. ARC reaktörünün temel tasarım parametreleri Çizelge 4.1’de, iç yapısı ve vakum kabı detayları Şekil 4.4’de belirtilmiştir [6, 8].

Çizelge 4.1. ARC reaktörü için temel tasarım parametreleri

Parametrenin Adı	Değeri
Füzyon Gücü	525 MW
Toplam Isıl Güç	708 MW
Tesisin Isıl Verimi	0,40
Toplam Elektrik Gücü	283MW
Net Elektrik Gücü	190MW
Güç Çoğaltma Faktörü	3
Ana Yarı Çap Değeri	3,3m
Küçük Yarı Çap Değeri	1,1 m
Plazma Uzama Değeri	1,84
Plazma Hacmi	141 m ³
Toroidal Manyetik Alan	9,2 T
Bobin Üzerinde Tepe Manyetik Alan Değeri	23 T
Plazma Akımı	7,8 MA
Tritiyum Üretim Oranı (TBR)	1,1
Ortalama Sıcaklık	14keV
Eksenel Sıcaklık	27keV
Enerji Hapsetme Süresi	0,64 s

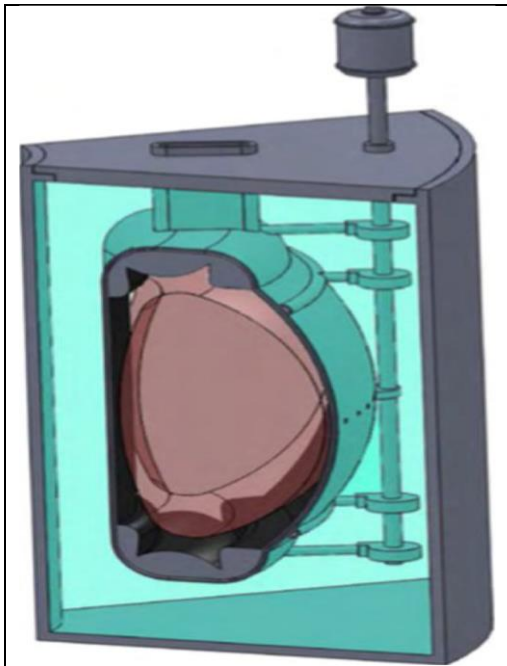
ARC reaktörünün iç yapısında D-T reaksiyonun olduğu plazma bölgesinden en dışardaki mıknatıs yapısına kadar plazma bölgesi, ilk duvar bölgesi, vakum kabı ve tritiyum üretim tabakası bulunmaktadır. Plazma bölgesi, D-T füzyon reaksiyonlarının meydana geldiği kısımdır. Her bir reaksiyon sonucunda, 3,5 MeV'lik alfa yüklü parçacığı (4-He) ve 14,1 MeV'lik yüksüz hızlı nötron parçacıkları ortaya çıkmaktadır. 4-He plazma ortamında bir sonraki D-T reaksiyonu öncesi yakıtların ısıtılmasına katkı sağlarken, yüksek enerjili nötronlar yakıt kütlesi ortamında kolayca kaçma eğiliminde olup reaktör katmanlarında radyasyon ile yayılırlar [8]. İlk duvar bölgesi, plazma bölgesinin karşılaştığı ilk yüzey olup, yüksek termal mekaniksel yüklere ve yüksek nötron akılarına maruz kalmaktadır. Bu durum ilk duvar bölgesinde yer alan malzemenin kolayca bozulmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, ilk duvar bölgesinde kullanılan malzeme ve kalınlığının seçiminde öncelikle plazma içerisindeki reaksiyonun saflığına en az etki olması, sonrasında nötron moderasyonu dikkate alınır. Vakum kabının iç bölgesinde yer alır. Orijinal tasarımda, ilk duvar bölgesinde 0,1 cm kalınlığında tungsten (W) malzeme kullanılmıştır [18].



Şekil 4.4. ARC reaktörünün iç yapısı ve vakum kabı

Vakum kabı, toroidal geometriye sahip yekpare gövdeden tasarlanmış olup, çift cidarlı bir bileşendir. Vakum kabı, trityum üretim tabakası eriyik tuzunun içerisindeki batık halde bulunur. Vakum kabının iç ve dış katmanı olmak üzere iki yapısal duvarı arasında, soğutucu sıvının aktığı kanallar ve nötron çoğaltma tabakası yer almaktadır. Vakum kabının iç ve dış katmanları, yüksek sıcaklıklarda korozyon direnci yüksek, ısı iletim katsayısı yüksek düşük radyoaktif aktivasyona ve yüksek nötron moderasyonuna sahip malzemelerden seçilir. Orijinal tasarımda, vakum kabının iç cidar tarafı 1 cm ve dış cidar tarafı ise 3 cm kalınlığında, vakum kabının tamamı nikel içeriği yüksek Inconel-718 alaşımından imal edilmiştir. Bu malzeme yerine, yüksek aktivasyon performanslarına sahip başka malzemelerin (örneğin yüksek entropili alaşımlar, vanadyum içeriği yüksek alaşımlar, vb.) kullanımı ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Vakum kabının içerisinde, 2 cm kalınlığında içerisinde eriyik tuz çözeltilerinin (FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, FLiNaRb, vb.) kullanıldığı soğutucu kanallar ve 1 cm kalınlığında katı nötron çoğaltıcı tabaka bulunmaktadır. Nötron çoğaltıcı tabaka malzemesi olarak $(n, 2n)$ reaksiyonlarında yüksek saçılma tesir-kesitine sahip berilyum malzemesi tercih edilmektedir. Soğutucu kanalların malzemesi olarak vakum kabı malzemesi tercih edilmektedir. Soğutucu kanallar vakum kabı içerisinde ısı eşanjörü olarak görev yaparak, reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin reaktörün diğer katmanlarına zarar vermesini engellerken, enerji üretimine de katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, içerisinde akan sıvı eriyik tuz reaktörün trityum üretiminin sürekliliğine katkı sağlamaktadır. ARC reaktörünün ilk tasarımında FLiBe eriyik tuzu kullanılmıştır [7]. Trityum üretim tabakası, vakum kabının içerisinde batık

halde bulunduğu sıvı eriyik tuz bölgesidir. Trityum üretiminin yapıldığı temel tabakadır. ARC reaktörünün orijinal tasarımında, 100 cm kalınlığında düşük basınçlı, yavaş akan flor lityum berilyum (FLiBe) erimiş tuzundan oluşan tamamen sıvı bir malzeme kullanır. Sıvı eriyik tuz, düşük riskli bir teknolojidir ve etkili nötron moderasyonu ve koruması, mükemmel ısı giderme ve uygun değerlerde trityum üreme oranı ($TBR \geq 1,1$) sağlar. FLiBe'nin sıvı olduğu geniş sıcaklık aralığı, 900 K'lik bir çıkış sıcaklığına, tek fazlı sıvı soğutmaya ve ARC'yi pilot elektrik santrali olarak çalıştırırken net elektrik üretimine izin veren yüksek verimli bir helyum Brayton döngüsüne izin verir. Trityum üretimi için, literatürde katıdan sıvıya kadar farklı malzeme birleşimlerinden oluşan trityum üretim tabakası malzemeleri bulunmaktadır. Bu yapılar, ARC yapısının yüksek manyetik alan ve kompakt tasarımını sağlamasının yanı sıra, nötron yavaşlatma özelliğinin iyi olması, ısı iletkenliğinin iyi olması ve elastik olmayan saçılma tesir-kesiti değerinin yüksek olması talep edilmektedir. Bu sebeple, trityum üretimi için en çok lityum kurşunlu (PbLi) sıvı metal ve $2LiF-BeF_2$ (FLiBe) erimiş tuzu tercih edilmektedir. Şekil 4.5'de eriyik tuz çözeltisi içerisindeki vakum kabı görülmektedir [8, 15].



Şekil 4.5. Eriyik tuz çözeltisi içerisindeki vakum kabı yapısı [15]

Zırh bölgesi, trityum üretim tabakasının ardında kalan ve nötronların tutularak reaktörün dış bölgelerine ve dışarı kaçmasına izin vermeyen zırh kısmı olarak tanımlanmaktadır. İlk reaktör tasarımında, 20 cm kalınlığında zirkonyum hidrit (ZrH_2) malzemesi

kullanılmaktadır. Bunun dışında, fiziksel yoğunluğu yüksek, nötron absorbe etme özelliği iyi bor karbür (B_4C), tungsten karbür (WC) ve tungsten borit (WB, WB_4) gibi diğer malzeme türleri de kullanılabilir [15].

Yüksek bir manyetik alan içerisinde sınırlı bir hacimde bulunan reaktör bileşenlerinin ısıya dayanımı, kimyasal ve manyetik yüklere karşı dayanıklılığı ve nötron moderasyonu özelliklerinin belirlenmesi bir optimizasyon problemidir [7].

5. NÖTRON DİFÜZYON VE TRANSPORT TEORİLERİ

Nükleer reaktör tasarımında, nötronlar ile malzemenin etkileşimini anlayabilmek için nötron dağılımının belirlenebilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, nötron difüzyon teorisi ve nötron transport teorisi olmak üzere iki teori geliştirilmiştir. Difüzyon teorisi, reaktör tasarımında basit ve hassas olmayan sonuçlar verirken, çözümü daha karmaşık olan transport teorisi gerçek reaktör tasarımı için uygun akı dağılımı sonuçları verebilmektedir. Bu noktada, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve çeşitli kodlar yardımı ile nötron transport teorisinde çeşitli hesaplama metotları geliştirilmiştir [59].

5.1. Nötron Difüzyon Teorisi

Reaktör içerisinde nötronların davranışlarını ve hareketlerini modelleyebilmek için çeşitli teoriler bulunmaktadır. Nötron hareketinin yüksek yoğunluklu ortamdan düşük yoğunluklu diğer bir ortama hareketi “Nötron Difüzyon Teorisi” olarak ifade edilmekte olup Fick Kanununa dayanmaktadır. Buna göre Eş. 5.1’de belirtildiği üzere, n yönüne dik birim alandan geçen nötron akım yoğunluğu (J_n), konuma bağlı olmayan difüzyon parametresi (D) ve nötron akısının konuma göre değişimi ($grad \phi$) ile ifade edilmektedir. Nötron akımının yönü, cm³.s başına daha fazla çarpışmanın olduğu yüksek nötron akı bölgesinden, benzer şekilde çarpışmanın daha az olduğu düşük nötron akı bölgesine doğru olduğu için nötron akım yoğunluğunun negatif değer almaktadır [50].

$$J_n = -D grad \phi \quad (5.1)$$

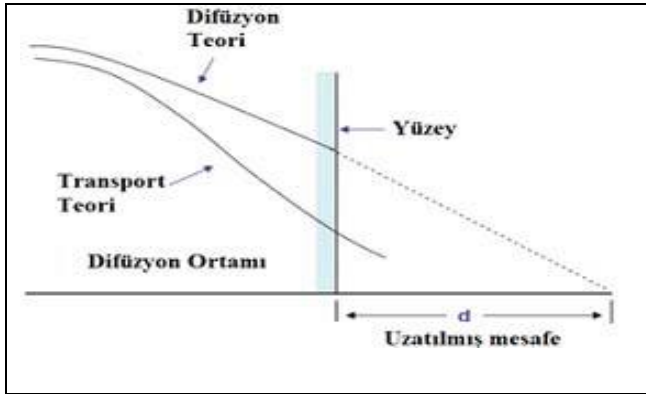
Belirli bir V hacminde, nötron üretimi gerçekleşebilir, nötronların bir kısmı hacim içinde soğurulabilir ve hacmin içine veya dışına yüzeylerden geçecek şekilde net bir nötron akışı olabilir. V hacmi içerisinde nötronik bu faaliyetlerin tümünden dolayı, nötron yoğunluğu (n) zamana göre değişim gösterir. Tüm bu süreçler, Eş. 5.2’de süreklilik eşitliği olarak aşağıda ifade edilmektedir.

$$\int_V \frac{\partial n}{\partial t} dV = \int_V s dV - \int_V \Sigma_a \phi dV - \int_V J dV \quad (5.2)$$

Eş. 5.2’de nötron yoğunluğu (n) ve nötron akım yoğunluğu vektörü (J) iki bilinmeyen bulunmaktadır. Bu ifadenin V hacmi üzerinden integrali alınıp, bilinmeyenler skaler nötron akısı (ϕ) cinsinden yazılırsa, “Nötron Difüzyon Denklemi” elde edilir ve Eş. 5.3’de gösterilmiştir.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = s - \Sigma_a \phi + D \nabla^2 \phi \quad (5.3)$$

Nötron difüzyon teorisi, reaktör içerisinde nötron akı dağılımını belirlemede belirli şartlar altında yaklaşık olarak ilk etapta iyi sonuçlar verebilmektedir. Bu şartlardan ilki, reaktör ortamında nötronlar güçlü bir soğurma mekanizmasına maruz kalmamasıdır. İkincisi, ele alınan nötronik analizin nötron kaynağından veya ortamın yüzeylerinden yaklaşık 3 ortalama serbest yol (uzatılmış mesafe) uzaklığında bulunması gerektiğidir. Üçüncüsü, nötron saçılımının izotropik olduğu, dördüncü şart ise, difüzyon denklemi ile hesaplanmış akı değerinin yüzeyin belirli bir mesafesinde sıfır olması gerektiği kabulleridir. Şekil 5.1’de belirtildiği üzere, nötron difüzyon teorisi, difüzyonun gerçekleştiği yüzeyde, gerçek reaktör tasarımlarında elde edilen gerçek akıdan belirli bir miktarda sapma göstermektedir [37].

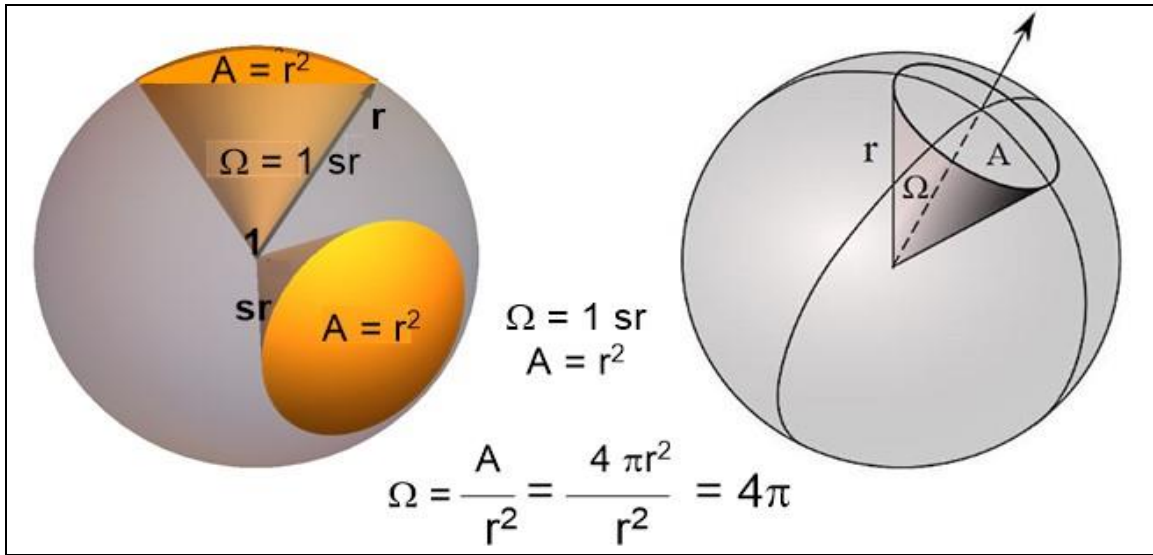


Şekil 5.1. Nötron difüzyon teorisi ile gerçek reaktör tasarımında hesaplanan akı değerlerinin yüzeye yakın ortamdaki davranışları

5.2. Nötron Transport Teorisi

Gerçek bir reaktör tasarımında nötron madde etkileşimleri sırasında; nötron akısı ve tesir kesitleri yön, açı ve enerji seviyelerine göre farklılık göstermektedir. Nötron saçılmaları her yönde eş dağılım sergileyemez, nötronlar güçlü soğurma etkilerine maruz kalabilir

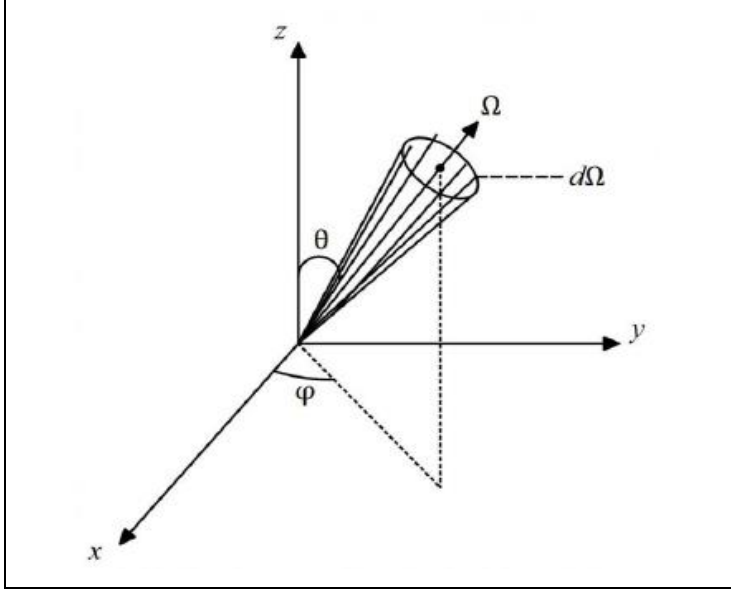
ve nötronlar farklı enerji seviyelerinde olabilir. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak, altı boyutlu bir faz uzayında, noktasal parçacık olan nötronun bütün hallerini zamana bağlı olarak bir V hacmi içerisinde süreklilik eşitliğinde tanımlayan “Nötron Transport Teorisi” geliştirilmiştir. Bu teori L. Boltzmann tarafından 1872’de ortaya konulmuş olup “Boltzmann Eşitliği” olarak da ifade edilebilmektedir. Belirli bir V hacminde nötron dağılımını, Nötron Transport Teorisinde ele alabilmek için, küresel bir geometride nötron dağılımının tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Üç boyutlu bir uzayda ele alınan küresel geometride, yüzey ile onun ile ilişkili herhangi bir açı tanımlanırken, r^2 ’lik alana sahip ve tepe noktası $4\pi r^2$ ’lik alana sahip bir kürenin merkezinde bir konide, r^2 ’lik alanın gördüğü merkez açıya “katı açı (solid angle)” denilmekte olup, “steradyan [sr.]” birimi ile ifade edilip Ω ile gösterilmektedir. Şekil 5.2’de bir kürenin içerisindeki koninin sahip olduğu alana ait katı açı kavramı yer almaktadır [60, 61].



Şekil 5.2. Bir küre yüzeyindeki katı açı kavramı [61]

Üç boyutlu bir uzayda, \mathbf{r} vektörü ile konumu, \mathbf{V} vektörü ile hızı noktasal bir parçacıklardan oluşan nötronların küresel koordinat sistemindeki dağılımı, doğrusallaştırılmış Boltzmann transport denkleminde 7 boyuta sahiptir. Koyu karakter ile gösterilen ifadeler vektörel büyüklükleri ifade ederken, diğerleri skaler büyüklük olarak ele alınmaktadır. Ω , katı açı olup, Boltzmann transport teorisinde, noktasal parçacık olan bir nötronun hareketi doğrultusundaki birim vektördür. Ω birim vektörü, Şekil 5.3’de ifade edildiği üzere, zenit açısı (Θ) ve azimut açısı (ϕ) ile ifade edilmektedir [62].

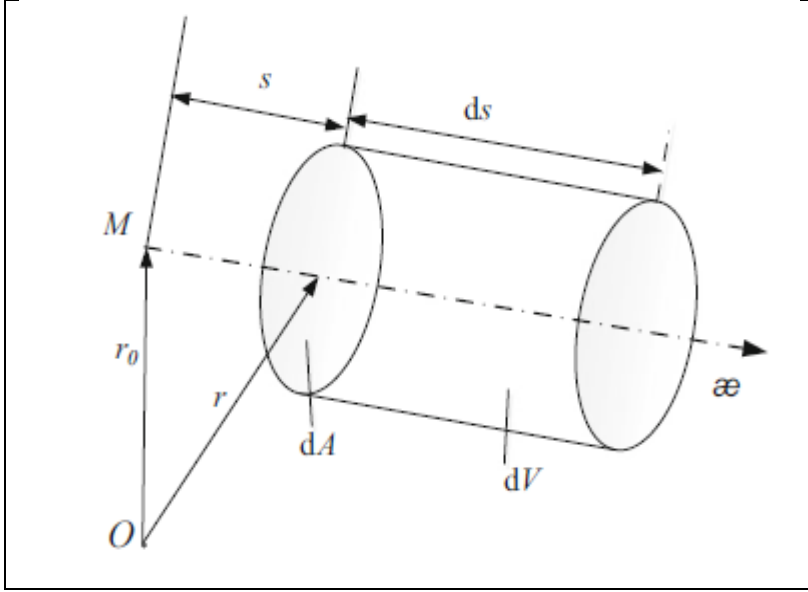
3 uzaysal boyut ($\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$), 1 enerji boyutu (E), 2 yön boyutu ($\mathbf{\Omega} = \mathbf{\Omega}(\Theta, \varphi)$) ve 1 zaman boyutu (t) ile ifade edilen 7 boyutta, [nötron / $\text{cm}^3 \cdot \text{sr}$] biriminde nötron açısal yoğunluğu $n(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega}, t)$, [nötron / $\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s}$] biriminde nötron açısal akısı $\phi(r, E, \mathbf{\Omega}, t)$, [nötron / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$] biriminde nötron akısı $\phi(r, E, t)$ ve nötron akımı $\mathbf{J}(\mathbf{r}, E, t)$ kavramlarının yardımıyla nötron dağılımı, Boltzmann Teorisi kapsamında açıklanmaktadır [54].



Şekil 5.3. Küresel koordinat sisteminde $\mathbf{\Omega}$ birim vektörünün ifadesi [54]

Boltzmann transport teorisinde, nötron dağılımı nötron sayısının korunumu ilkesine göre ifade edilir. Buna göre, Şekil 5.4’de ifade edilen $dVdEd\mathbf{\Omega}$ elementel hacminde, nötron açısal yoğunluğunun zaman bağlı değişim hızını ($\frac{\partial n}{\partial t}$) etkileyen üç faktör bulunmakta olup Eş. 5.4’de belirtilmiştir [54].

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \{ \text{Nötron Üretim Hızı}(Q) \} - \{ \text{Nötron Sızıntı Hızı}(L) \} - \{ \text{Nötron Soğurulama/Saçılama Hızı}(R) \} \quad (5.4)$$



Şekil 5.4. $dVdEd\Omega$ elementel hacmi

Nötron üretim hızı, $dVdEd\Omega$ elementel hacminde, E' enerjisi ve Ω' yönünde gelen nötronların E enerjisi ve Ω yönünde saçıldıktan sonra üretilen saçılma kaynağı (Q_s), fisyon reaksiyonundan kaynaklanan nötron üretimi için fisyon kaynağı (Q_f) ve kendiliğinden fisyon reaksiyonları ve doğal radyoaktivite olaylarından meydana gelen bağımsız yabancı kaynak (S) olarak ifade edilmektedir. Nötron sızıntı hızı (L), $dVdEd\Omega$ elementel hacminin dA yüzeylerinden çıkan ve giren nötron açısal akıları arasındaki fark olarak ifade edilmektedir. Nötron soğurulması/saçılması hızı (R), $dVdEd\Omega$ elementel hacimde, nötronlar absorbe ve / veya E enerjisi ve Ω yönünde saçılabilirler. Bu durum, her üç ifade dikkate alınarak, klasik zamana bağlı diferansiyel-integral nötron taşıma denklemi Eş. 5.5'de belirtilmiştir.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \phi + \Sigma_t(r, E) \phi = \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} \Sigma_s(r, E') f(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E, \Omega, t) d\Omega' + \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} v \Sigma_f(r, E') \phi(r, E', \Omega', t) d\Omega' + S(r, E, \Omega, t) \quad (5.5)$$

Çalışma kapsamında ele alınan D-T füzyon reaksiyonunun ele alındığı füzyon reaksiyonunda, nötron üretim hızı teriminde herhangi bir fisil etki yer almaz, yalnızca füzyon reaksiyonunun bağlı saçılma ve nötron üretimi etkileri yer alır. Eş. 5.5, bu durumlar dikkate alınarak tekrar düzenlenir ise, Eş. 5.6 olarak ifade edilir.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \phi + \Sigma_t(r, E) \phi = \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} \Sigma_s(r, E') f(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E, \Omega, t) d\Omega' + \left\{ \frac{1}{4\pi} [\chi_{DT}(E) \langle \sigma v \rangle n_D(r, t) n_T(r, t)] \right\} \quad (5.6)$$

Eş. 5.6'da eşitliğin sağındaki ikinci terim olan D-T füzyon nötron kaynağı ifade edilmektedir. Buna göre, $\chi_{DT}(E)$ füzyon nötron spektrumunu, $\langle \sigma v \rangle$ parçacık hızının füzyon tesir kesiti ile çarpımını, n_D ve n_T sırasıyla döteryum ve trityum izotoplarının yoğunluklarını ifade etmekte olup, nötronlarının izotropik yayılması sebebiyle denklem 4π ile bölünmektedir [63].

6. METOD VE YÖNTEM

D-T füzyon reaksiyonu sonucu yüksek enerjiye sahip nötronlar plazma yapısında üretilmekte ve sonrasında manto yapısı (önce ilk duvar yapısı ve sonrasında blanket yapıları içerisinde) içerisinde nötron moderasyonu ile farklı enerji seviyelerinde nötronlar oluşmaktadır. Farklı enerji seviyelerindeki nötron oluşumu ile birlikte manto yapısındaki malzemelerde radyasyon hasarı meydana geldiğinden, bu yapı bileşenlerinin uygun radyasyon direncine sahip olması beklenir. İkinci olarak, bir tokamak sahip olduğu dairesel ve eğrisel karmaşık yüzeyler içerisinde, binlerce karmaşık boşluk, kanal ve farklı bileşimlere sahiptir. Bu durum, reaktör içerisinde yer alan bileşenlerdeki malzeme dağılımını da karmaşıktır. Farklı zenginleştirme miktarlarına sahip izotoplardan oluşan moleküllerden, mekanik özellikleri geliştirmek için ısı işlemlere maruz bırakılmış bileşenlere kadar farklı kompozisyonlarda malzemeler karmaşık geometrik yapı bileşenlerinde kullanılabilir. Bu durum, nötronik modelleme ve simülasyonda çeşitli zorluklara neden olabilir. Üçüncü olarak, füzyon reaktöründe kullanılan reaksiyonlar ve oluşan radyoaktif ürünler, insanlık ve çevre açısından riskler içermektedir [53].

Ele alınan ARC reaktörü plazması ile mıknatıs sistemleri arasında yer alan ilk duvar, vakum kabı, soğutucu tabaka, nötron çoğaltma tabakası ve zırh tabakalarında kullanılan malzemelerin trityum üretim oranına etkisi ve tabaka yüzeylerindeki nötron akıları OpenMC açık kaynak kodunda incelenmiştir.

6.1. Sayısal Hesaplama Yöntemi

2011 yılında MIT Hesaplamalı Reaktör Fizik Grubu üyeleri tarafından, Monte Carlo sayısal hesaplama yöntemi ile çalışan OpenMC açık kaynak kodu geliştirilmiş olup, 2012 Kasım ayında yayımlanmıştır. Nükleer reaktörlere ait yapıcı katı geometrilerde, nötronların çekirdekler ile tesir kesiti etkileşimlerinin istatistiksel bir yöntem ile modellenmesi ve sonuç olarak sabit kaynak, k-özdeğer ve kritik altı çarpışma hesaplamalarının yapılması sağlanmaktadır. Giriş/çıkış dosya verileri sırasıyla XML ve HDF5 formatında olup, betik bir dil olan Python kullanılmaktadır. Tesir kesiti bilgileri, ACE formatında ham ENDF/B verileri NJOY nükleer veri işleme sistemi kullanılarak kod içerisinde kullanıma uygun hale getirilmektedir [13, 66].

Monte Carlo sayısal hesaplama yöntemi, olasılık hesabına dayanan bir nötron transport tekniğidir. Fiziksel bir sistemi ifade eden olasılık yoğunluk fonksiyonlarından gelişigüzel seçilmiş sayılar ile fiziksel sistemde ele alınan değişkenin yaklaşık değişimlerinin olasılık ve istatistiksel teorilere dayanarak incelendiği sayısal bir yöntemdir. Hareket doğrultusundan bağımsız olarak rastgele hareket eden parçacıkların matematiksel olarak modellenebilmesi, istatistik biliminden yararlanılarak rastgele seçilen 0 ile 1 arasında düzgün dağılan binlik kesirli sayılar kullanılarak yapılabilmektedir [54, 64].

OpenMC kodunda, incelenecek fiziksel büyüklüklerin tahminlerini elde edebilmek için tali (çetele) sınıfları kullanılmaktadır. Taliler, faz uzayının bazı bölgelerindeki incelenecek fiziksel büyüklük puanlama fonksiyonu ile nötron açısız yoğunluğunun diferansiyellerinin toplamının tahminini sağlarlar. Eş. 6.1’de bir talinin genel ifadesi verilmiştir. Eş. 6.1’de r üç boyutlu uzayda konum vektörü, Ω bir kürenin yüzeyleri ile ilişkisini belirten 2 boyutlu yön vektörü, E enerji boyutu, $f(r, \Omega, E)$ incelenecek fiziksel büyüklüğün puanlama fonksiyonu ve Ψ nötron açısız yoğunluğu olarak ifade edilir. Buna göre, $\int dr \int d\Omega \int dE$ ifadesi incelenecek f fonksiyonunun faz uzayındaki bölgeleri olup bu “filtre” olarak tanımlanmaktadır. OpenMC kodunda talileri tanımlamak için belirli bir hücredeki incelenecek fiziksel olayın filterleri kullanılır. Örneğin, “openmc.CellFilter” ya da “openmc.EnergyFilter” bunlardan bazılarıdır. OpenMC’de f fonksiyonu akı, toplam reaksiyon hızı, saçılma reaksiyon hızı, saçılma nötron üretimi, absorpsiyon reaksiyon hızı, fisyon reaksiyon hızı, vb. olabilirken; filtre olarak malzeme çeşitleri, yakıt çeşitleri, çarpıma öncesi enerji, çarpışma sonrası enerji, vb. olabilmektedir [65].

$$X = \int dr \int d\Omega \int dE f(r, \Omega, E) \Psi(r, \Omega, E) \quad (6.1)$$

Yapılan çalışmada, trityum üretim oranı puanlama fonksiyonunu, soğutma kanalları, nötron çoğaltma tabakası ve trityum üretim tabakası hücrelerinde incelemek için hücre filtreleri oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, trityum üretiminin seçilen eriyik tuzların içindeki izotoplardan ne kadar sağlandığı ile ilgili ayrı bir nüklid filtresi oluşturulmuştur. Benzer şekilde, vakum kabı iç yüzeyi, vakum kabı dış yüzeyi ve trityum üretim tabakası üzerindeki nötron tayfını hücrelerinde incelemek için enerji filtreleri kullanılmıştır.

Nötron kaynağı silindirin merkezi ekseninde yüksekliği, genişliği ve derinliği 100 cm’ye ayarlanmış ve 14.1 MeV izotropik nötron yayan, kaynak yoğunluğu $9e+18$ n/s olan

homojen bir kaynak kutusu olarak modellenmiştir. Seçilen kod dizini 100000 parçacığı, 30 grupta çalıştırmıştır [15].

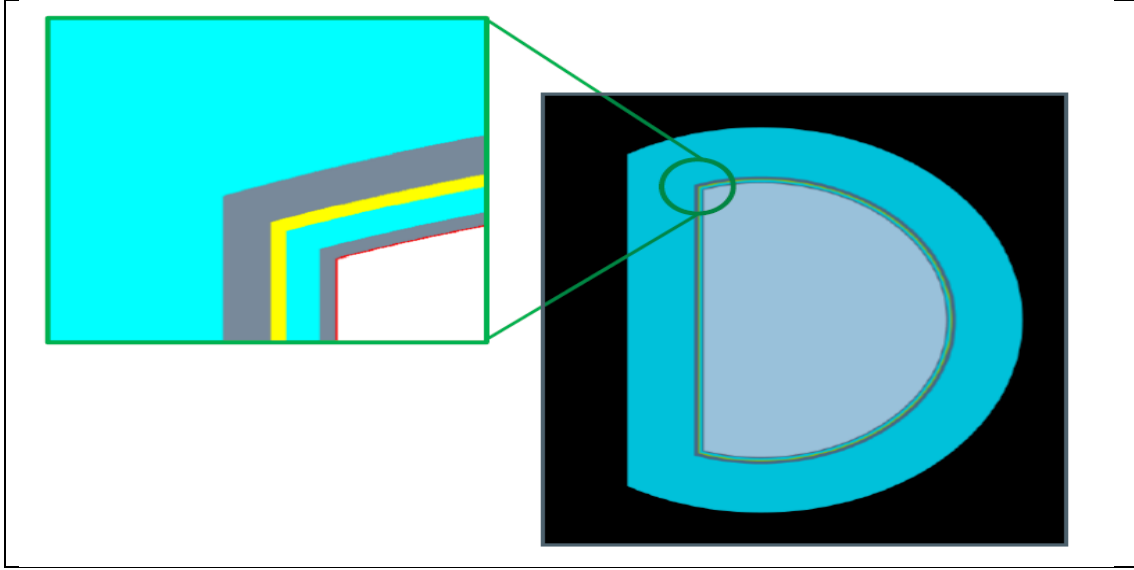
6.2. Problem Geometrisi ve Malzeme Seçimi

Ele alınan ARC reaktörü içerisinde yer alan tabakalar, kalınlıkları ve kullanılan malzemeler Çizelge 6.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 6.1. ARC reaktörü tabakalarının malzemeler

Malzeme adı	Tabaka adı	Tabaka kalınlığı (cm)
Tungsten	İlk duvar	0,1
SiC kompozit / V4Cr4Ti alaşımı	Vakum kabı iç yüzeyi (STR1)	1
FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, FLiNaRb	Soğutma kanalları	2
Berilyum	Nötron çoğaltma tabakası	1
SiC kompozit / V4Cr4Ti alaşımı	Vakum kabı dış yüzeyi (STR2)	3
FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, FLiNaRb	Tritiyum üretim tabakası	50
WB ₄	Zırh tabakası	20

Şekil 6.1’de göre, beyaz renk plazma bölgesini, kırmızı renk ilk duvar tabakasını, gri renk vakum kabını, sarı renk nötron çoğaltma tabakasını, mavi renk ise soğutma kanalları ve tritiyum üretim tabakasını ifade etmektedir. Kolay bir şekilde simülasyonları gerçekleştirebilmek için 2 boyutlu D şeklinde benzetim yapılarak TBR ve nötron akım yoğunluğu değerleri hesaplanmaktadır. Silindirin iç yarıçapı 139,9 cm ve yüksekliği 100 cm olarak alınmıştır. Plazma hacminin tutulmasına izin verdiği ve reaktörün aynı birinci duvar yüzeyini temsil ettiği için iç yarıçap için bu değer kullanılması seçilmiştir. Nötron simülasyonunda sorun yaratacağı için içeride boşluk bırakılmadı, bu nedenle içine aşırı derecede seyreltilmiş hidrojen yerleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Plazma ve tabakaların D şeklindeki modelde gösterimi

Soğutma kanalı ve trityum üretim bölgesinde kullanılan eriyik tuzlarda yüksek trityum üretme kapasitesine sahip, hava ve su ile aşırı kimyasal tepkimler veren bir alkali metal olan lityum (Li) elementi bulunur. Lityumun söz konusu reaktifliğini dengelemek için lityum LiF tuzu olarak kullanıma sunulur. LiF tuzu içerisinde lityum içeriğinin fiziksel yoğunluğu düşük olup, flor (F) önemli bir soğurma tesir-kesitine sahiptir. Ayrıca, LiF tuzunun erime noktası yüksek olup (848 °C) BeF₂ bileşiği ile kullanıldığında erime noktasında düşme gözlemlenir. BeF₂'nin nötron çoğaltma özelliği de LiF tuzu ile kullanılmasında önem arz etmektedir. FLiBe tuzu, LiF ve BeF₂ bileşiklerinin farklı konsantrasyonların bir araya gelmesi ile oluşan ve füzyon reaktörlerin sıkça tercih edilen bir eriyik tuz çeşididir. FLiBe eriyik tuzuna ek olarak, düşük erime sıcaklığı ve düşük buhar basıncı nedeniyle FLiNaBe eriyik tuzu da kullanılmaktadır. Yüksek ısı iletim kapasitesi, korozyon direnci ve düşük erime noktalarına sahip oldukları için FLiNaK ve FLiNaRb eriyik tuzları da araştırma konusu olmuşlardır [44, 45, 70].

Inconel-718 alaşımı yüksek sıcaklıklarda kimyasal direncinin yüksek olması ve iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle vakum kabı malzemesi olarak tercih edilmektedir. Vanadyum içeriği yüksek (%91,988) V4Cr4Ti alaşımı düşük radyasyon aktivasyonuna sahip olması, nötron moderasyonu özelliğinin iyi olması, radyasyon hasarına karşı etkili olması, yüksek duvar yükü kapasitesine sahip olması nedeniyle vakum kabı malzemesi olarak tercih edilmektedir [18, 19, 42]. V4Cr4Ti alaşımı, (n,2n) nötron çoğaltma reaksiyonları için kullanılan ve TBR miktarının artırılması için gerekli katı

berilyum katmanı çıkarılarak tasarlanan modellemelerde de kullanılabilir [19]. Tüm bunların yanı sıra, yüksek ısı iletimine sahip olması nedeniyle, vakum kabı içerisinde bulunan soğutucu kanal malzemesi olarak da vanadyum alaşımları kullanılmaktadır [30]. Vanadyum alaşımlarına benzer şekilde, SiC kompozit malzemesi de eriyik tuzların taşındığı ısı eşanjörü malzemesi olarak tercih edilmektedir [9].

Vakum kabı malzemesi olarak yer alan V4Cr4Ti alaşımının fiziksel yoğunluğu $6,05 \text{ g/cm}^3$, SiC kompozit malzemesinin fiziksel yoğunluğu $3,2 \text{ g/cm}^3$ olarak literatürde yer almakta olup, atom ağırlığı yüzdeleri Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de belirtilmiştir. Çizelge 6.4'de kullanılan farklı eriyik tuzların, Çizelge 6.5'de ilk duvar bölgesinde kullanılan tungsten (W184), nötron çoğaltma bölgesinde kullanılan berilyumun ve zırh bölgesinde kullanılan tungsten boritin (WB₄) özellikleri verilmiştir [27, 40].

Çizelge 6.2. V4-Cr4-Ti alaşımının atom ağırlığı % [27, 40]

Malzeme	Vanadyum (V)	Krom (Cr)	Titanyum (Ti)	Nikel (Ni)	Demir (Fe)
V4-Cr4-Ti (NH ₂)	91,988	4,02	3,98	0,007	0,0049

Çizelge 6.3. SiC kompozitinin atom ağırlığı % [27, 40]

Malzeme	Silisyum (Si)	Karbon (C)	Oksijen (O)
SiC kompozit	65,75	30,10	4,043

Çizelge 6.4. Eriyik tuz çözeltilerinin malzeme özellikleri [36]

Malzeme	Atom Ağırlığı (%)	Fiziksel yoğunluk [g/cm^3]	Erime Noktası Sıcaklığı (K)
FLiBe	%50 2LiF, %50 BeF ₂	1,94	733
FLiNaK	% 46,5 LiF, %11,5 NaF, %42 KF	2,02	727
FLiNaBe	%31 LiF, %31 NaF, %38 BeF ₂	2,03	588
FLiNaRb	%33 LiF, %33NaF, %33 RbF	2,69	708

Çizelge 6.5. W184, Be ve WB₄ malzemelerinin fiziksel özellikleri [15, 66]

Malzeme	Kullanılan bölge	Fiziksel yoğunluk [g/cm ³]	Erime Noktası Sıcaklığı (K)
W-184	İlk duvar tabakası	19,25	3695
Be	Nötron çoğaltma tabakası	1,848	1551
WB ₄	Zırh bölgesi	8,23	-

7. SAYISAL SONUÇLAR

2 farklı vakum kabı malzemesi (SiC kompozit ve V4Cr4Ti alaşımı), 4 farklı eriyik tuz çeşidi (FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, FLiNaRb) ve doğal Li ile 3 farklı Li-6 zenginleştirme oranlarında (%30, %60, %90) oluşturulan 32 farklı modelin nötronik analizi yapılmıştır. Ayrıca, $TBR \geq 1,05$ şartını sağlayan eriyik tuzlar için toksit etkisi bulunan berilyum elementi kullanmadan nötron çoğaltma tabakasını tasarımdan çıkararak, reaktörün trityum üretiminin sürdürülebilirliği 12 model için incelenmiştir. Bunun için, nötron çoğaltma bölgesi çıkarılan tasarımlarda, vakum kabı içerisindeki soğutma kanalı kalınlığı 2 cm'den 3 cm'e çıkarılarak, TBR değerleri değerlendirilmiştir [6,7,34]. Nötron çoğaltma tabakası çıkarılan eriyik tuz modelleri, eriyik tuzun sonuna NÇB_yok eki getirilerek, FLiBe_NÇB_yok ve FLiNaBe_NÇB_yok olarak isimlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında, ele alınan ARC reaktörü geometrisindeki tüm modeller içerisinde $TBR \geq 1,05$ değeri için, vakum kabı iç (STR1) ve dış yüzeyleri (STR2) ile trityum üretim tabakası üzerindeki nötron akılarının enerji seviyelerine göre değişimi incelenmiştir.

7.1. Trityum Üretim Oranı (TBR)

D-T füzyon reaksiyonlarında, reaktörün dışarıdan trityum beslemesine gerek kalmadan çalışma sürekliliğinin sağlanabilmesi için, reaksiyondan çıkan her bir nötronun birden fazla trityum üretimini sağlaması gerekir. Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'de belirtildiği üzere, nötron ile lityum izotoplarının birbirleri ile etkileşimi sonucunda trityum üretimi elde edilir. Bu sebeple, reaktör tabakalarında üretilen trityum miktarının, plazmada tüketilen trityum miktarından büyük olması gereğinin yanı sıra, ARC reaktöründe $TBR \geq 1,1$ olması durumunda reaktörün verimli bir şekilde çalışabileceği öngörülmüştür. Eş. 7.1'de birimsiz olan trityum üretim oranı değeri belirtilmiştir [8].

$$TBR = \frac{\text{Reaktör tabakalarında üretilen trityum miktarı}}{\text{Plazmada tüketilen trityum miktarı}} \quad (7.1)$$

Nötron çoğaltma tabakasında yer alan berilyum, eser miktarda uranyum ve diğer ağır nüklidler içerdiğinden canlı hayat açısından tehlike arz eder. Bu sebeple, nötron

çoğaltımının sağlanmasında berilyum dışında farklı malzemelerin kullanımı ya da nötron çoğaltım tabakasının çıkarılması ile ilgili literatürde çalışmalar bulunmaktadır [6].

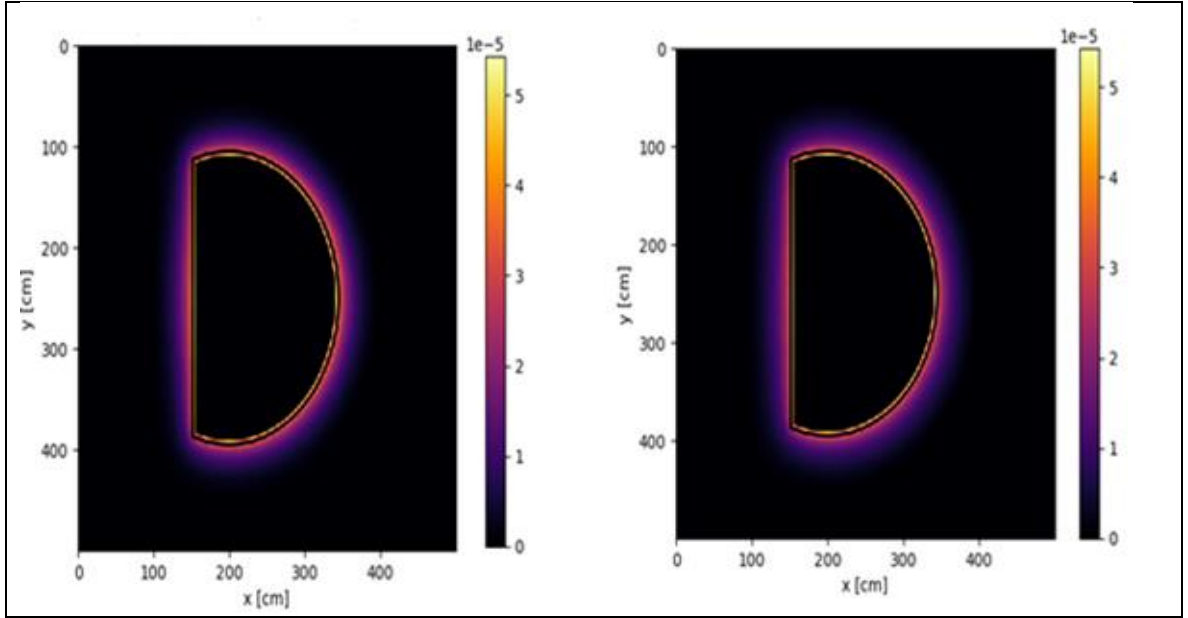
Yapılan çalışmada ele alınan toplam 44 model için, toplam trityum üretim oranı (TBR) değerlerinin eriyik tuzların içerisindeki izotopların (Li-6, Li-7, Be-9, F-19, Na-23, K-39, K-41, Rb-87 ve RB-85) izotopik bolluklarına ve Li-6 zenginleştirme oranına göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca, trityum üretimine katkı sağlayacak tabakaların (soğutucu kanal tabakası, nötron çoğaltma tabakası ve trityum üretim tabakası) performansları da irdelenmiştir. Li-6 izotopunun doğal izotop bolluk oranı %7,59 olup %30, %60 ve %90 zenginleştirme oranları çalışma kapsamında ele alınmıştır. ARC reaktörü halen geliştirilme aşamasında olan bir tasarım olduğundan, ileriki dönemlerde kullanılacak reaktör yapı malzemesi adaylarını öngörebilmek için çalışma kapsamında TBR limiti 1,1 yerine 1,05 alınmıştır. $TBR \geq 1,05$ şartı, SiC vakum kabı malzemesi için FLiBe eriyik tuzu için gerçekleşirken; V4Cr4Ti vakum kabı malzemesi için FLiBe, FLiNaBe, FLiNBe_NÇB_yok ve FLiNaBe_NÇB_yok eriyik tuzlarının bazı modellerinin için gerçekleşmiştir. Söz konusu modellere ait toplam TBR değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Modellerin toplam TBR değerleri

Model No	Vakum Kabı Malzemesi	Li6 Zenginleştirme %	Eriyik Tuz Çeşitleri	Toplam TBR
1	SiC KOMPOZİT	Doğal Li	FLiBe	1,048
2		30		1,063
3		60		1,044
4		90		1,021
5		Doğal Li	FLiNaK	0,591
6		30		0,591
7		60		0,707
8		90		0,716
9		Doğal Li	FLiNaBe	0,913
10		30		0,952
11		60		0,959
12		90		0,954
13		Doğal Li	FLiNaRb	0,51
14		30		0,683
15		60		0,779
16		90		0,824
17		Doğal Li	FLiBe_NÇB_yok	0,97
18		30		0,983
19		60		0,961
20		90		0,933
21	V4Cr4Ti VANADYUM ALAŞIMI	Doğal Li	FLiBe	1,185
22		30		1,249
23		60		1,25
24		90		1,236
25		Doğal Li	FLiNaK	0,875
26		30		0,867
27		60		0,923
28		90		0,945
29		Doğal Li	FLiNaBe	1,013
30		30		1,125
31		60		1,153
32		90		1,162
33		Doğal Li	FLiNaRb	0,56
34		30		0,811
35		60		0,942
36		90		1,008
37		Doğal Li	FLiBe_NÇB_yok	1,133
38		30		1,188
39		60		1,183
40		90		1,164
41		Doğal Li	FLiNaBe_ NÇB_yok	0,966
42		30		1,06
43		60		1,085
44		90		1,089

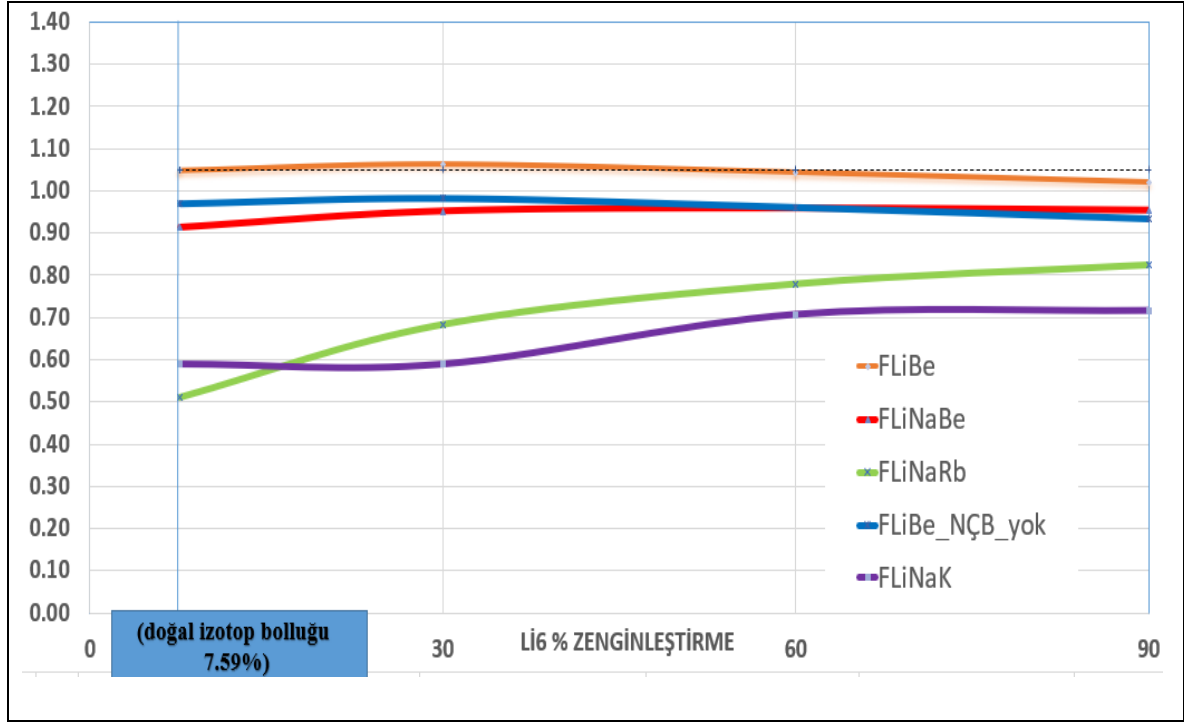
7.1.1. SiC vakum kabı malzemesi

SiC vakum kabı malzemesinin kullanıldığı modellerde yalnızca FLiBe eriyik tuzu için TBR değeri 1'den büyük çıkmıştır. Bu modeller için nötron çoğaltma tabakası çıkarılarak tekrar TBR değeri hesaplanmış ve yine 1 değerinin altında kalmıştır. Model 17, 18, 19 ve 20'de bu durum görülmektedir. SiC malzemesinin kullanıldığı modeller arasında en yüksek TBR değeri, Model 2'de ve en düşük TBR değeri Model 12'de elde edilmiştir. D şekilli ARC geometrisinde, Model 2 ve Model 12'ye ait ortalama trityum üretim değerinin dağılımı Şekil 7.1'de görülmektedir.



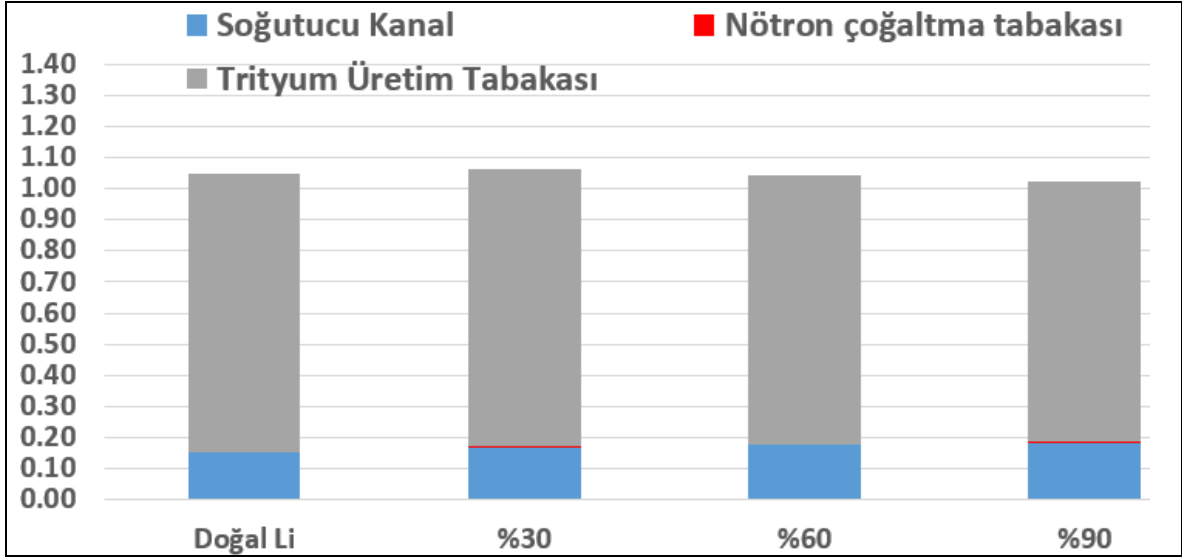
Şekil 7.1. Model 2 (sol) ve Model 12 (sağ)'ye ait ortalama trityum üretim değerinin dağılımı

Şekil 7.2'de SiC kompozit malzemesi ile eriyik tuz çeşitlerinin kullanıldığı modellerin Li-6 zenginleştirme oranına bağlı TBR değerlerindeki değişimi görülmektedir. ARC reaktörünün trityum sürekliliğinin sağlanması açısından kritik olan TBR=1,1 değerini SiC malzemesinin kullanıldığı hiçbir model sağlayamamıştır.

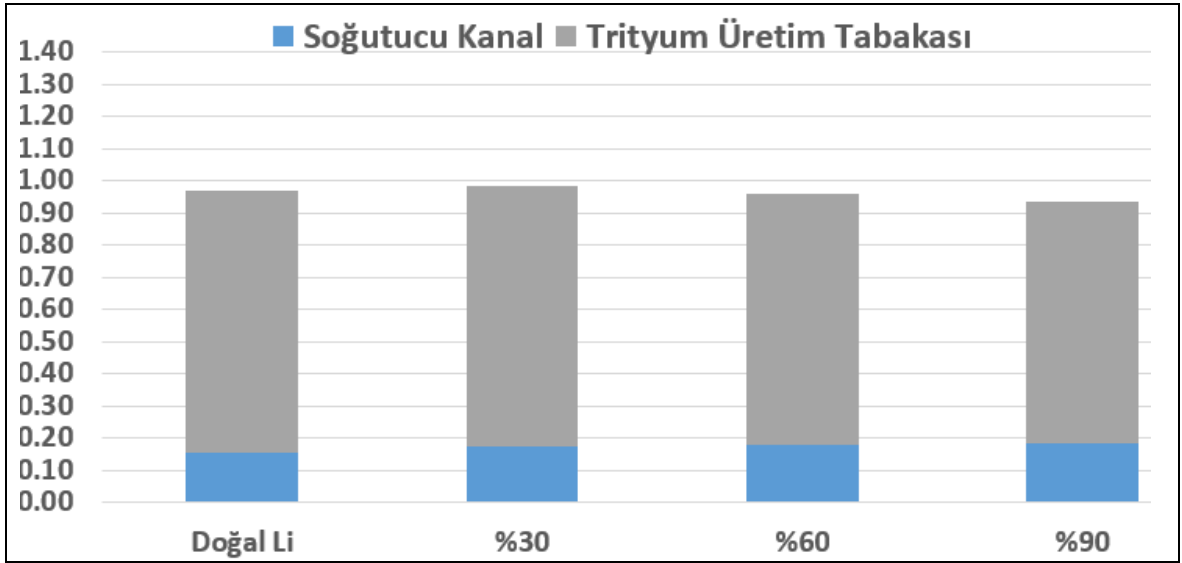


Şekil 7.2. SiC vakum kabı malzemesi kullanılarak oluşturulan modellerdeki eriyik tuzların farklı Li-6 zenginleştirme oranlarına göre TBR değerlerinin değişimi

Farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan trityum oluşumunda reaktör içerisindeki hangi bölgenin ne kadar performans gösterdiği Şekil 7.3’de belirtilmektedir. Farklı zenginleştirme oranları için trityum üretiminde en yüksek performansı trityum üretim tabakası göstermektedir. Moderasyona uğrayan nötronlar, 50 cm kalınlığındaki bölge içerisinde daha fazla trityum üretimine neden olmaktadır. Li-6 zenginleştirme oranındaki artışın, bölgelerin TBR performansında ciddi bir etki yapmadığı ve soğutucu kanalın toplam TBR değerinin yaklaşık olarak %15-%18’inden sorumlu olduğu görülmektedir.



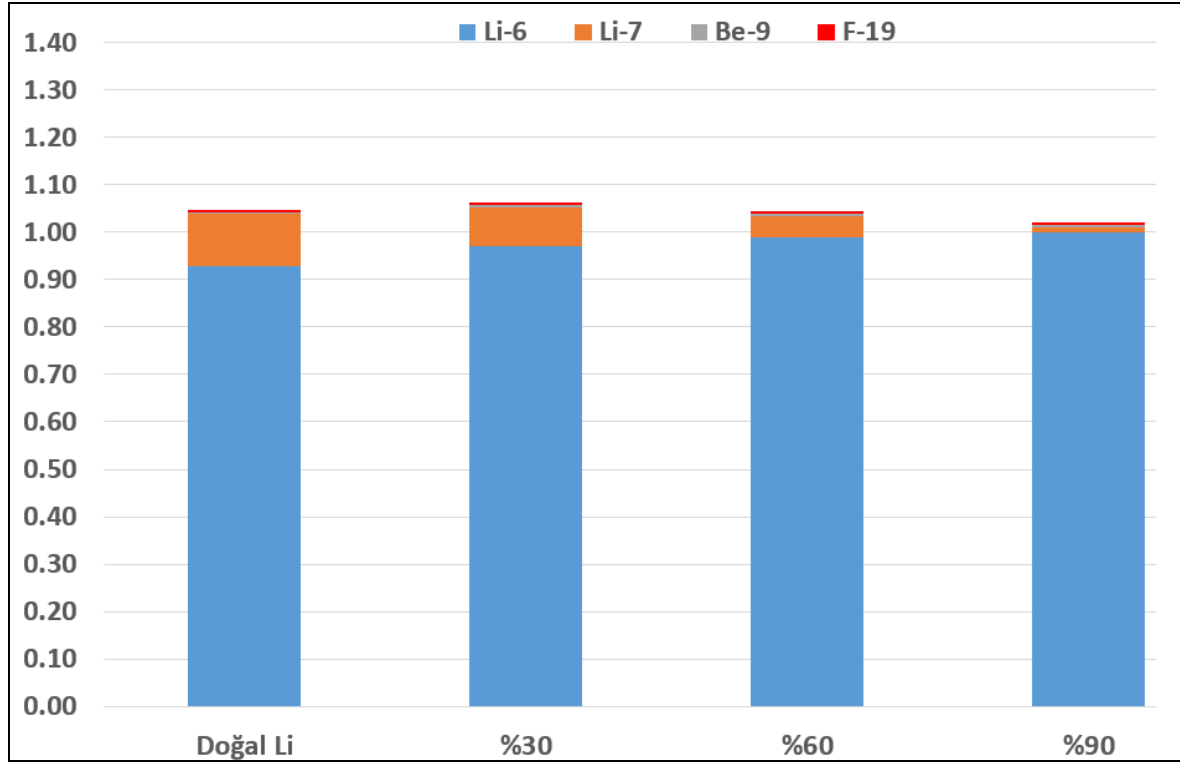
Şekil 7.3. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı



Şekil 7.4. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı

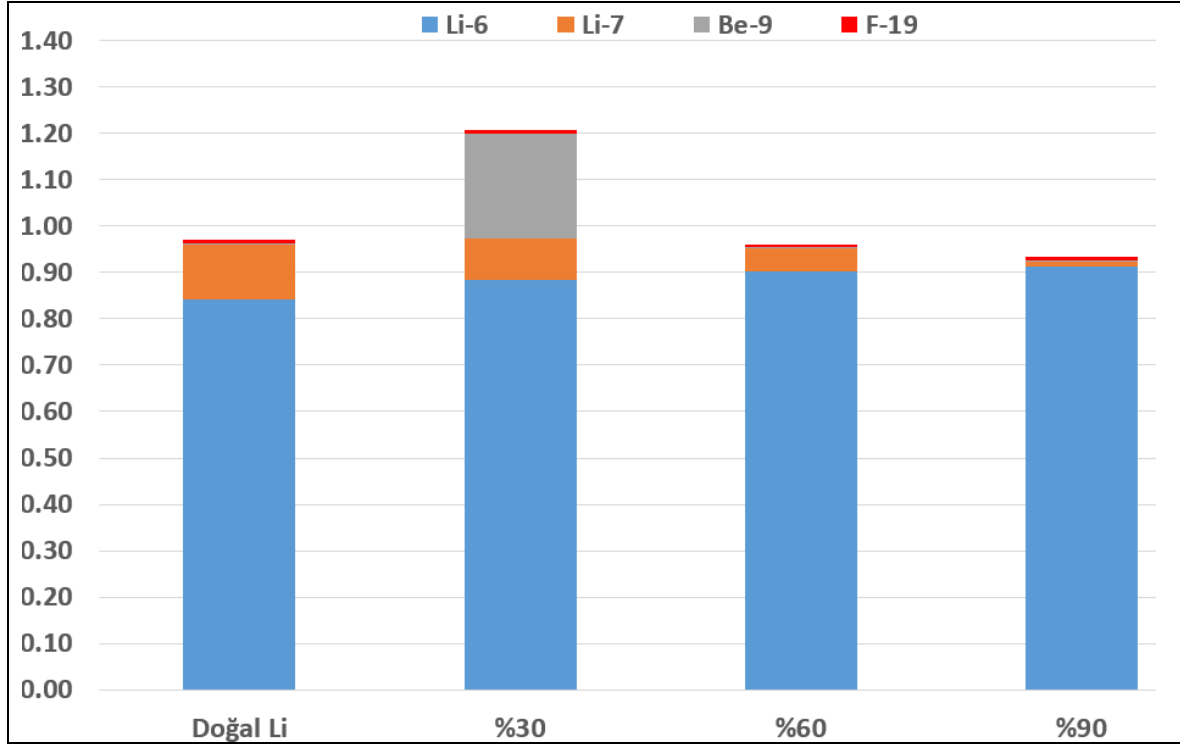
Şekil 7.4'de, Şekil 7.2'ten farklı olarak nötron çoğaltma tabakası çıkarılmış FLiBe eriyik tuzunun bulunduğu bölgelerin TBR performansı belirtilmektedir. Vakum kabının iç ve dış yüzeyleri arasındaki bölge tamamen soğutucu kanala ayrıldığından, TBR üretiminde soğutucu kanalın payı Şekil 7.3'e göre az miktarda artmıştır. Şekil 7.4'de görülen nötron çoğaltma tabakası çıkarılan farklı Li-6 izotopik bolluk oranlarından oluşan modellerde, $(n, 2n)$ reaksiyonun eksikliğinden dolayı, değerler 1'in altına düşmüştür. Zenginleştirme

oranlarındaki değişim, tabakaların TBR performansında ve toplam TBR değerinde ciddi bir değişim oluşturamamıştır.



Şekil 7.5. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları

Şekil 7.5’de farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki izotopların TBR oluşumuna katkısı irdelenmiştir. FLiBe içerisinde trityum üretimine en büyük katkıyı Li-6 izotopu vermektedir. Şekil 4.2’de de belirtildiği üzere, bu izotop geniş bir enerji aralığında nötronlar ile etkileşime girmekte olduğundan, etkileşime girme olasılığı diğer izotoplara göre daha fazladır. FLiBe içerisinde trityum üretiminde nötronlar ile etkileşimi sağlayacak izotopların Li-6 ve Li-7 olduğu, Be-9 ve F-19’un etkinliğinin az olduğu görülmektedir. Li-6’nın izotop bolluğu arttıkça TBR retimindeki payı da diğer izotoplara göre artmaktadır.

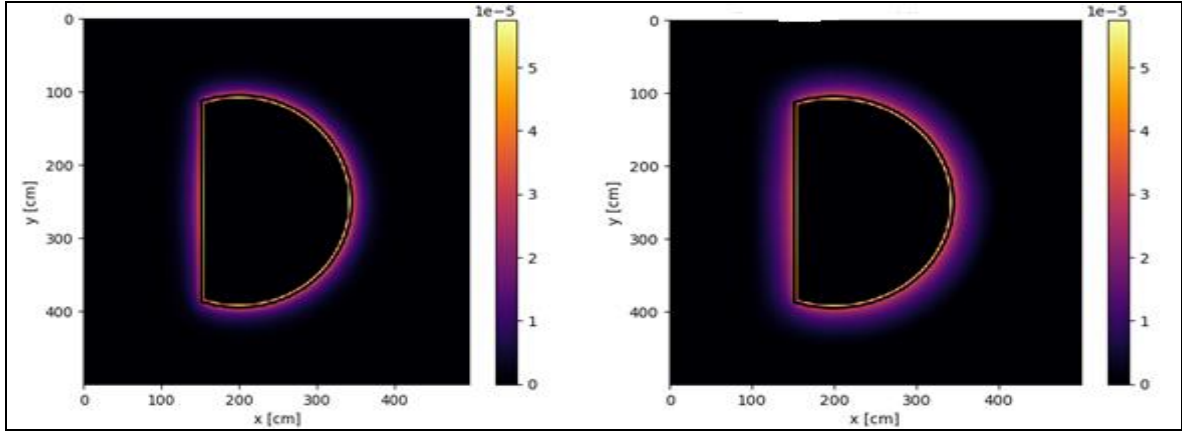


Şekil 7.6. SiC malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzu içerisindeki Li6, Li7, Be9 ve F19 izotoplarının TBR değerine yüzde katkıları

Şekil 7.6'da Şekil 7.5'den farklı olarak, nötron çoğaltma tabakası çıkarılmış FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki izotopların TBR katkısı irdelenmektedir. Şekil 7.5'den farklı olarak, %30 Li-6 zenginleştirmesinde Be-9 izotopun TBR katkısı %20'lere yaklaşmıştır. Nötron çoğaltma tabakasının tamamen çıkarılarak soğutucu kanal tabakasının kalınlığının artırıldığı bu durumda Be-9 elementinin (n,2n) nötron çoğaltma tesir kesitinin yüksek olması, %30 Li-6 zenginleştirmesinde olumlu sonuç vermiştir.

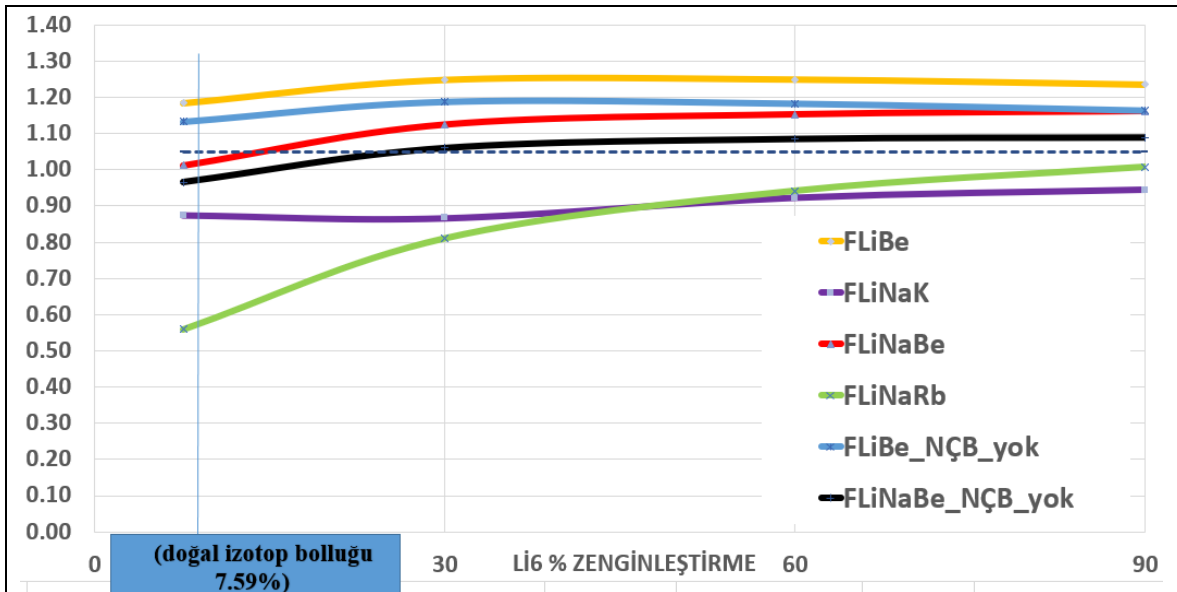
7.1.2. V4Cr4Ti vakum kabı malzemesi

Vanadyum alaşımının FLiBe ve FLiNaBe eriyik tuzları ile kullanıldığı modellerde TBR değeri 1'den büyük çıkmıştır. Bu eriyik tuzların, nötron çoğaltma tabakası kullanılmayan modellerinde de TBR değeri 1'den büyük çıkmıştır. ARC reaktörünün trityum üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için gerekli olan TBR=1,1 değeri FLiBe ve Li-6 zenginleştirmesi yapılan FLiNaBe modellerinde yakalanmıştır. Vanadyum alaşımının kullanıldığı modeller arasında en yüksek TBR değeri Model 23'de, en düşük TBR değeri ise Model 33'de elde edilmiş olup Şekil 7.7'de D şekilli ARC geometrisinde ortalama trityum üretim değerinin dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 7.7. Model 23 (sol) ve Model 33 (sağ)'ye ait ortalama trityum üretim değerinin dağılımı

Şekil 7.8'de vanadyum alaşımından imal edilen vakum kabı ile farklı eriyik tuz çeşitlerinden oluşan modellerin Li-6 zenginleştirme oranına bağlı TBR değerlerindeki değişimi görülmektedir. TBR $\geq 1,05$ değerini sağlayan farklı eriyik tuz modellerinde, özellikle %30 zenginleştirme oranından sonra TBR değerlerindeki değişim miktarının gittikçe azaldığı ve sabit bir değer almaya başladığı görülmektedir.

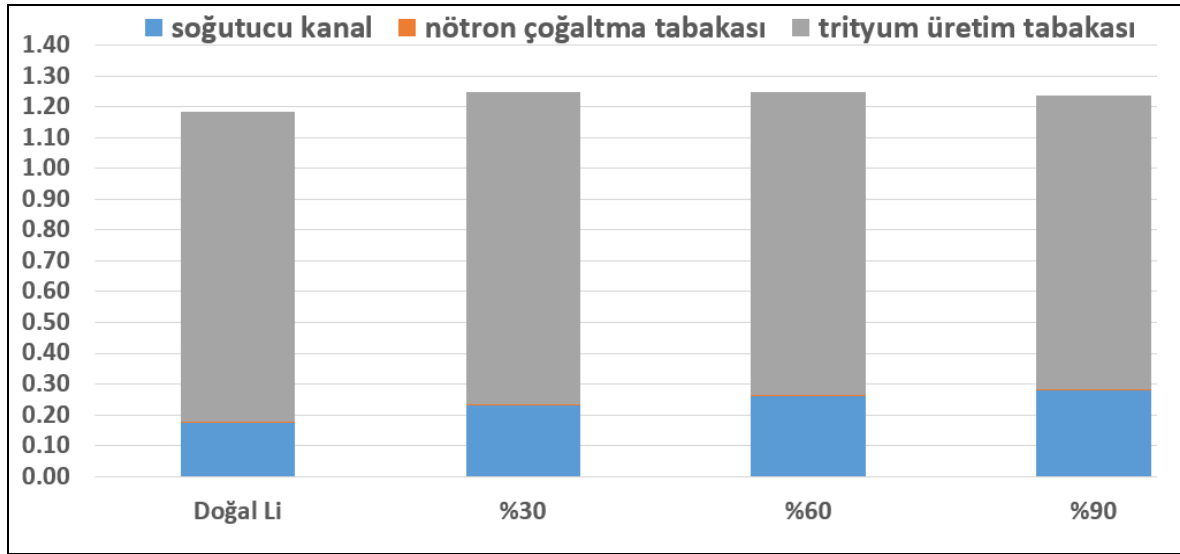


Şekil 7.8. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesi kullanılarak oluşturulan modellerdeki eriyik tuzların farklı Li-6 zenginleştirme oranlarına göre TBR değerlerinin değişimi

Şekil 7.8 incelendiğinde, FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerde 1,1 TBR değeri sağlanmasının yanı sıra, bu modellerde nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığında da ARC reaktörü için trityum üretim sürekliliğinin sağlanacağı ortaya çıkmıştır. Söz konusu bu

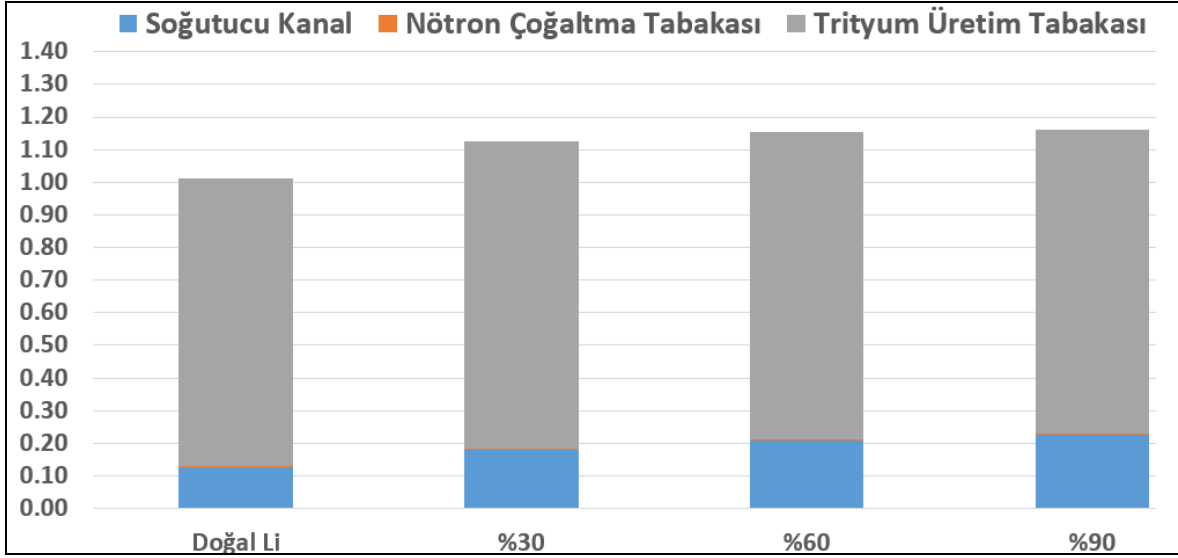
durum, FLiNaBe eriyik tuzundan oluşan modeller için %30 ve üzerindeki Li-6 zenginleştirilmesi oranlarından sonra yakalanabilmiştir.

Şekil 7.9'da FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki bölgelerin trityum üretimine katkısı incelenmiştir. Li-6 zenginleştirilmesi yapılmaya başlandıktan sonra trityum üretim tabakasının TBR katkısının yüzde olarak sabit hale geldiği görülmektedir. TBR üretiminin büyük çoğunluğu trityum üretim tabakası (blanket) tarafından sağlanmaktadır.

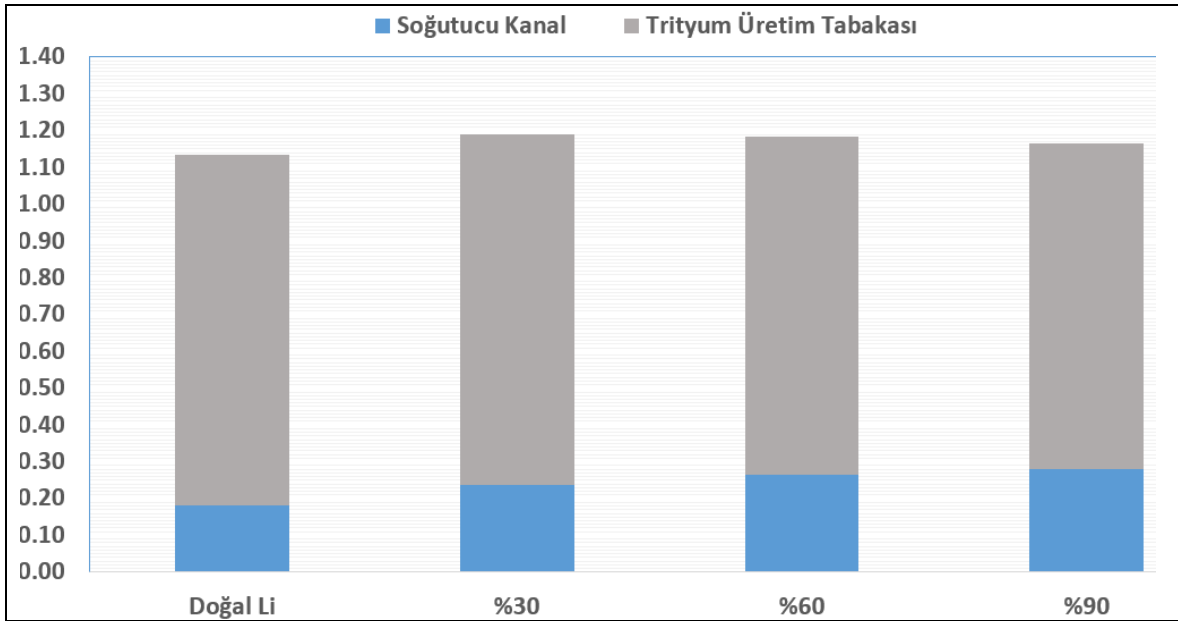


Şekil 7.9. Vanadyum alaşımı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı

Şekil 7.10'da FLiNaBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki bölgelerin trityum üretimine katkısı görülmektedir. Soğutucu kanal, nötron çoğaltma ve trityum üretim tabakalarının farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki TBR performansları FLiBe eriyik tuzunun kullanıldığı modeller ile benzerlik göstermektedir. Çizelge 7.1'den de anlaşılacağı üzere, FLiBe eriyik tuzunun TBR performansı FLiNaBe eriyik tuzundan fazladır. Bu durum, trityum üretiminde reaktör içerisindeki bölgelerin performansına da yansımıştır.



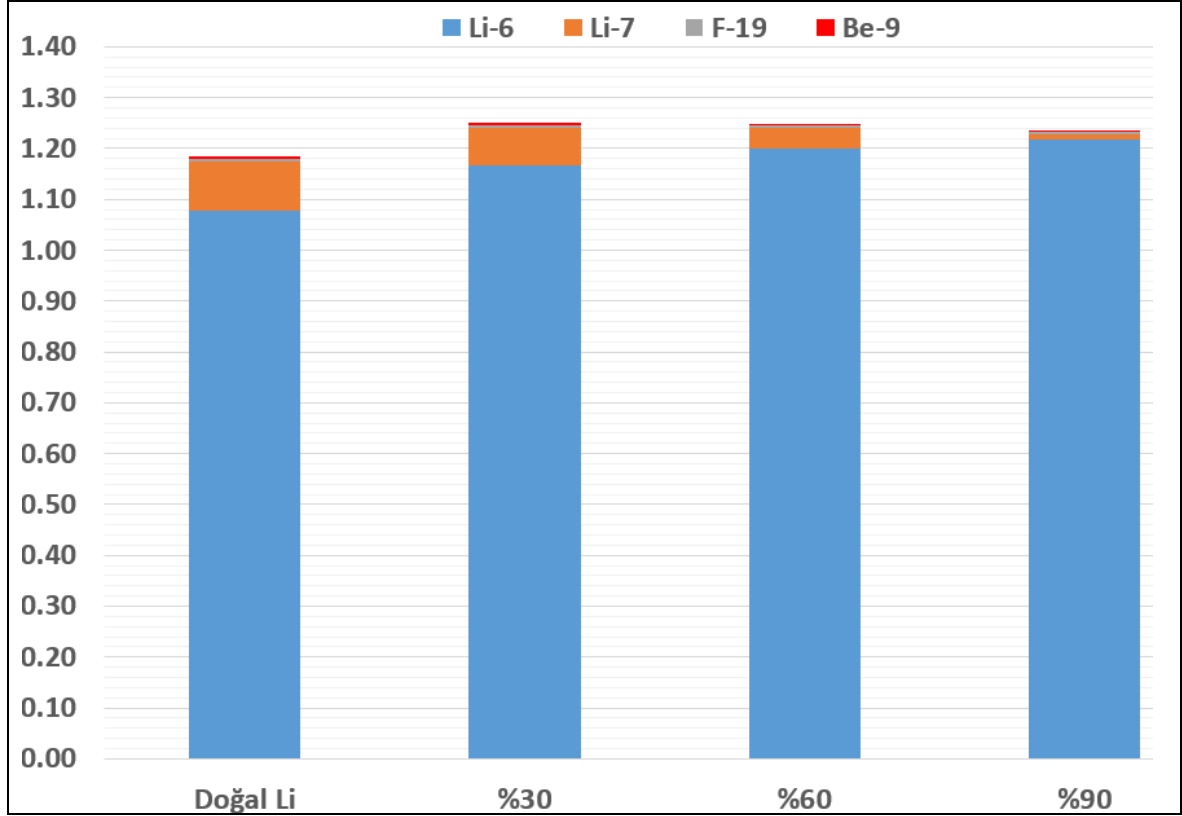
Şekil 7.10. Vanadyum alaşımı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiNaBe eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı



Şekil 7.11. Vanadyum alaşımı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerde bölgelerin TBR performansı

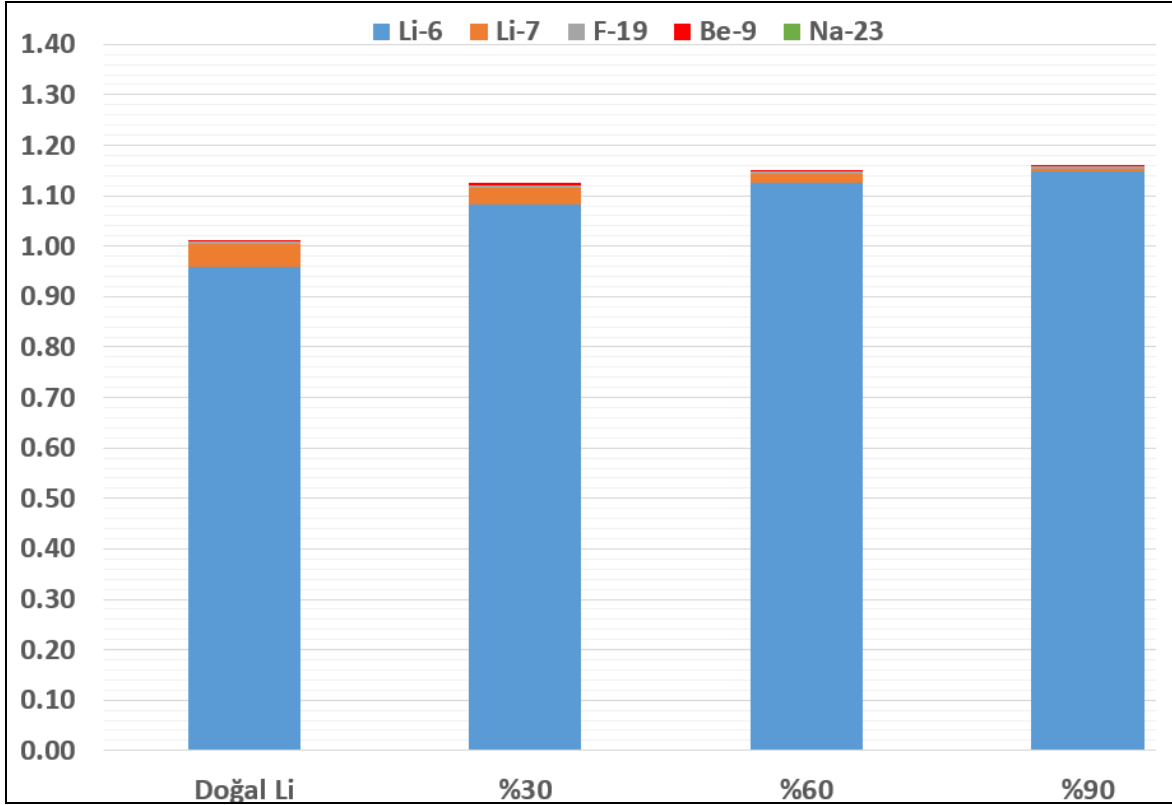
Şekil 7.11’de, Şekil 7.9’den farklı olarak, nötron çoğaltma tabakası çıkarılmış FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki izotopların TBR katkısı irdelenmektedir. TBR değeri, nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığı için azalmasına rağmen, FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerde, ARC reaktörü için gerekli olan trityum üretim sürekliliğinin sağlandığı görülmektedir.

Şekil 7.12’de FLiBe ve Şekil 7.13’de FLiNaBe eriyik tuzlarından oluşan modellerdeki izotopların trityum üretimine etkileri belirtilmiştir. Son olarak, Şekil 7.14’de FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerde berilyum tabakası çıkarıldığından, izotopların TBR performansının farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki değişimi belirtilmiştir. Nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığında TBR değerinin düştüğü görülmektedir.

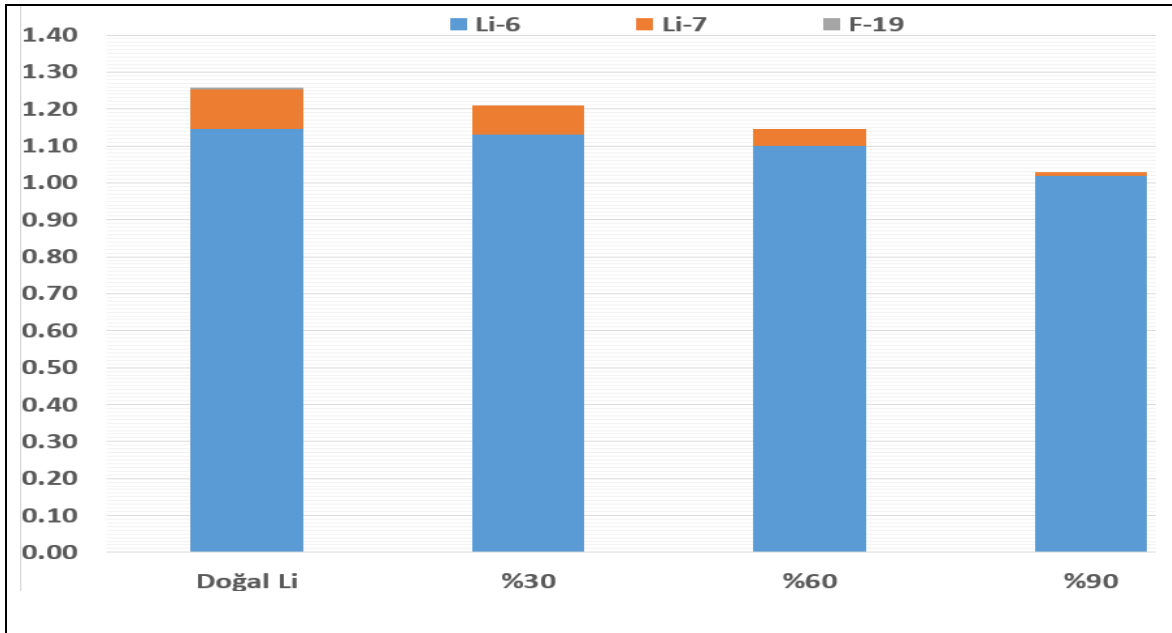


Şekil 7.12. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları

Şekil 7.14’de nötron çoğaltma tabakası çıkarılan FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerde zenginleştirme yapılmadan kullanılan eriyik tuzun TBR değeri, zenginleştirme oranı arttıkça azalma göstermektedir.

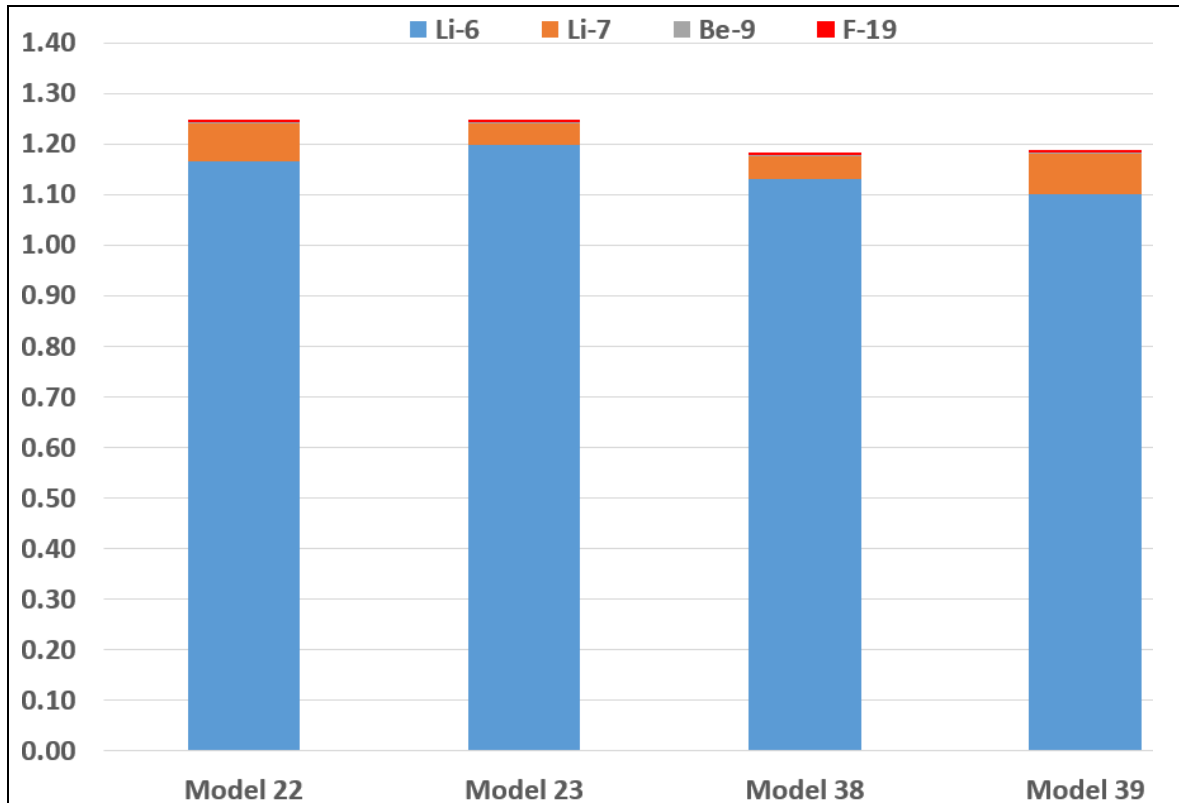


Şekil 7.13. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiNaBe eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları



Şekil 7.14. Vanadyum alaşımı vakum kabı malzemesinin kullanıldığı farklı Li-6 zenginleştirme oranlarındaki FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzundan oluşan modellerdeki Li-6, Li-7, Be-9 ve F-19 izotoplarının TBR değerine katkıları

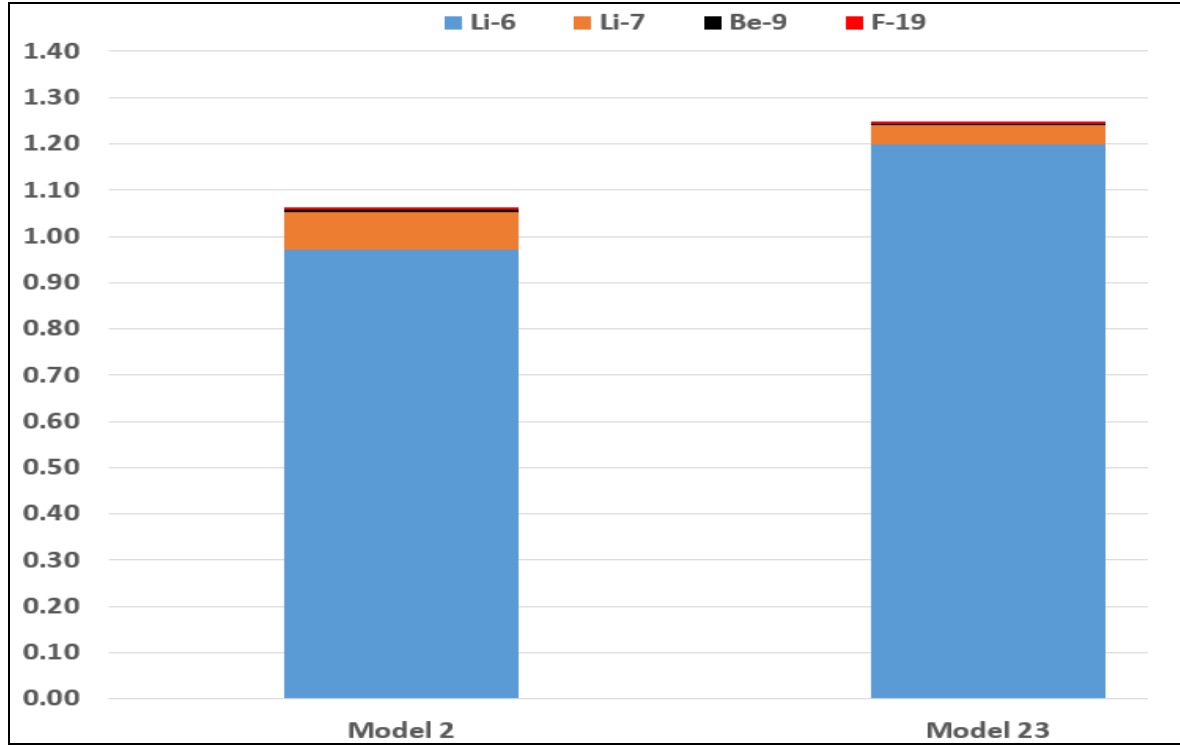
Çizelge 7.1'e göre, nötron çoğaltma tabakası bulunan 32 model içerisinde en yüksek TBR değerine sahip iki model bulunmaktadır. V4Cr4Ti vakum kabı malzemesinin kullanıldığı %30 Li-6 zenginleştirilmesi yapılan FLiBe eriyik tuzunda (Model 22) TBR=1,249; yine aynı vakum kabı malzemesinde %60 Li-6 zenginleştirmesinin yapıldığı FLiBe eriyik tuzunda (Model 23) TBR= 1,25 elde edilmiştir. Her iki modelden de nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığında sırasıyla Model 38'de TBR = 1,188 ve Model 39'da TBR= 1,183 elde edilmiştir. Şekil 7.15'de söz konusu 4 modelin, kullandığı eriyik tuzlardaki izotoplarının TBR katkıları belirtilmektedir. Dört model de ARC reaktöründe trityum üretimi sürekliliği için gerekli olan $TBR \geq 1,1$ değerini sağlamaktadır.



Şekil 7.15. Model 22, Model 23, Model 38 ve Model 39'daki FLiBe eriyik tuzu içerisindeki izotopların TBR katkıları

Çizelge 7.1'e göre SiC kompozit vakum kabı malzemesinin kullanıldığı modeller arasında en yüksek TBR değerine (1,063) sahip %30 Li-6 zenginleştirmenin yapıldığı Model 2 ile V4Cr4Ti vakum kabı malzemesinin kullanıldığı modeller arasında en yüksek TBR değerine (1,25) sahip %60 Li-6 zenginleştirmenin yapıldığı Model 23 kullandığı eriyik tuzlarındaki izotopların TBR katkıları Şekil 7.16'de görülmektedir. Diğer sonuçlara benzer şekilde, Li-6 ve Li-7 trityum üretiminin büyük bir kısmından sorumlu gözükmektedir.

Bunun yanı sıra, vanadyum alaşımı kullanılan modelde TBR miktarı SiC kompozit malzemesi kullanılan modele göre daha yüksek çıkmaktadır.



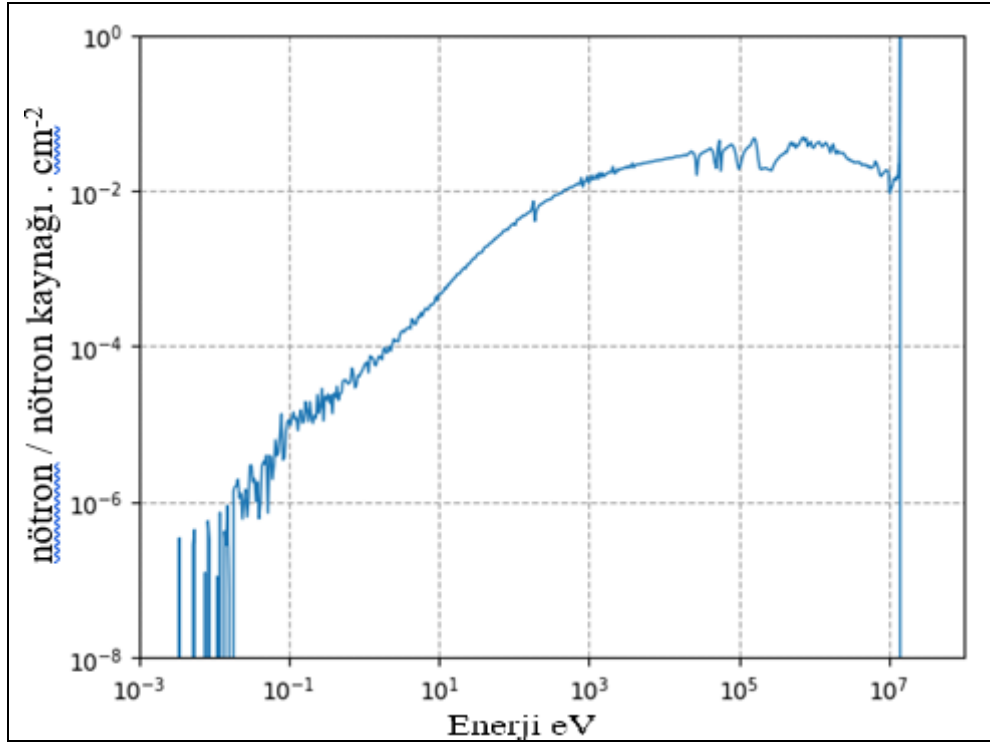
Şekil 7.16. Model 2 ve Model 23'teki FLiBe eriyik tuzu içerisindeki izotopların TBR katkıları

7.2. Reaktör Tabakalarındaki Nötron Akıları

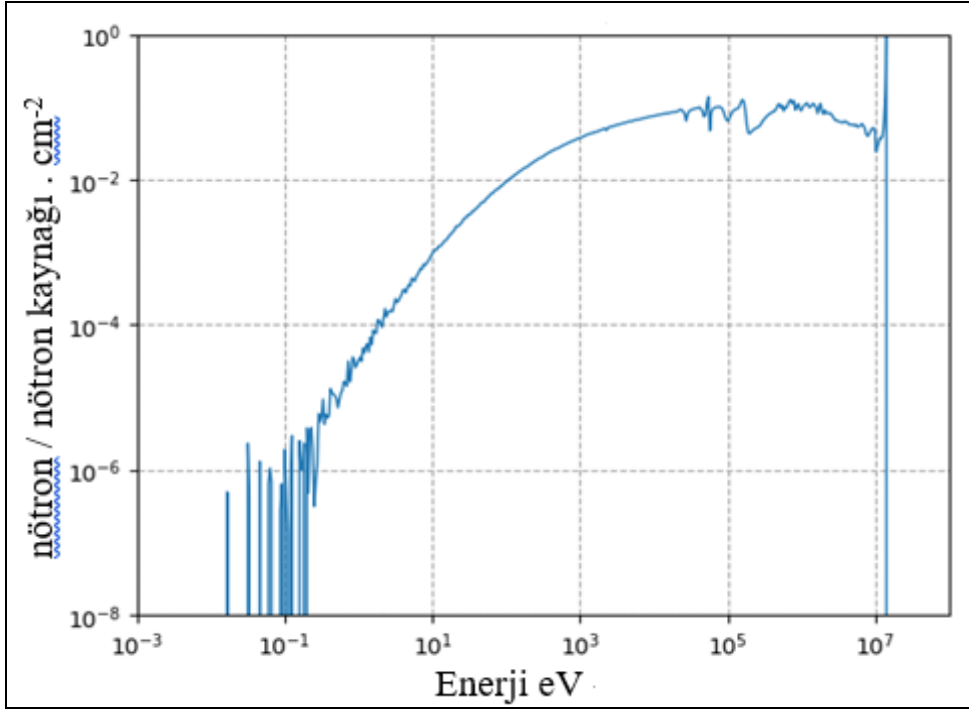
ARC reaktörü, yüksek manyetik alanlarda çalışan modüler bir tokamak çeşididir. ITER, JET ve diğer tokamak çeşitlerine göre, daha küçük bir hacimde benzer füzyon çıkış gücü elde edilmek istenildiğinden reaktör içindeki tabakalardaki nötron akı değerleri önem arz etmektedir. Çizelge 7.1'e göre, $TBR \geq 1,05$ değerini sağlayan modellerde, vakum kabı iç-dış yüzeyleri (STR1-STR2) ve trityum üretim tabakalarındaki 10^{-3} ile 10^7 eV enerji aralığındaki nötron akıları değerlendirilmiştir. Nötron akı değerinin birimi [nötron / nötron kaynağı . cm^{-2}] cinsindedir. Plazmada reaksiyonlar oluşurken, STR1, STR2 ve trityum üretim tabakalarında farklı enerji seviyelerinde saçılmış nötronlar bulunur. Plazmada oluşan söz konusu nötronlar tabakalar boyunca ilerlerken moderasyona maruz kalırlar. Bu sebeple bu süreç boyunca reaktörün iç bölgesinden dış bölgesine doğru ilerledikçe, plazmada reaksiyon sonucu oluşan nötron miktarı ile karşılaştırıldığında birim alan başına nötron hareket doğrultusuna dik tabaka yüzey alanlarından geçen nötron miktarı ve bu

nötronların enerji seviyeleri azalma gösterir. Nötronların sahip olduğu enerji seviyeleri özellikle trityum üretiminde görülen Li-6 ve Li-7 izotopları ile etkileşime girme olasılığında önem arz eder.

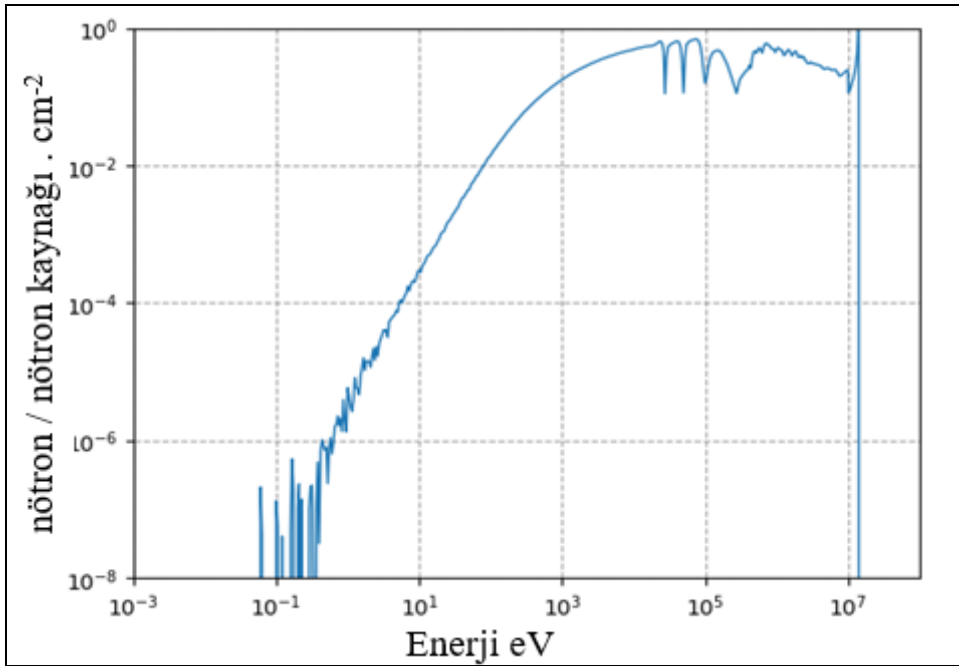
SiC vakum kabı malzemesi kullanılarak hazırlanan Model 2 (%30 Li-6 zenginleştirilmesi yapılan FLiBe eriyik tuzu), $TBR \geq 1,05$ değerini sağlamıştır. Şekil 7.17’de Model 2’deki STR1 bölgesinde, Model 7.18’de Model 2’deki STR2 bölgesinde ve Şekil 7.19’da ise trityum üretim tabakasındaki nötron akı değişimleri görülmektedir. Model 2’nin trityum üretim oranı değeri 1,063’tür.



Şekil 7.17. Model 2’de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi



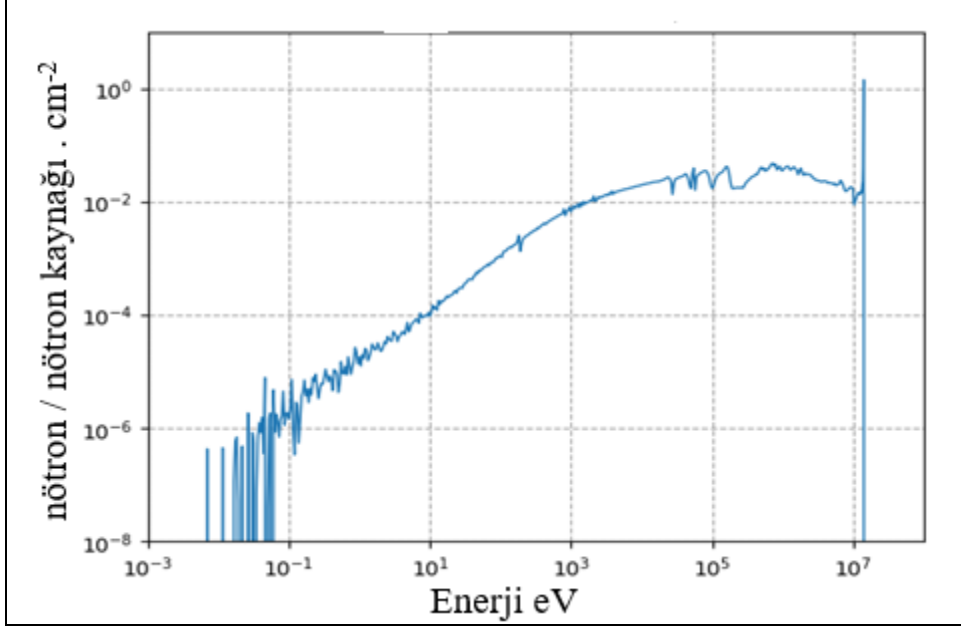
Şekil 7.18. Model 2'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi



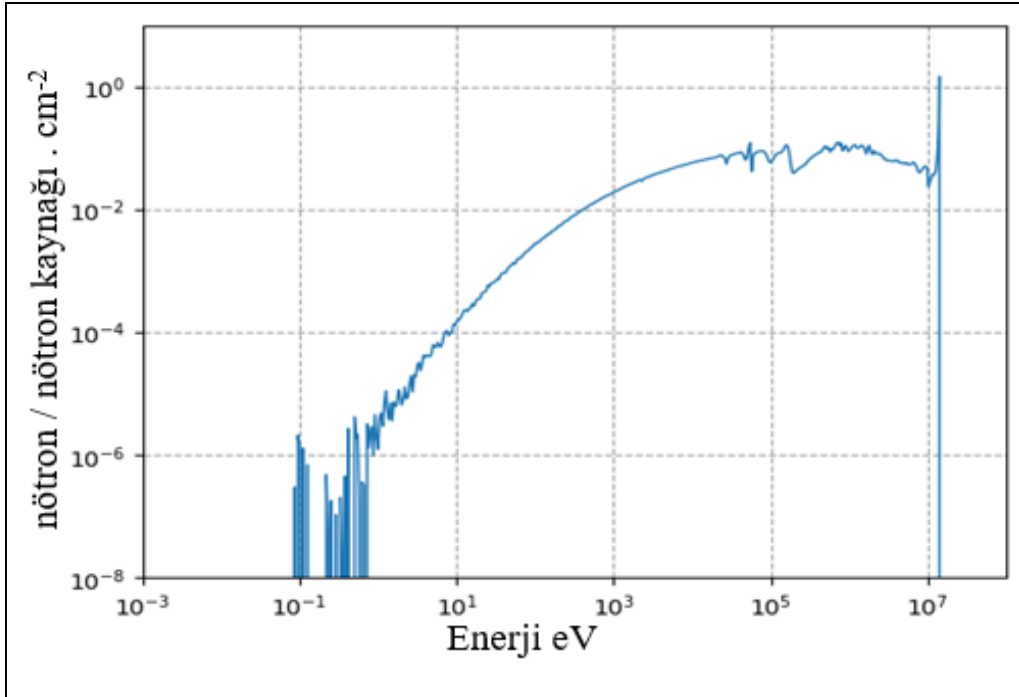
Şekil 7.19. Model 2'de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi

V4Cr4Ti vakum kabı malzemesi kullanılarak hazırlanan farklı Li-6 zenginleştirme oranlarının kullanıldığı nötron çoğaltma tabakası yer alan ve almayan FLiBe eriyik tuzu ile hazırlanan tüm modellerinde (Model 21, 22, 23, 24, 37, 38, 39, 40) TBR $\geq 1,05$ değeri sağlanmıştır. Şekil 7.20, Şekil 7.21 ve Şekil 7.22'de nötron çoğaltma tabakası yer alan %60

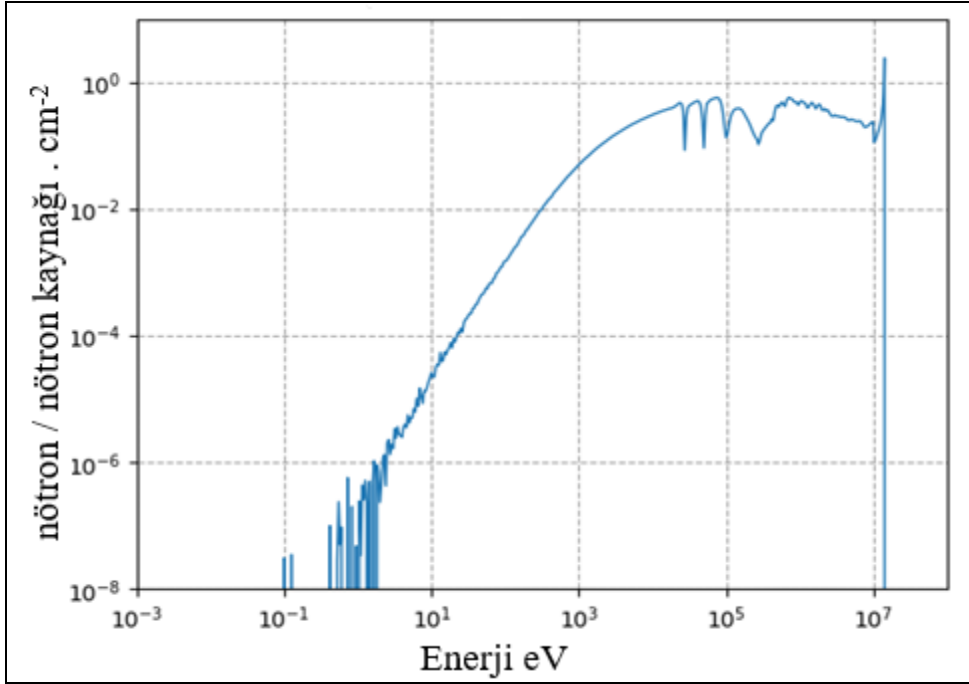
Li-6 zenginleştirmesinin yapıldığı FLiBe eriyik tuzu ile hazırlanan Model 23'e ait STR1, STR2 ve trityum üretim tabakasındaki nötron akı değişimleri verilmiştir. Model 23, TBR=1,25 ile V4Cr4Ti vakum kabı malzemesi kullanılarak hazırlanan modeller arasındaki en yüksek trityum üretim oranı değerine sahip modeldir.



Şekil 7.20. Model 23'de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi

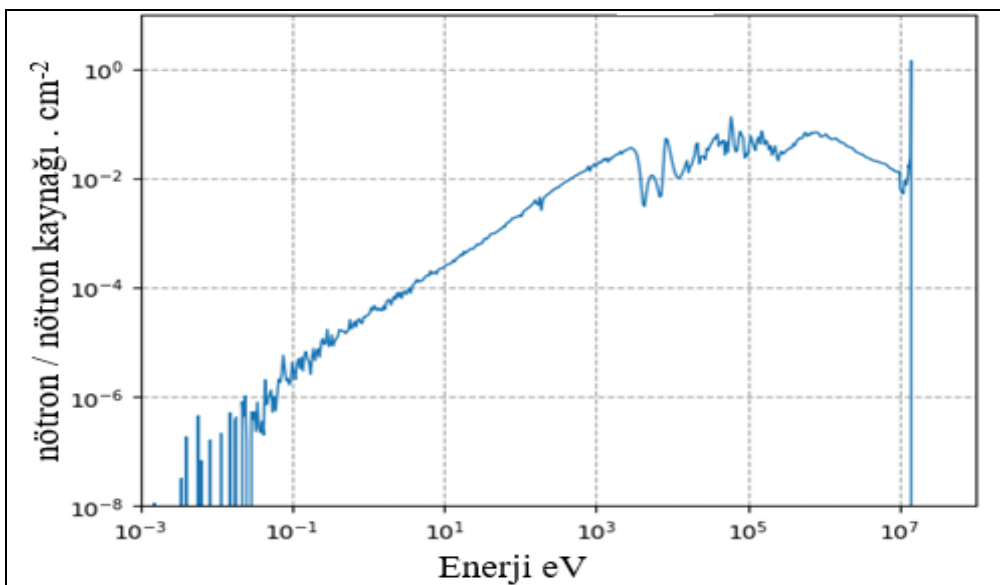


Şekil 7.21. Model 23'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi

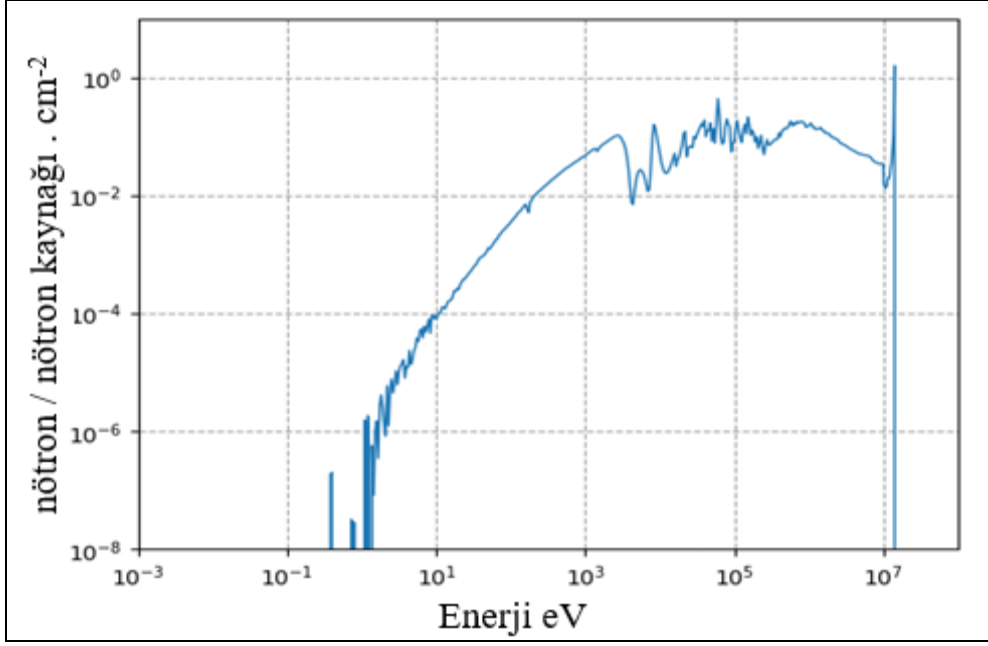


Şekil 7.22. Model 23'de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi

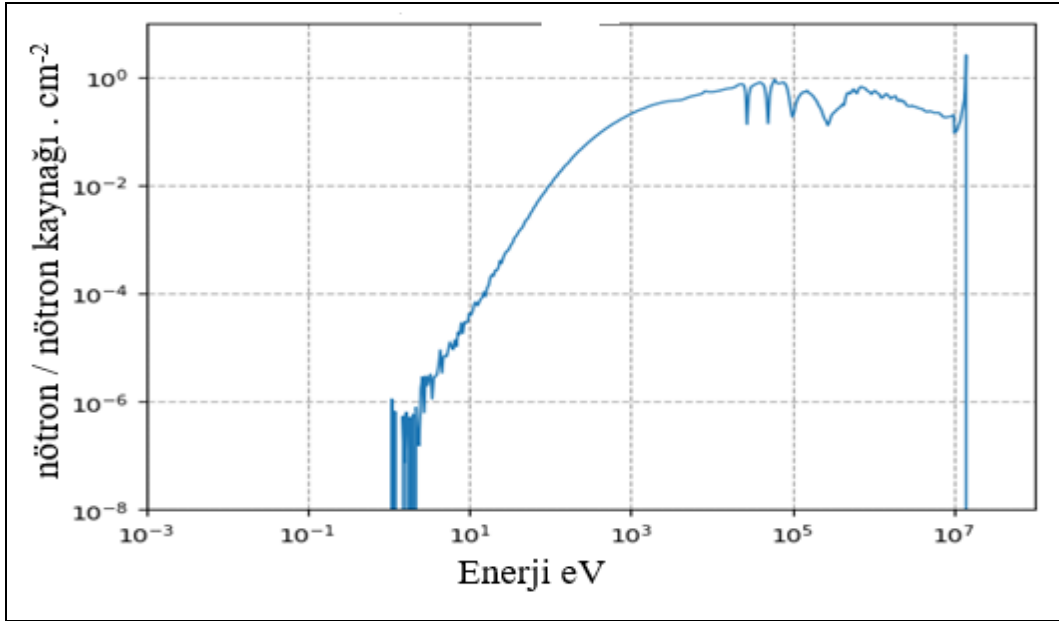
Vanadyum alaşım malzemesi ve FLiBe eriyik tuzu kullanılarak hazırlanan nötron çoğaltma bölgesi çıkarılan modeller (FLiBe_NÇB_yok) arasında en yüksek TBR değeri (1,188) %60 Li-6 zenginleştirmesinin yapıldığı Model 38'de elde edilmiştir. Model 38'e ait STR1, STR2 ve trityum üretim tabakasındaki nötron akı değişimleri Şekil 7.23, Şekil 7.24. ve Şekil 7.25'de verilmiştir.



Şekil 7.23. Model 38'de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi

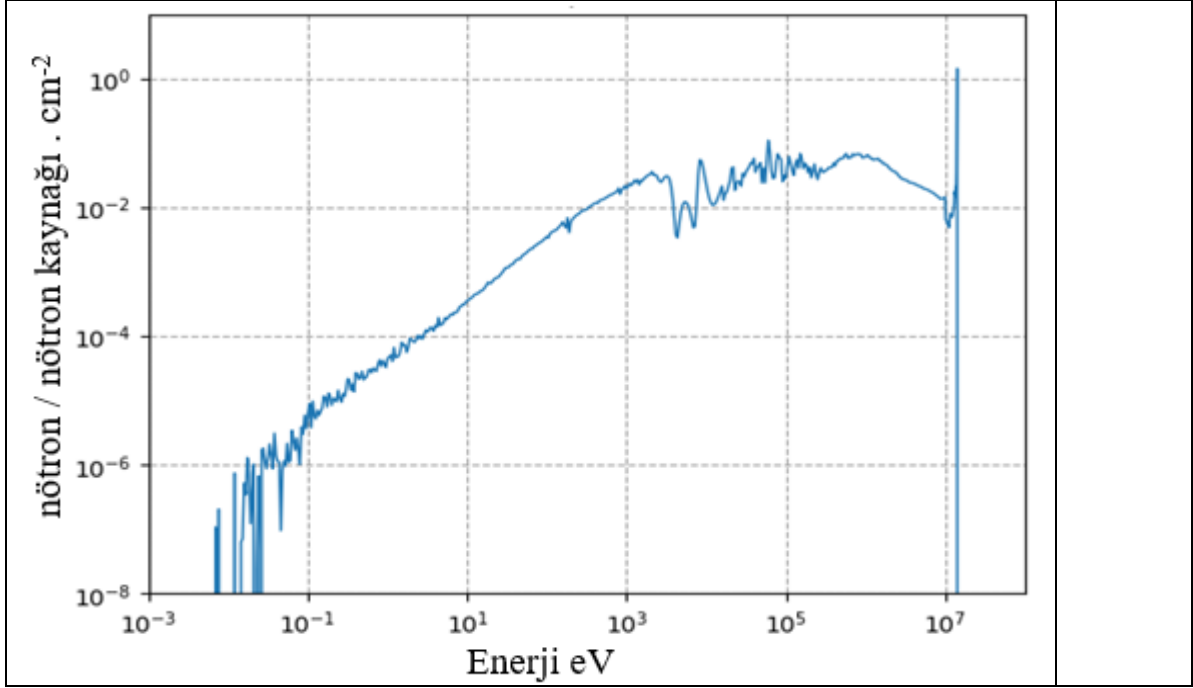


Şekil 7.24. Model 38'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi

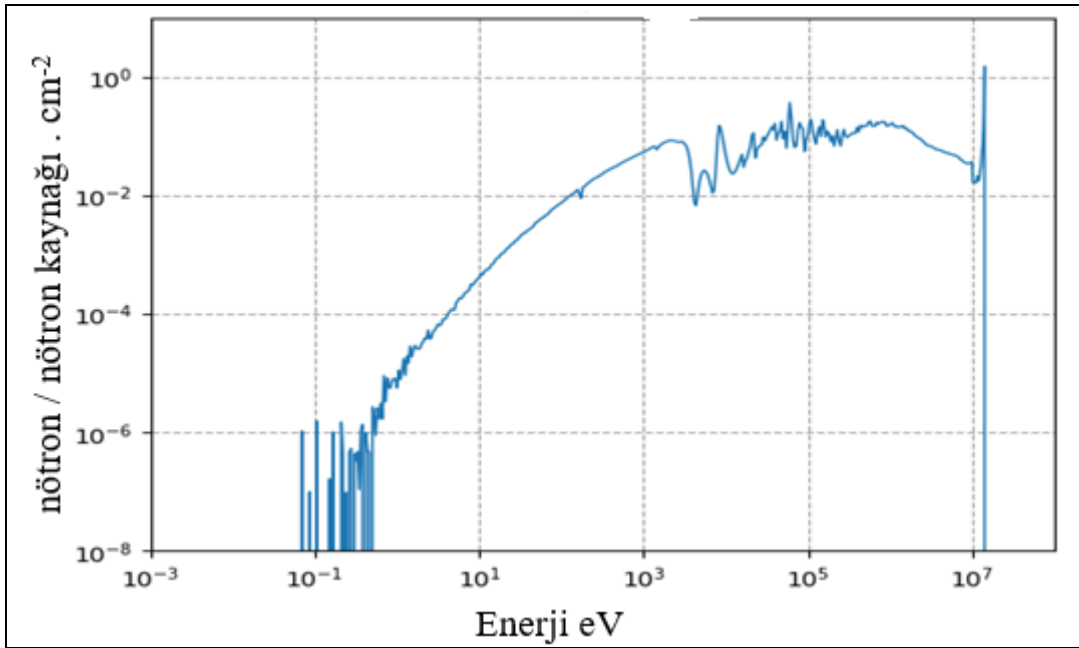


Şekil 7.25. Model 38'de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi

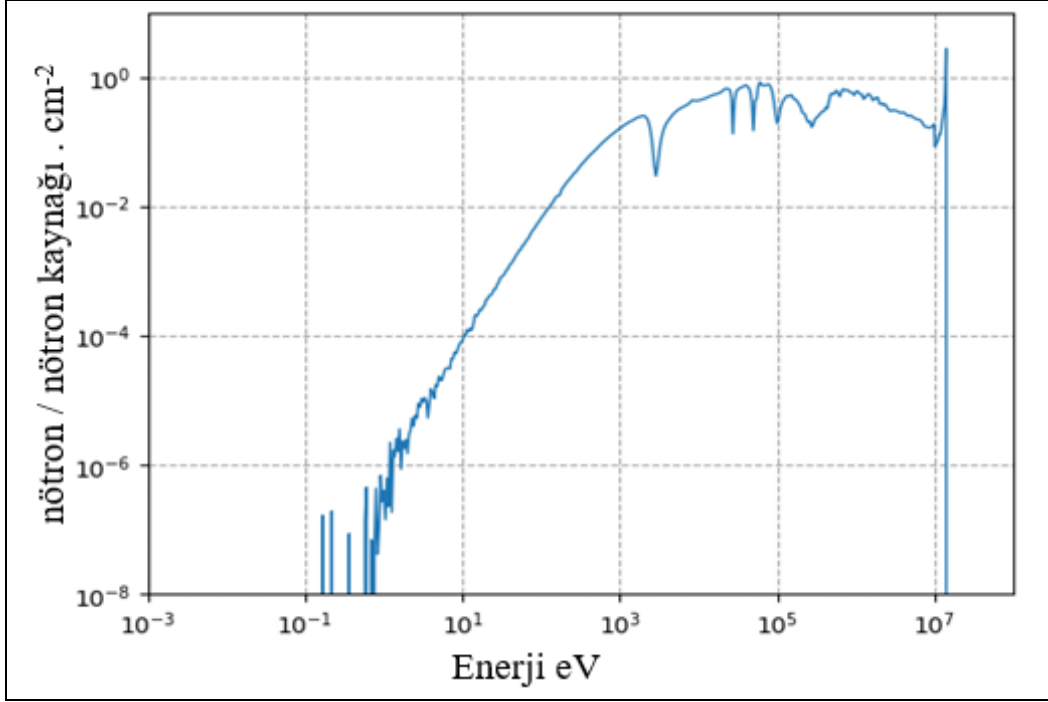
Vanadyum alaşım malzemesi ve FLiNaBe eriyik tuzu kullanılarak hazırlanan nötron çoğaltma tabakası var olan modeller (FLiNaBe) arasında en yüksek TBR değeri (1,162) %90 Li-6 zenginleştirmesinin yapıldığı Model 32'de elde edilmiştir. Model 32'e ait STR1, STR2 ve trityum üretim tabakasındaki nötron akı değişimleri Şekil 7.26, Şekil 7.27. ve Şekil 7.28'de verilmiştir.



Şekil 7.26. Model 32'de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi

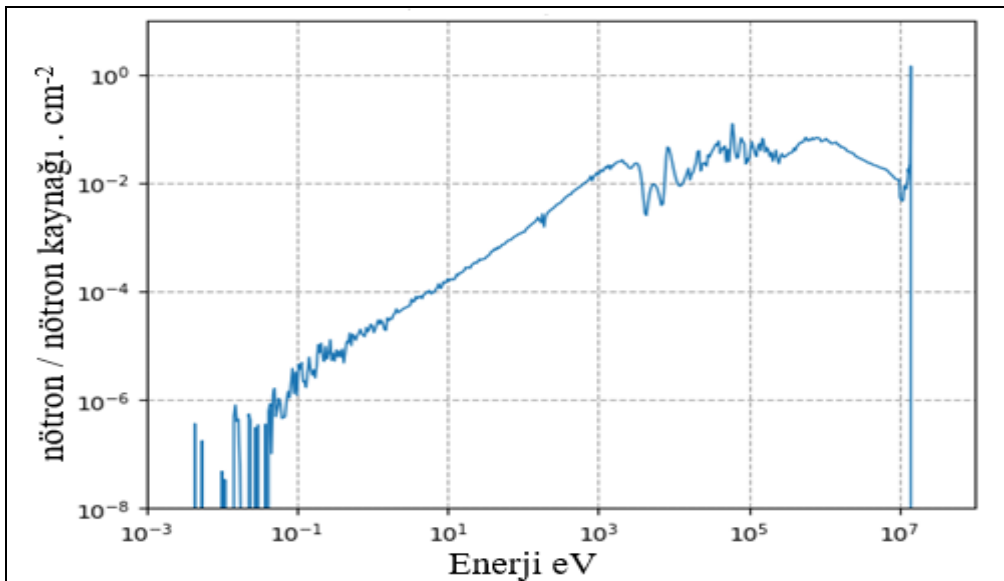


Şekil 7.27. Model 32'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi

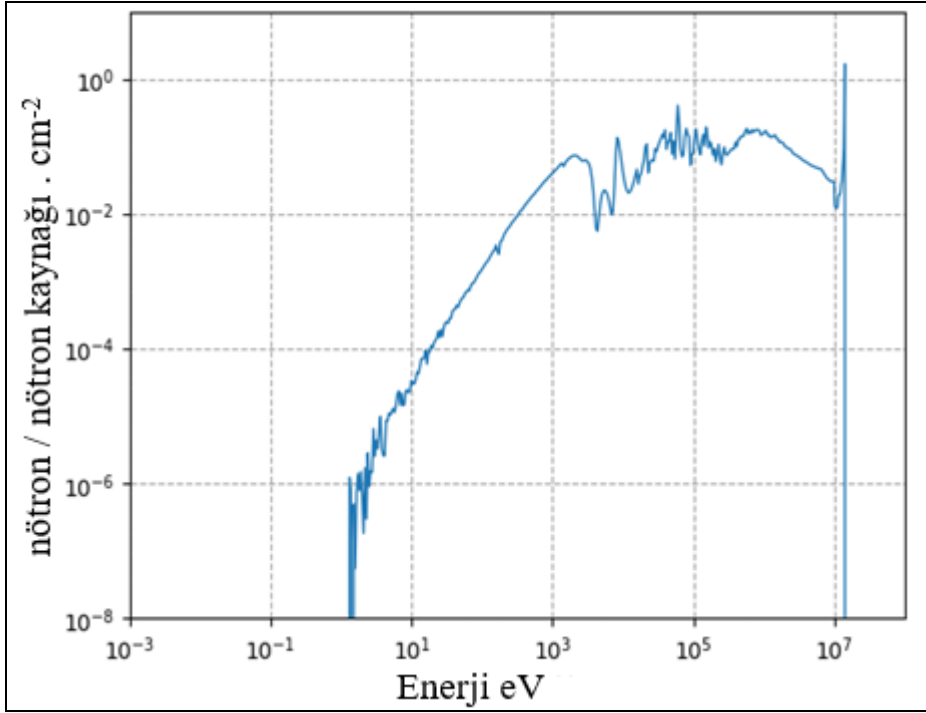


Şekil 7.28. Model 32'deki trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi

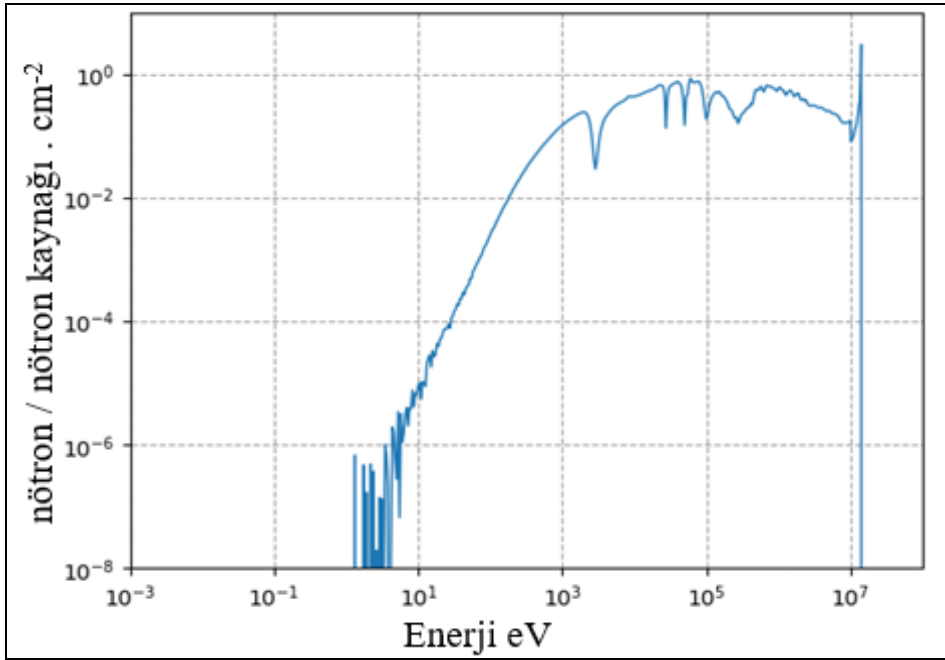
Vanadyum alaşım malzemesi ve FLiNaBe eriyik tuzu kullanılarak hazırlanan nötron çoğaltma tabakası çıkarılan modeller (FLiNaBe_NÇB_yok) arasında en yüksek TBR değeri (1,089) %90 Li-6 zenginleştirmesinin yapıldığı Model 44'de elde edilmiştir. Model 44'e ait STR1, STR2 ve trityum üretim tabakasındaki nötron akı değişimleri Şekil 7.29., Şekil 7.30. ve Şekil 7.31'de verilmiştir.



Şekil 7.29. Model 44'de STR1 bölgesindeki nötron akısının değişimi



Şekil 7.30. Model 44'de STR2 bölgesindeki nötron akısının değişimi



Şekil 7.31. Model 44'de trityum üretim tabakasındaki nötron akısının değişimi

Çalışma kapsamında farklı vakum kabı malzemesi kullanılarak hazırlanan ARC reaktörü modelleri arasında, SiC kompozit malzemesi kullanılarak Model 2'de, V4Cr4Ti alaşım malzemesi kullanarak Model 23'de en yüksek trityum üretim oranı değerlerine ulaşılmıştır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, manyetik sıkıştırımlı füzyon reaktörü çeşitlerinden biri olan ARC reaktörü tabakalarının nötronik performansı OpenMC açık kaynak kodu yardımıyla incelenmiştir. Reaktör yapısı 2 boyutlu D şekilli geometri olarak modellenmiş olup, tabaklarda kullanılan malzemelerin, tabaka bölgelerinin ve eriyik tuzların trityum üretim oranı performansları incelenmiştir. Buna ek olarak, vakum kabı iç ve dış duvarları ile trityum üretim tabakalarındaki nötron akıları irdelenmiştir. 2 farklı vakum kabı malzemesi, 4 farklı eriyik tuz çeşidi ve 4 farklı Li-6 izotop bolluğu oranlarında (Doğal Li, %30, %60 ve %90) oluşturulan 32 farklı modelin trityum üretim oranı değerleri ortaya konulmuştur. Sonrasında, $TBR \geq 1,05$ olan 12 modelde nötron çoğaltma tabakası tamamen kaldırılıp yerine soğutma kanalı tabakası genişletilerek trityum üretiminin sürdürülebilirliği incelenmiştir. Yapılan sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

SiC vakum kabı malzemesi kullanılarak farklı Li-6 zenginleştirme oranları ve farklı eriyik tuz çeşitlerinden oluşan modellerin hiçbirinde, ARC reaktörü içerisinde trityum üretimi sürekliliği için gerekli $TBR \geq 1,1$ şartının sağlanamadığı görülmüştür. V4Cr4Ti vakum kabı malzemesinin kullanıldığı FLiBe, FLiNaBe ve FLiBe_NÇB_yok eriyik tuzlardan oluşan modellerde $TBR \geq 1,1$ değerinin sağlandığı ortaya çıkmıştır. Genel anlamda, tüm modellere bakıldığında, V4Cr4Ti malzemesi kullanılan modellerdeki TBR değerleri, SiC kompozit malzemesi kullanılan modellerden daha yüksek çıkmıştır.

Farklı vakum kabı malzemeleri kullanılarak oluşturulan modellerde, nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığında trityum üretim oranı değerinde düşüş meydana gelmiştir. V4Cr4Ti malzemesi ile oluşturulan modellerde, nötron çoğaltma tabakası çıkarıldığında $TBR \geq 1,05$ değerini sağlayan FLiBe_NÇB_yok ve FLiNaBe_NÇB_yok modelleri olmuştur. SiC kompozit malzemesi ile berilyum tabakası içeren FLiBe eriyik tuzundan oluşturulan modellerde $TBR \geq 1,05$ sağlanabilmişken, berilyum tabakası çıkarıldığında sağlanamamıştır.

TBR $\geq 1,05$ değerini sağlayan modellerde %30 Li-6 zenginleştirme oranından sonra, zenginleştirme oranındaki artışın TBR değerini ciddi miktarda değiştirmediği gözlemlenmiştir.

FLiNaRb eriyik tuzunun kullanıldığı modellerin hiçbirinde TBR $\geq 1,05$ değeri elde edilememiştir. Eriyik tuzlar arasında en iyi TBR performansı FLiBe eriyik tuzunun bulunduğu modellerde sağlanmıştır.

Reaktör katmanları arasında, TBR değerine en fazla katkıyı trityum üretim tabakası vermiştir. Bu bölgenin diğer katmanlara göre daha fazla kalınlıkta olması ve eriyik tuzların bulunması bu sonucun çıkmasının başlıca sebeplerindedir.

Kullanılan eriyik tuzlar içerisinde yer alan izotopların TBR performanslarına bakıldığında, Li-6 ve Li-7 izotoplarının etkin olduğu görölmektedir. Li-6 izotopunun, Li-7 izotopuna göre TBR değişimine etkisi daha fazladır. Bu durum, Li-6 izotopunun Li-7'ye göre daha geniş bir enerji aralığında nötronlar ile etkileşime girebilme olasılığının yüksek olması ile ilişkilidir.

Nötron kaynağına göre tabakalardaki nötron miktarlarının ve enerji seviyelerinin nötronların ilerledikleri yol boyunca azaldığı akı-enerji değimi grafiklerinden anlaşılmaktadır. Vakum kabının iç duvarından, dış duvarına ve oradan da trityum üretim bölgesine doğru belirli bir enerji aralığındaki nötron sayısındaki azalma miktarının artış gösterdiği görölmektedir. Nötron çoğaltma tabakası çıkarılan modellerde söz konusu azalma miktarındaki artış daha da artmaktadır. Bu durum, nötron çoğaltma tabakası çıkarılan modellerin, nötron çoğaltma bölgesi olan modellere göre TBR miktarının daha düşük olması ile uyum göstermektedir.

Sonuç olarak, tasarım ve imalat iğişmaları devam eden ARC reaktörünün trityum üretimine katkı sağlayacak tabaka ve malzeme seğimlerinin reaktörün iğalişebilir hale gelebilmesi için önemli olduğu ortaya çıkmıştır. İğişma neticesinde ortaya konulan sonuçların gelecekte yapılabilecek iğişmalara katkı verebileceği düşünölmektedir. İğişma kapsamında ele alınan eriyik tuz çeşitleri dışında başka bileşiklerin, farklı vakum kabı malzemelerinin ve nötron çoğaltma tabakasında berilyum dışında başka elementlerin kullanılması seğenekleri dikkate alınarak trityum üretim oranı değerleri ile ilgili alternatif

çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, ilk duvar tabakasında yer alan malzemenin atom başına yer değiştirme miktarı ve radyasyon etkisi altındaki hizmet verebilme süreleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Evans, A., Strezov, V., Evans, T. (2010). Comparing the sustainability parameters of renewable, nuclear and fossils fuel electricity generation Technologies. *World Energy Council for Sustainable Energy*, Montreal, 1-14.
2. STM Teknolojik Düşünme Merkezi. (2022). Nükleer Enerjinin Yeni Nesli: Küçük Modüler Reaktörler. *Trend Analizi*, 3-11.
3. Eddington, A. S. (1920). The Internal Constitution of the Stars. *The Scientific Monthly*, 11(4), 297–303.
4. Greenberger, D., Hentschel, K., Weinert, F. (2009). *Compendium of Quantum Physics*. Berlin: Spriger Edition, 411-417.
5. Post, R. (1954). Summary of UCRL Pyrotron Programme. *Journal of Nuclear Energy*, 7(3), 282.
6. Ledda, F. (2022). *Advanced multiple principal element alloys as structural material in ARC : neutronic and activation analysis*. M. Sc. Thesis, Politecnico di Torino, Torino, 7-55.
7. Segantin, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2020). Neutronic comparison of liquid breeders for ARC-like reactor blankets. *Fusion Engineering and Design*, 160, 112013.
8. Sorbom, B.N, Ball, J., Palmer, T.R., Mangiarotti, F.J., Sierchio, J.M., Kasten, C., Sutherland, D.A., Barnard, H.S., Haakonsen, C.B., Goh, J., Sung, C., Whyte, D.G. (2015). ARC: A compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets. *Fusion Engineering and Design*, 100, 378-405.
9. Catalán, J.P., Ogando, F., Sanz, J., Palermo, I., Veredas, G., Gómez-Ros, J.M., Sedano, L. (2011). Neutronic Analysis of a Dual He/LiPb Coolant Breeding Blanket for DEMO. *Fusion Engineering and Design*, 86 (10), 2293-2296.
10. Şahin, H. M., Tunç, G., Şahin, N. (2016). Investigation of Tritium Breeding Ratio Using Different Coolant Material in a Fusion-Fission Hybrid Reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17), 7069-7075.
11. Zandi, N., Sadeghi, H., Habibi, M., Jalali, I., Zare, M. (2015). Blanket Simulation and Tritium Breeding Ratio Calculation for ITER Reactor. *Journal of Fusion Energy*, 34 (6), 1365-1368.
12. Ishibashi, K., Fujimoto, S., Matsumoto, T.(2014). An Optimization Study of Structure Materials, Coolant and Tritium Breeding Materials for Nuclear FusionFission Hybrid Reactor *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, 130- 133.

13. Romano, P.K., Horelik, N.E., Herman, B.R., Nelson, A.G., Forget B., Smith, K. (2015). OpenMC:A state-of-the-art Monte Carlo code research and development. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 90-97.
14. Şahin, H. M., Karakoç, A. (2020). Investigation Of The Effect Using Different Coolant On The Performance Of A Tokamak Fusion Reactor Blanket. *Turkish Journal of Nuclear Science*, 32(1), 59-72.
15. Segantin S., Meschini, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2022). Preliminary investigation of neutron shielding compounds for ARC-class tokamaks. *Fusion Engineering and Design* 185, 113335.
16. Asal Ş., Acır A. (2021). Uranyum yakıtlı bir lazer sürücülü füzyon reaktöründe (LIFE) nötronik performansın hidrojen üretimine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 609-617.
17. Kuang, A.Q., Cao, N.M., Creely. A.J., Dennett, C.A., Hecla, J., LaBombard, B., Tinguely, R.A., Tolman, E.A., Hoffman, H., Major, M., Ruiz Ruiz, J., Brunner, D., Grover, P., Laughman, C., Sorbom, B.N., Whyte, D.G. (2018). Conceptual design study for heat exhaust management in the ARC fusion pilot plant. *Fusion Engineering and Design*, 137, 221-242.
18. Bocci, B., Hartwig, Z., Segantin, S., Testoni, R., Whyte, D., Zucchetti, M. (2020). ARC reactor materials: Activation analysis and optimization. *Fusion Engineering and Design* 154, 111539.
19. Segantin, S., Testoni, R., Hartwig, Z., Whyte, D., Zucchetti, M. (2020). Optimization of tritium breeding ratio in ARC reactor. *Fusion Engineering and Design*, 154, 111531.
20. Fausser, C., Puma, A.L., Gabriel, F., Villari, R. (2012). Tokamak D-T neutron source models for different plasma physics confinement modes. *Fusion Engineering and Design*, 87, 787-792.
21. Federici, G., Boccaccini, L., Cismondi, F., Gasparotto, M., Poitevin, Y., Ricapito, I. (2019). An overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of DEMO design effort. *Fusion Engineering and Design*, 141, 30-42.
22. Şahin, H.M., Tunç, G., Karakoç, A., Omar, M.M. (2022). Neutronic study on the effect of first wall material thickness on tritium production and material damage in a fusion reactor. *Nuclear Science and Techniques*, 33, 4.
23. Tajoore, M.M.O. (2022) *Neutronic Investigation Of The Effect Of First Wall Material Composition And Thickness On Reactor Structure Performance In A Fusion Reactor*. Ph.D. Thesis, T.C. Karabük University Institute of Graduate Programs Department of Energy Systems Engineering, Karabük, 25-49.
24. Yalçın, S., Übeyli, M., Acır, A. (2005). Neutronic analysis of a high-power density hybrid reactor using innovative coolants. *Sadhana*, 30, 585–600.

25. Şahin, S., Şahin, H.M., Acır, A. (2012). LIFE hybrid reactor as reactor grade plutonium burner, *Energy Conversion and Management*, 63, 44-50.
26. Sawan, M.E., Abdou, M.A. (2006). Physics and technology conditions for attaining tritium self-sufficiency for the DT fuel cycle. *Fusion Engineering and Design*, 81, 1131–1144.
27. Şahin, H.M. (2007). Monte Carlo calculation of radiation damage in first wall of an experimental hybrid reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 34, 861–870.
28. Romatoski, R.R., Hu, L.W. (2017) Fluoride salt coolant properties for nuclear reactor applications: A review. *Annals of Nuclear Energy*, 109, 635-647.
29. Übeyli, M. (2004) On the tritium breeding capability of Flibe, Flinabe, and Li 20Sn80 in a fusion-fission (hybrid) reactor. *Journal of Fusion Energy*, 22, 51–57.
30. Muroga, T. (2005). Vanadium Alloys for Fusion Blanket Applications. *Materials Transactions*, 46(3), 405–411.
31. El-Guebaly, L. A. (2010). Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958–2008): Brief Historical Overview and Discussion of Future Trends. *Energies*, 3(6), 1067-1086.
32. Boullon, R., Jaboulay J., Aubert, J. (2021). Molten salt breeding blanket: Investigation and proposals of pre-conceptual design options for testing in DEMO. *Fusion Engineering and Design*, 171, 112707.
33. Karakoç, A. (2019). *Bir Manyetik Füzyon Nükleer Reaktörünün Nötronik Analizinin Yapılması*. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-22.
34. Pettinari, D. (2022). *ARC reactor: neutronic and activation analysis of high-entropy alloys for the vacuum vessel*. M.Sc. Thesis, Politecnico di Torino, Torino, 2-30.
35. Zucchetti, M., Hartwig, Z., Meschini, S., Segantin, S., Testoni, R., Whyte, D. (2021). ARC reactor: Radioactivity safety assesment and preliminary enviromental impact Study. *Fusion Engineering and Design*, 162, 112132.
36. Sohal, M.S., Ebner, M.A., Sabarwall, P., Sharpe, P. (2010). Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties. *Idaho National Laboratory*, 3-52.
37. Tunç, G. (2017). *Toryumun Ve Çeşitli Nükleer Yakıtların Performanslarının Bir Füzyon – Filyon Reaktör Sisteminde Nötronik Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 99-120.
38. Segantin, S., Testoni, R. Zucchetti, M. (2020). ARC Reactor – Neutron irradiation analysis. *Fusion Engineering and Design*, 159, 111792.
39. Übeyli, M., Altınok, T. (2002). Neutronic Investigation Of The Aries-St Fusion Reactor By Using Molten Salt With ThF₄. *Journal of Polytechnic*, 5(3), 227-23.

40. Jiang, S., Shen, J., Nagasaka, T., Muroga, T., Sagara A., Ohnuki, S., Hokamoto, K., Rao, W., Tanaka, S., Inao, D., Morizono, Y., Kasada, R., Zheng, P. (2023). Formation of intermetallic and its effect on the hardening of welding joint between vanadium alloy and Hastelloy X alloy after heat treatment. *Nuclear Materials and Energy*, 34, 101389.
41. Fenici, P., Farias Rebelo, A.J., Jones, R.H., Kohyama, A., Snead, L.L. (1998). Current status of SiC/SiC composites R&D. *Journal of Nuclear Materials*, 258-263, 215-225.
42. Smith, D.L., Chung, H.M., Loomis, B.A., Tsai, H.C. (1996). Reference vanadium alloy V-4Cr-4Ti for fusion application. *Journal of Nuclear Materials*, 233-237, 356-363.
43. Stopher, M. A. (2017). The effects of neutron radiation on nickel-based alloys. *Materials Science and Technology*, 33(5), 518-536.
44. Übeyli, M. (2003). On the Tritium Breeding Capability of Flibe, Flinabe and $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ in a Fusion-Fission (Hybrid) Reactor. *Journal of Fusion Energy*, 22(1), 51-57.
45. Moriyama, H., Sagara, A. Tanaka, S., Moir, R.W., Sze, D.K. (1998). Molten salts in fusion nuclear technology. *Fusion Engineering and Design*, 39-40, 627-637.
46. Şahin, S. (2019). Selection Criteria For Fusion Reactor Structures. *Journal of Thermal Engineering*, 5(2), 46-57.
47. Beaufait, R., Fischer, L. (2023). Blanket Cooling of a Fusion Reactor. *Energies*, 16(4), 1890.
48. Murray R. (2000). *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*.(5 th edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 223- 255.
49. İnternet: Zabunoğlu, H.O. (Ocak, 2019). Atomun tarihçesi. URL: <https://nukleerakademi.org/atomun-tarihcesi/>, Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.
50. Lamarsh, J.R., Baratta A.J. (2014). *Introduction to Nuclear Engineering* (3rd Edition). London: Pearson Education Limited, 22-75.
51. Harmon, C.D. II, Busch, R.D., Briesmeister, J.F., Forster, R.A. (1994). Criticality Calculations with MCNP5 trademark: A primer. Radiation Transport Group X-6 Los Alamos National Laboratory. New Mexico, 7-15.
52. Lilley, J. (2018). *Nükleer Fizik İlkeler ve Uygulamalar*. (Çev. A. İskender Reyhancan, Abdullah Aydın, Abdullah Kaplan, Ahmet Bozkurt). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık. (Eserin orijinali 2001’de yayımlandı), 382- 403.

53. Creely, A.J., Greenwald, M., Ballinger, S., Brunner, D., Canik, J.M., Doody, J., Fülöp, T., Garnier, D.T., Granetz, R.S., Gray, T.K., Holland, C., Howard, N.T., Hughes, J.W., Irby, J., Izzo, V.A., Kramer, G., Kuang, A.Q., LaBombard, B., Lin, Y., Lipschultz, B., Logan, N., Lore, J.D., Marmor, E., Montes, K., Mumgaard, R.T., Paz-Soldan, C., Rea, C., Reinke, M.L., Rodriguez-Fernandez, P., Särkimäki, K., Sciortino, F., Scott, S.D., Snicker, A., Snyder, P.B., Sorbom, B.N., Sweeney, R.M., Tinguely, R.A., Tolman, E.A., Umansky, M.V., Vallhagen, O., Varje, J., Whyte, D.G., Wright, J.C., Wukitch, S.J., & Zhu, J.X. (2020). Overview of the SPARC tokamak. *Journal of Plasma Physics*, 86(5), 865860502.
54. Yican, W. (2017). *Fusion Neutronics*, (First Edition). Singapur: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2-59.
55. Freidberg, J.P. (2008). *Plasma Physics And Fusion Energy*. (First Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 21-36.
56. Sturrock, P.A. (1994). *Plasma Physics An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical and Laboratory Plasmas*. Cambridge: Cambridge University Press, 19-27.
57. İnternet: Biel, W. (2014). Tritium Breeding and blanket technology. URL:<https://www.dpg-physik.de/veranstaltungen/2014/biel2.pdf>, Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.
58. Li, S., Jiang, H., Ren, Z., Xu, C. (2014). Optimal Tracking for a Divergent-Type Parabolic PDE System in Current Profile Control. *Hindawi Publishing Corporation*, (13), 1-8.
59. Şahin, S. (1991). *Hızlı reaktörlerin radyasyon zırhlaması hesapları*. (Birinci Baskı). Ankara: Gazi Üniveristesesi Basım-Yayın Yüksekokulu Matbaası, 2-18.
60. Bell, G.I., Glasstone, S. (1970). *Nuclear Reactor Theory*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 620.
61. İnternet: Anderson, A. (2019). Solid Angle. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Steradian>, Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.
62. Ersoy, A. (2019). *Nötron Transport Denkleminin Çözümünde P_L , T_N , H_N Yöntemleri Ve Uygulamalar*. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-16.
63. İnternet: Ellery, D., Barroso, G. (2017). Numerical Solution of the Time-Dependent NeutronTransport Equation Using the Characteristic Method. Applications to ICF and to Hybrid Fission-Fusion Systems. *Military Institute of Engineering Department of Nuclear Engineering*, URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.02861.pdf>, Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.
64. Hançerlioğulları, A. (2006). Monte Carlo Simülasyon Metodu Ve MNCP Kod Sistemi, *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 14(2), 545-556.

65. İnternet: OpenMC User's Guide. URL: <https://docs.openmc.org/en/stable/usersguide/tallies.html>, Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.
66. Chadwick, M.B., Herman, M.W., Obložinský, P., Dunn, M.E., Danon, Y., Kahler, A.C., Smith, D.L., Pritychenko, B., Arbanas, G., Arcilla, R., Brewer, R.W., Brown, D.A., Capote, R., Carlson, A.D., Cho, Y.S., Derrien, H., Guber, K.H., Hale, G.M., Hoblit, S.D., Holloway, S.T., Johnson, T., Kawano, T., Kiedrowski, B.C., Kim, H.T., Kunieda, S., Larson, N.M., Leal, L.C., Lestone, J.P., Little, R., Mccutchan, E.A., Macfarlane, R.E., Macinnes, M., Mattoon, C., Mcknight, R.D., Mughabghab, S.F., Nobre, G.P., Palmiotti, G., Palumbo, A., Pigni, M.T., Pronyaev, V.G., Sayer, R.O., Sonzogni, A.A., Summers, N.C., Talou, P., Thompson, I.J., Trkov, A., Vogt, R., Marck, S.V., Wallner, A., White, M., Wiarda, D., & Young, P.G. (2011). ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. *Nuclear Data Sheets*, 112, 2887-2996.



Gazili olmak ayrıcalıktır.