

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ÇİFT AKIŞKANLI REAKTÖRLERİN NÖTRONİK ANALİZİ

SEMRA DAYDAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. ALİ TİFTİKÇİ

SİNOP - 2024

TEZ KABUL

Arş. Gör. SEMRA DAYDAŞ tarafından hazırlanan “ÇİFT AKIŞKANLI REAKTÖRLERİN NÖTRONİK ANALİZİ” başlıklı bu çalışma, Tarih girmek için burayı tıklatın. tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Şule ERGÜN
Hacettepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi

İmza

**Üye
(Danışman)**

Doç. Dr. Ali TİFTİKÇİ
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ŞAHİNER
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Fadime DİRİK

.....

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; 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 çalışmasında 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.

Semra DAYDAŞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİFT AKIŞKANLI REAKTÖRLERİN NÖTRONİK ANALİZİ

SEMRA DAYDAŞ

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN:DOÇ. DR. ALİ TİFTİKÇİ

Bu çalışmanın amacı, Çift Akışkanlı Reaktör (DFR) tasarımları olan DFR_s ve DFR_m konseptlerinde farklı yakıt ve malzemeler kullanılarak reaktörlerin nötronik davranışlarını incelemektir. Bu amaçla, DFR_s konsepti için ThCl₄-PuCl₃ ve NaCl-ThCl₄-PuCl₃ yakıt tuzları önerilmiş, ayrıca (silisyum karbür) SiC yakıt tüpü geometrisi değiştirilmiş ve reaktörde (itriyum hidrat) YH_{1,85} ve (magnezyum oksit-berilyum oksit) MgO-BeO malzemeleri varlığında reaktörün nötronik davranışları analiz edilmiştir. Yakıt tüpüne 0,05 cm kalınlıkta YH_{1,85} eklenerek termal DFR_s reaktörü elde edilmiştir. Burada önerilen yakıtların ömrünü artırmak ve yakıt yeniden işleme sürecini basitleştirmek amacıyla ThCl₄-PuCl₃ blanketi önerilmiştir. Sonuçlar, ThCl₄-PuCl₃ blanketinin yakıt ömrünü uzattığını ve pozitif sıcaklık katsayılarına ulaşıldığını göstermiştir. Bu blanketin yakıt ömrü üzerindeki etkisi göz önüne alınarak, gelecekte negatif sıcaklık katsayısına sahip kompozisyonlar optimize edilebilir. DFR_m konseptinde ise, U-Cr yerine daha düşük erime sıcaklığına sahip U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilmiştir. Sonuç olarak U-Mn yakıtı U-Cr yakıtı ile çok benzer davranış sergilemiştir. Böylece U-Mn yakıtı kullanarak DFR_m reaktörünün çalışma sıcaklık aralığı genişletilerek U-Cr yakıtında elde edilen yakıt ömrüne ulaşılmıştır. U-Fe yakıt ise düşük fisil içeriği ile daha kısa yakıt döngüsü ömrü sağlasa da sıcaklık katsayılarının negatif olması sayesinde referans DFR_m için potansiyel bir aday olarak değerlendirilmiştir. Bunlara ek olarak DFR_m'de SiC malzemesi yerine MgO-BeO seramik yavaşlatıcı malzemesinin davranışları incelenmiştir. MgO-BeO, nötronik açıdan SiC ile çok benzer davranış gösterse de U-Fe yakıtı kullanıldığı durumda yavaşlatıcı katsayısı YDB'de pozitif elde edilmiştir. MgO-BeO malzemesinin termal iletkenlik katsayısının SiC'dan düşük olması da göz önünde bulundurulduğunda her iki yakıt için yakıt tüpü olarak SiC kullanılması önerilmektedir. Sonuç olarak, DFR_m konsepti yüksek güç yoğunluğu, uzun yakıt ömrü ve kompakt yapısıyla mikro reaktör tasarımı için umut vaat etmektedir. Elde edilen bulgular, yakıt ve blanket kompozisyonlarının optimizasyonu için temel sağlayabilir.

ANAHTAR KELİMELELER: DFR; MSR; SERPENT; Çift Akışkanlı Reaktör; İtريum Hidrat; Nötronik Analiz

Haziran 2024, 96 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

NEUTRONIC ANALYSIS OF DUAL FLUID REACTORS

SEMRA DAYDAŞ

SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS

DEPARTMENT OF NUCLEAR ENERGY ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. ALİ TİFTİKÇİ

The aim of this study is to investigate the neutronic behavior of reactors in the Dual Fluid Reactor (DFR) designs, specifically the DFRs and DFRm concepts, using various fuels and materials. For the DFRs concept, ThCl₄-PuCl₃ and NaCl-ThCl₄-PuCl₃ fuel salts have been proposed. Additionally, the geometry of the silicon carbide (SiC) fuel tube has been modified, and the reactor's neutronic behavior has been analyzed with yttrium hydride (YH_{1.85}) and magnesium oxide-beryllium oxide (MgO-BeO) materials. A thermal DFRs reactor has been achieved by adding 0.05 cm thick YH_{1.85} to the fuel tube. To extend the fuel lifespan and simplify the fuel reprocessing process, a ThCl₄-PuCl₃ blanket has been proposed. The results show that the ThCl₄-PuCl₃ blanket prolongs fuel life and achieves positive temperature coefficients. Future optimization of compositions with negative temperature coefficients may be possible. In the DFRm concept, U-Mn and U-Fe fuels with lower melting points have been suggested instead of U-Cr. U-Mn fuel exhibits similar behavior to U-Cr fuel, thereby extending the operating temperature range of the DFRm reactor and achieving the same fuel lifespan as with U-Cr fuel. Although U-Fe fuel results in a shorter fuel cycle life due to its lower fissile content, its negative temperature coefficients make it a potential candidate for reference DFRm reactors. Additionally, the behavior of MgO-BeO ceramic moderator materials has been examined as a replacement for SiC in DFRm. While MgO-BeO shows similar neutronic behavior to SiC, it has a positive moderator coefficient in BOL when using U-Fe fuel. Given its lower thermal conductivity compared to SiC, SiC is recommended as the fuel tube material for both fuels. Overall, the DFRm concept shows promise for micro reactor design due to its high power density, long fuel life, and compact structure. The findings provide a basis for optimizing fuel and blanket compositions.

KEYWORDS:DFR; MSR; SERPENT; Dual Fluid Reactor; Yttrium Hydride; Neutronic Analysis.

June 2024, 96 Page

TEŞEKKÜR

Öncelikle, her zaman yanımda olan ve bana sınırsız destek veren aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Onların sevgisi ve desteği, bu süreci daha kolay hale getirdi.

Değerli danışmanım Doç. Dr. Ali TİFTİKÇİ'ye, tez sürecindeki değerli rehberliği, sabrı ve bilgeliği için minnettarım. Her adımda sabırla bana yol gösterdiği için kendisine sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca jüri üyelerim olan Prof. Dr. Şule ERGÜN ve Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ŞAHİNER'e teşekkür ederim. Değerli geri bildirimleri ve önerileri ile tezimin kalitesini artırmama yardımcı oldular. Özellikle, tez sürecinde bana çok yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ŞAHİNER'e ayrıca teşekkür etmek istiyorum.

Bu çalışmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde bulunan TRUBA kaynaklarında gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları kaynaklar ve destekleri için teşekkür ederim.

Semra DAYDAŞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Yeni Nesil Nükleer Reaktörler	6
1.2. Sıvı Yakıtlı Reaktör Tasarımlarının Kısa Tarihçesi	9
2. GENEL BİLGİLER	21
2.1. DFR Sistemi	21
2.1.1. Kor geometrisi	23
2.1.5. Yakıt yeniden işleme	25
2.1.6. Yakıt ve soğutucu döngüsü	25
2.1.7. DFR konseptlerinde ortak kullanılan malzemeler	26
2.1.7.1. SiC	26
2.1.7.2. Kurşun	28
2.2. DFR _s konsepti	31
2.2.1. İkili yakıt: ThCl ₄ -PuCl ₄	32
2.2.2. Üçlü yakıt: NaCl- ThCl ₄ -PuCl ₃	36
2.3. DFR _m konsepti	37
2.3.1. U-Mn yakıtı	39
2.3.2. U-Fe yakıtı	40
2.4. Katı Yavaşlatıcılar	41
2.4.1. YH _{1,85}	42

2.4.2. MgO-BeO	43
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	45
3.1. Geometri ve Modellemelerin Doğrulanması	45
3.2. DFR _s Konsepti için Yakıt ve Malzemelerin İncelenmesi	46
3.3. Yavaşlatıcı Malzemelerin Nötron Enerji Spektrumuna Etkisi	46
3.4. DFR _s Konseptinde Blanket Malzemesi	47
3.5. DFR _m Konsepti için Yakıt ve Yavaşlatıcı Malzemelerin İncelenmesi	47
3.6. Sıcaklık Katsayılarının Analizi.....	48
4. BULGULAR.....	50
4.1. Referans ve Oluşturulan DFR _s /DFR _m Geometri ve Modellerinin Karşılaştırılması	50
4.2. DFR _s Sonuçları.....	52
4.2.1. Referans DFR _s 'de ikili yakıt sistemi.....	52
4.2.1.1. Yanma boyunca k_{eff} değişimi.....	53
4.2.1.2. İkili yakıt için YH _{1,85} etkisi.....	57
4.2.1.3. İkili yakıt MgO-BeO etkisi.....	61
4.2.1.4. İkili yakıt geometrisinde ThCl ₄ -PuCl ₃ blanketi kullanımı	61
4.2.1.5. Yavaşlatıcıların nötron spektrumu üzerindeki etkisi	64
4.2.1.6. Önemli izotoplar	65
4.2.2. Referans DFR _s 'de üçlü yakıt sistemi	72
4.2.2.1. Yanma ile k_{eff} değişimi	72
4.2.2.2. YH _{1,85} etkisi	73
4.2.2.3. Üçlü yakıt geometrisinde ThCl ₄ -PuCl ₃ blanketi kullanımı.....	74
4.2.2.4. Önemli izotoplar	76
4.3. DFR _s 'de güvenlik: Sıcaklık Geribildirim Katsayıları	77
4.3.1. İkili yakıt sistemlerinin sıcaklık katsayıları.....	78
4.3.1.1. Doppler katsayısı	78
4.3.1.2. Soğutucu katsayısı	80
4.3.1.3. Yavaşlatıcı Katsayısı.....	81
4.3.1. Üçlü yakıt sistemlerinin sıcaklık katsayıları	82

4.3.1.4. Doppler katsayısı	82
4.3.1.5. Soğutucu katsayısı	83
4.3.1.6. Yavaşlatıcı Katsayısı.....	84
4.4. DFR _m Sonuçları.....	85
4.4.2. DFR _m konsepti nötron enerji spektrumu	88
4.4.3. DFR _m yakıtları için önemli izotoplar	89
4.5. DFR _m 'de güvenlik: Sıcaklık geribildirim katsayıları	90
4.5.1.1. Doppler katsayısı	91
4.5.1.2. Yavaşlatıcı katsayısı	91
4.5.1.3. Soğutucu katsayısı	92
5. SONUÇ.....	94
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	104

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 Bazı yakıtlara ait enerji yoğunlukları (Bersano vd., 2020).....	2
Tablo 1.2 IV. Nesil reaktörlere ait temel parametreler (Sierchuła, 2021; U.S. DOE, 2002)...	7
Tablo 2.1 SiC özellikleri (X. Wang, 2017).	28
Tablo 2.2 SiC kompozisyonu (Sierchuła, 2021).	28
Tablo 2.3 Doğal kurşun kompozisyonu (Chadwick vd., 2006).	29
Tablo 2.4 Kurşun soğutucu özellikleri (X. Wang, 2017).	29
Tablo 2.5 Referans DFR _s konsepti geometrisine ait parametreler (cm) (X. Wang, 2017)....	32
Tablo 2.6 Yapı malzemesi kompozisyonu (X Wang, 2017a).	32
Tablo 2.7 İkili ve üçlü yakıt sistemindeki bileşimlere ait yoğunluklar.	35
Tablo 2.8 Yakıtta bulunan plütinyum bileşimi (Shelley vd., 2022).	36
Tablo 2.9 Üçlü yakıt sisteminin ötektik noktadaki kompozisyonları (mol %) (Dumaire vd., 2022).	37
Tablo 2.10 Referans DFR _m konsepti geometrisine ait parametreler (cm) (Sierchuła, 2021).	39
Tablo 2.11 Katı yavaşlatıcılara ait malzeme özellikler (Tiftikci, 2024).	42
Tablo 2.12 DFR konseptleri için önerilen malzemeler.	44
Tablo 4.1 Farklı ikili yakıt sistemi kompozisyonları (wt. %).	53
Tablo 4.2 ThCl ₄ -PuCl ₃ blanketi kompozisyonu.	62
Tablo 4.3 Üçlü yakıt kompozisyonları (wt. %).	72
Tablo 4.4 İkili yakıtlara ait doppler katsayıları (pcm/ΔK).	79
Tablo 4.5 İkili yakıtlara ait soğutucu katsayıları (pcm/ΔK).	81
Tablo 4.6 İkili yakıtlara ait yavaşlatıcı katsayıları (pcm/ΔK).	82
Tablo 4.7 Üçlü yakıtlara ait doppler katsayıları (pcm/ΔK).	83
Tablo 4.8 Üçlü yakıtlara ait soğutucu katsayıları (pcm/ΔK).	84

Tablo 4.9 Üçlü yakıtlara ait yavaşlatıcı katsayıları (pcm/ ΔK).....	84
Tablo 4.10 DFR _m yakıt kompozisyonları (wt.%).....	85
Tablo 4.11 DFR _m Doppler katsayıları (pcm/ ΔK).....	91
Tablo 4.12 Yavaşlatıcı katsayısı (pcm/ ΔK).....	92
Tablo 4.13 DFR _m soğutucu katsayıları (pcm/ ΔK).	93



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Dünya’da kaynakların enerji üretimindeki dağılımı (EI vd., 2023).	3
Şekil 1.2 Ükelere göre nükleer reaktör verileri (IAEA, 2023a).	5
Şekil 1.3 ARE tasarımı (Bettis, Schroeder, vd., 1957).	9
Şekil 1.4 a) 1950’li ve b) 1960’lı yıllara ait iki akışlı reaktör tasarımları (LeBlanc, 2011).	10
Şekil 1.5 MSBR Şeması (Bettis & Robertson, 1969; LeBlanc, 2011).	12
Şekil 1.6 Avrupa Birliği MSR Projeleri kronolojisi (IAEA, 2023b).	14
Şekil 1.7 MSFR Tasarım (X. Wang, 2017).	15
Şekil 1.8 TMSR Tasarımı (Zou vd., 2018).	16
Şekil 1.9 DFR Sistemi (Lewitz vd., 2020).	17
Şekil 1.10 AD-DFR Sistem geometrisi (Bak vd., 2019).	18
Şekil 1.11 Standart konteynır içerisinde smDFR (X. Wang vd., 2019).	18
Şekil 2.1 DFR-600M tasarımında yakıt ve soğutucu döngüsü (Dual fluid, 2022).	22
Şekil 2.2 DFR-600M reaktör geometrisi (Dual Fluid, 2023).	24
Şekil 2.3 ²⁰⁸ Pb yakalama (üst) ve elastik (alt) saçılma tesir kesiti (OECD NEA., 2024).	30
Şekil 2.4 DFR _s reaktörünün a) radyal b) eksenel geometrisi.	31
Şekil 2.5 ²³² Th yakalama tesir kesiti (OECD NEA., 2024).	33
Şekil 2.6 Klor elastik saçılma (OECD NEA., 2024).	33
Şekil 2.7 Klor yakalama tesir kesiti (OECD NEA., 2024).	34
Şekil 2.8 ThCl ₄ - PuCl ₃ yakıtı faz diyagramı (Dumaire vd., 2022).	34
Şekil 2.9 Üçlü yakıt sistemine ait faz diyagramı (Dumaire vd., 2022).	37
Şekil 2.10 DFR _m reaktörünün a) kor, b) plenum ve eksenel görüntüsü.	38
Şekil 2.11 U-Mn (sol) ve U-Fe (sağ) yakıtlarına ait faz diyagramları (ASM International, 1992).	40
Şekil 4.1 DFR _s konsepti için referans ((U-Pu)Cl ₃) ve bu çalışma sonuçları.	51
Şekil 4.2 DFR _m konsepti için referans U-Cr ve bu çalışma sonuçları.	51

Şekil 4.3 Farklı ^{239}Pu kompozisyonları içeren ikili yakıt sistemi için yanmaya göre k_{eff} değişimi.....	54
Şekil 4.4 Referans DFR _s geometrisinde $^{51}\text{P40}$ yakıtı için önemli izotopların değişimi.....	56
Şekil 4.5 a) plenumdaki birim hücre, b) kordaki birim hücre geometrisi.....	57
Şekil 4.6 DFR _s konsepti yakıt hücresinde $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığının etkisi.	58
Şekil 4.7 $^{20}\text{P40}$ yakıtı için $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.	58
Şekil 4.8 Referans DFR _s geometrisinde $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığının k_{eff} değişimi üzerindeki etkisi.	59
Şekil 4.9 Farklı ikili yakıt kompozisyonları için $\text{YH}_{1,85}$ kullanımının k_{eff} üzerindeki etkisi.	60
Şekil 4.10 $^{20}\text{P40}$ yakıtı için MgO-BeO kalınlığının k_{eff} değeri üzerindeki etkisi.....	61
Şekil 4.11 Farklı DFR _s geometrilerinde $^{60}\text{P40}$ yakıt kullanımının k_{eff} üzerindeki etkisi. ..	62
Şekil 4.12 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketi bulunan geometride farklı yakıt kompozisyonlarının yanma ile değişen k_{eff} üzerindeki etkisi.	63
Şekil 4.13 Önerilen katı yavaşlatıcıların DFR _s nötron spektrumundaki etkisi.	65
Şekil 4.14 Termal DFR _s konseptinde önemli izotopların yanmaya bağlı değişimi.	67
Şekil 4.15 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin kullanıldığı geometrilerdeki önemli izotopların yanmaya bağlı değişimi – kısım 1.....	68
Şekil 4.16 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin kullanıldığı geometrilerdeki önemli izotopların yanmaya bağlı değişimi – kısım 2.....	69
Şekil 4.17 Termal DFR _s konseptinde $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin kullanımında önemli izotopların yanma boyunca davranışları.	71
Şekil 4.18 Farklı ^{239}Pu kompozisyonları içeren üçlü yakıt sistemi için yanmaya göre k_{eff} değişimi.....	73
Şekil 4.19 $^{5}\text{P40}$ yakıtı için $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.....	74
Şekil 4.20 Farklı üçlü yakıt kompozisyonları için $\text{YH}_{1,85}$ kullanımının k_{eff} üzerindeki etkisi.	74
Şekil 4.21 Farklı DFR _s geometrilerinde $^{60}\text{P40}$ yakıtının k_{eff} üzerindeki etkisi.....	75
Şekil 4.22 Önemli izotopların farklı geometrilerdeki yanmaya bağlı değişimi– kısım 1.....	76
Şekil 4.23 Önemli izotopların farklı geometrilerdeki yanmaya bağlı değişimi– kısım 2.....	77

Şekil 4.24 U-Mn ve U-Fe yakıtları için yanma ile k_{eff} değerindeki değişim.	85
Şekil 4.25 U-Fe yakıtı için MgO-BeO kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.	87
Şekil 4.26 U-Mn yakıtı için MgO-BeO kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.	87
Şekil 4.27 DFR _m konseptinde MgO-BeO malzemesinin k_{eff} üzerindeki etkisi.	88
Şekil 4.28 DFR _m konsepti nötron enerji spektrumu.	89
Şekil 4.29 Metalik yakıt izotoplarının yanma boyunca değişimi.	90



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ρ	: Yoğunluk (g/cm^3)
k	: Isı iletim katsayısı ($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$)
μ	: Dinamik vizkozite ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
ν	: Kinematik vizkozite (m^2/s)
C_p	: Özgül Isı Kapasitesi ($\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$)
w	: Kütlece yüzdelik oranı
α_F	: Yakıt (Doppler) sıcaklık katsayısı (pcm/K)
α_C	: Soğutucu sıcaklık katsayısı (pcm/K)
α_M	: Yavaşlatıcı sıcaklık katsayısı (pcm/K)
T	: Sıcaklık (K)

Kısaltmalar

AEC	: Atomic Energy Commission
AD-DFR	: Accelerator-Driven Dual Fluid Reactor
AHTR	: Advanced High-Temperature Reactor
ALISA	: Assessment of Liquid Salts for Innovative Applications
ARE	: Aircraft Reactor Experiment
CAS	: Chinese Academy of Sciences
CANDU	: Canada Deuterium-Uranium
CVD	: Chemical Vapor Deposition
DFR	: Dual Fluid Reactor
DMSR	: Denatured Molten Salt Reactor
EROI	: Energy Return on Investment
EVOL	: Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor
EURATOM	: European Atomic Energy Community
FHR	: Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactor
GFR	: Gas-Cooled Fast Reactor
IEA	: International Energy Agency
IFK	: Institute of Solid State Nuclear Physics
IMSR	: Integrated Molten Salt Reactor
LFR	: Lead-Cooled Fast Reactor
LWR	: Light Water Reactor
MOSART	: Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter

MOST	: Molten Salt Reactor Technology
MSBR	: Molten Salt Breeder Reactor
MSFR	: Molten Salt Fast Reactor
MSR	: Molten Salt Reactor
MSRE	: Molten Salt Reactor Experiment
ORNL	: Oak Ridge National Laboratory
P&T	: Partitioning and Transmutation
PPU	: Pyrochemical Processing Unit
PWR	: Pressurized Water Reactor
ROSATOM	: Russian State Atomic Energy Corporation
SAMOFAR	: Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor
SAMOSAFER	: Severe Accident Modelling and Safety Assessment for Liquid-fuel Energy Reactors
SCWR	: Supercritical Water-Cooled Reactor
SINAP	: Shanghai Institute of Applied Physics
SFR	: Sodium-Cooled Fast Reactor
smDFR	: Small Modular Double Fluid Reactor
SSR	: Stable Salt Reactor
THORIUMS-NES	: Thorium Molten Salt Synergetic System
TMSR	: Thorium Molten Salt Reactor
TRISO	: Tristructural-Isotropic
VHTR	: Very-High-Temperature Reactor

1. GİRİŞ

Endüstriyel devrimin dünyaya yayılmasıyla birlikte ülkeler, ekonomik ve sosyal gelişim süreçleri yaşamaya başlamıştır. Günümüzde hala devam eden bu gelişmeler enerji ihtiyacını sürekli artırmaktadır. Endüstriyel devrimin başlangıcından beri enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kömür, doğalgaz, petrol gibi birçok fosil yakıt çeşidi kullanılmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması sonucunda gerçekleşen CO₂ emisyonu sera gazı efekti oluşturarak küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır (Arrhenius, 1896; Çakar vd., 2022; Kartal, 2022). Fosil yakıtlar, iklim değişikliğine neden olmaları ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almamaları gibi dezavantajlara sahiptir. Piwowarska (2023) tarafından yapılan çalışmaya göre bugüne kadar kullanılan oranda fosil yakıt kullanmaya devam ederse petrolün 44 yıl, doğal gazın ise 55 yıl içerisinde tükeneceği öngörülmektedir. Bu süre kömür ve linyit yakıtları için ise sırasıyla 205 yıl ve 247 yıl olarak öngörülmektedir (Piwowarska, 2023). Günümüzde bu tür fosil yakıtların kullanımı sonucu oluşan sera gazı emisyonunun yaklaşık %25'inden enerji sektörü sorumludur (IEA, 2021). Bu nedenle, küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini önlemek amacıyla enerji sektörüne önemli bir rol düşmektedir.

Enerji sektöründe fosil yakıtların kullanımı sonucunda salınan CO₂ miktarını sınırlandırmak için global bir çaba vardır. Bunun en belirgin örneği, 12 Aralık 2015 tarihinde yapılan Paris Anlaşması'dır (UNCCC, 2016). Bu anlaşma kapsamında temel amaç ortalama küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi dönemdeki sıcaklık seviyesinden maksimum 1,5°C fazla olacak şekilde sınırlandırmaktır (UNCCC, 2016). Bu hedefe ulaşmak için, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) harekete geçmiş ve CO₂ emisyonlarını 2050 yılına kadar net sıfıra indirme hedefi için bir yol haritası hazırlamıştır (IEA, 2021). Bu hedef kapsamında fosil yakıtların tüketilmesi en aza indirgenmeye çalışırken, güneş, rüzgâr,

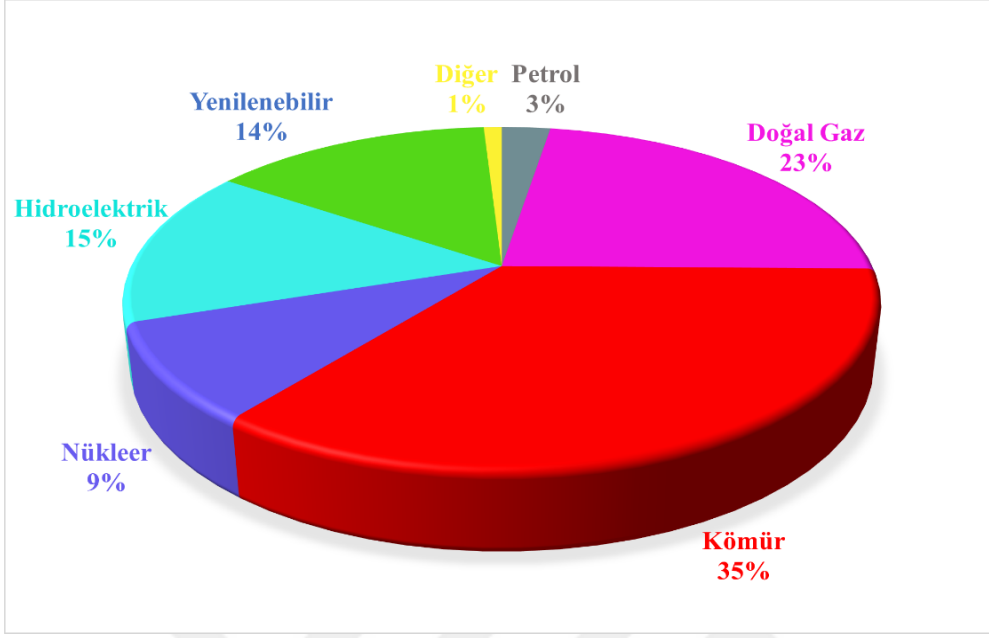
hidroelektrik gibi yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Tablo 1.1 Bazı yakıtlara ait enerji yoğunlukları (Bersano vd., 2020).

Yakıt	Uranyum	Kömür	Doğal gaz	Odun	Dizel	Ham Petrol
Enerji Yoğunluğu [MW/kg]	3 900 000	24	55	16	45	44

Günümüzde temiz enerjiye geçiş konusunda düşük-karbon teknolojisinin temelini oluşturmaları sebebiyle hidroelektrik ve nükleer enerji kaynağı kullanan sistemlere büyük rol düşmektedir (Alwaeli & Mannheim, 2022; Çakar vd., 2022; IEA, 2021; NEA & IEA, 2019). Burada özellikle nükleer enerji, diğer enerji türlerine göre daha az yakıt kullanarak daha yüksek güç kapasitesine sahip olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır (Bersano vd., 2020; Právělie & Bandoc, 2018). Tablo 1.1’de günümüzde nükleer enerji santrallerinde yakıt olarak kullanılan uranyuma ve diğer fosil yakıt türlerine ait enerji yoğunlukları verilmiştir. Burada nükleer enerjinin diğer fosil yakıtlara kıyasla çok daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir.

Nükleer enerjinin net sıfır hedeflerine ulaşma doğrultusunda göz ardı edilemeyecek avantajları bulunmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı günümüzde nükleer enerji, enerji üretim sektöründe aktif rol oynamaktadır. Şekil 1.1’de verilen grafikte görüldüğü gibi 2022 yılı verilerine göre dünyada enerji üretiminde nükleer enerji elektrik ihtiyacının %9’unu karşılamaktadır. Burada en yüksek pay %35 ile fosil yakıtlardan biri olan kömüre aittir. Temiz enerji kaynaklarından biri olan hidroelektrik enerji ise %15 oranında paya sahip olarak enerji üretiminde en çok paya sahip olan üçüncü enerji kaynağı olarak yerini almaktadır. IEA’nın 2023 Enerji Teknolojileri Perspektifindeki verilere göre ise nükleer enerji, 2050 yılında enerji üretiminde %12’lik bir paya sahip olacaktır (IEA, 2023).



Şekil 1.1 Dünya’da kaynakların enerji üretimindeki dağılımı (EI vd., 2023).

Diğer enerji türlerine göre her ne kadar büyük avantajlara sahip olsalar da nükleer enerji sistemlerinin de dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan biri nükleer santrallerdeki karmaşık güvenlik sistemleri, bu sistemlerin maliyeti ve kullanılmış yakıtın depolanma sorunudur. Günümüzde de nükleer santrallerde radyoaktif izotopların sızıntısını önlemek amacıyla birçok koruyucu katmanın yanı sıra aktif ve pasif güvenlik sistemleri kullanılmaktadır. Nükleer reaktörlerin bu sistemler sayesinde güvenli olduğu bilinse de Çernobil (1986) ve Fukushima Daichii (2011) gibi kazalar meydana gelebilmektedir (Duman, 2011; Prăvălie & Bandoc, 2018). Ancak bu kazalar sayesinde ülkeler gereken dersleri çıkararak kazaların gerçekleştiği dönemde işletimde olan bu tür reaktörleri denetimden geçirmiş ve gerekli iyileştirmelerin yapılmasının yanı sıra ek güvenlik önlemleri almaya başlamışlardır (Duman, 2011). Ülkeler sadece mevcut reaktörleri düzeltmenin yanı sıra nükleer enerji politikalarını gözden geçirip yeniliğe gitmişlerdir.

Fukuşima kazasının ardından nükleer enerji konusunda en katı atılım Almanya tarafından gerçekleştirilmiştir. 2011 yılının mart ayında Almanya’nın üç eyaletinde seçimlerin olması ve halkın bazı kesimlerinin nükleere karşı olması, hükümetin bu konuda bazı adımlar atmasına sebep olmuş ve sonuç olarak o dönemde işletimde olan bazı nükleer reaktörler

durdurulmuş bazıları ise geçici olarak kapatılmıştır. Her ne kadar nükleer reaktörler testleri başarıyla geçmiş olsalar da Almanya'nın yenilenebilir enerjide öncü olma isteğiyle beraber nükleer enerji ile elektrik üretimini durdurma kararı alınmıştır. Bu kararla beraber 2022 yılına kadar tüm nükleer reaktörleri aşamalı olarak kapatmak için çalışmalara başlanmış ve 2022 yılında tüm reaktörler kapatılmıştır (IAEA, 2023a; Jahn & Korolczuk, 2012).

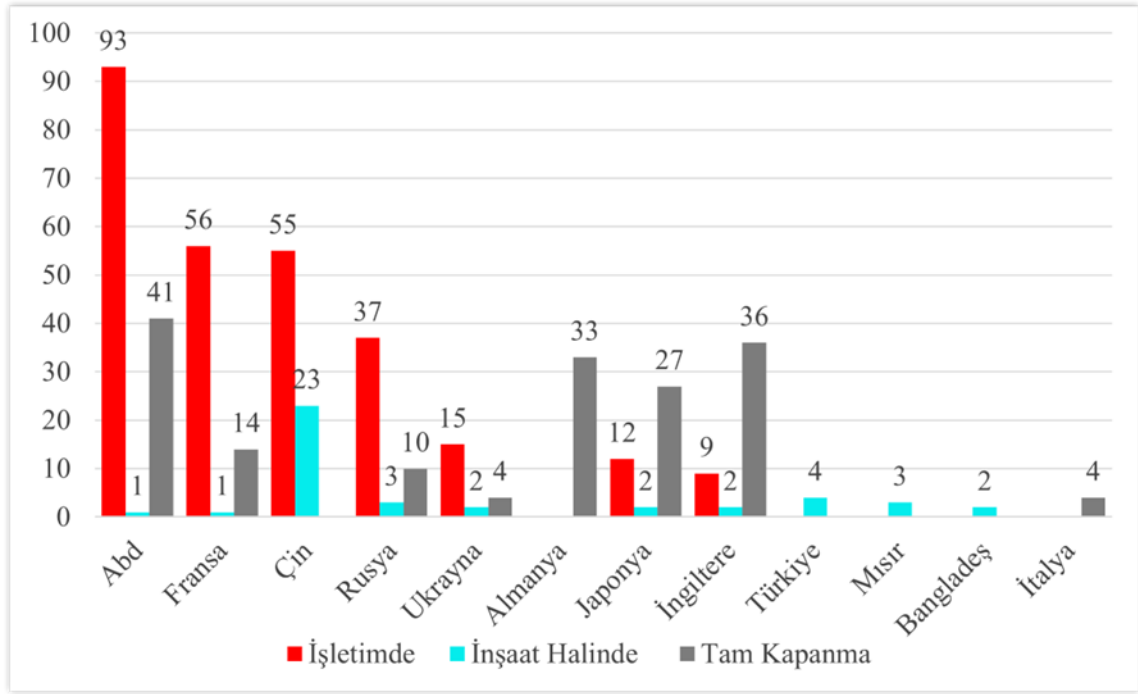
İtalya'da ise Çernobil kazası öncesinde dört adet nükleer enerji santrali işletilmiştir. Ancak Çernobil kazası sonucunda 1987 yılında nükleere karşı seçim yapılarak nükleer enerjiyi terk etme kararı verilmiştir. O dönemde İtalya'da üç reaktör işletimde, iki reaktör inşa aşamasındadır. Konuyu tekrar değerlendirmek amacıyla İtalyan hükümeti 2011 yılının haziran ayı için başka bir seçim planlamıştır. Ancak bu seçimde İtalya halkının büyük çoğunluğu 2011 yılının mart ayında gerçekleşen Fukushima kazasının meydana gelmesi sebebiyle nükleere karşı oy kullanmıştır (Bersano vd., 2020).

Kazanın gerçekleştiği Japonya'da ise ülkenin 2021 yılının kasım ayında yayınladığı 6. Temel Enerji Planı taslağına göre, yeni nükleer reaktörlerinin inşası için onay verilmiştir ve işletimde olan tüm nükleer reaktörler 1990 yılına kadar kalıcı olarak kapatılmıştır (Bersano vd., 2020; Jahn & Korolczuk, 2012). Ayrıca, Japonya'da ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı nükleer enerji tekrar gündeme gelmiştir ve enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara öncelik verilerek, nükleer enerji ise halk güveni ve güvenlik çerçevesi içinde kullanılmaya devam edilmesine karar verilmiştir (METI, 2021).

Kazaların sonucunda nükleer alanda tüm ülkeler farklı politikalar izlese de nükleer enerjinin kullanımı günümüzde hâlâ devam etmektedir. Şekil 1.2'de verilen 2022 yılı verilerine göre Japonya'da 12 adet nükleer reaktör işletimde, 2 adet ise inşa aşamasındadır. 93 nükleer reaktörle dünyada en fazla nükleer reaktör işleten ABD, son yıllarda nükleer enerjinin yanı sıra yenilenebilir enerji sistemlerine de yönelmiştir (Çakar vd., 2022; IAEA, 2023a).

Nükleer enerji sektöründe önde gelen ülkeler (ABD, Rusya, Çin, Fransa) dışında bazı ülkeler nükleer enerji kullanım oranlarını düşürürken, Türkiye, Mısır ve Bangladeş gibi ülkelerde enerji ihtiyacının bir kısmını karşılamak için nükleer enerjiyi kullanma kararı

alınmıştır. Rusya Devlet Atom Enerjisi Kurumu (ROSATOM) ile gerçekleştirdikleri anlaşmalar sonucunda Şekil 1.2’de verilen grafiğe göre 2022 yılı itibariyle Türkiye’de 4, Mısır’da 3, ve Bangladeş’te ise 2 nükleer reaktör ise kurulum aşamasındadır (IAEA, 2023a; ROSATOM, 2016).



Şekil 1.2 Ülkelere göre nükleer reaktör verileri (IAEA, 2023a).

Kullanılmış yakıtların depolanması tüm kapatılmış, işletimde ve ileride işleme alınacak reaktörler için nükleer enerji kullanımının bir diğer ana problemidir. Bu problem, ulusal organizasyonların yanı sıra uluslararası bir organizasyon olan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından katı bir şekilde denetlenerek kontrol altında tutulmaktadır (Prăvălie & Bandoc, 2018). Ayrıca IAEA, nükleer teknolojilerin barışçıl amaçlarla kullanılmasını teşvik etmektedir. 1968’te imzalanan Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması (NPT) çerçevesinde IAEA’nın en önemli görevlerinden biri de depolanan nükleer atıkların güvenliğinin yanı sıra, nükleer atıkların askeri amaçlarla kullanımını önlemektir (Text of the Treaty for Non-Proliferation of Nuclear Weapons, 2015; U.S. Delegation, 2010).

Nükleer enerjinin düşük-karbon teknolojisinin öncülerinden olmasının yanı sıra yüksek güç yoğunluğuna sahip olması özellikleriyle 2050 hedefleri doğrultusunda, gelecekte enerji üretimine söz sahibi olacağını aşikârdır (IEA, 2023). Nükleer enerjinin dezavantajlarını azaltmak ve çözmek için günümüzde kullanılan nükleer reaktörlerin geliştirilmesi ve yenilenmesine yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu amaçla, Uluslararası IV. Nesil Forumu (GIF) kurularak günümüzdeki nükleer reaktörlerin dezavantajlarının azaltan yeni nesil nükleer reaktör sistemleri önerilerek geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.1. Yeni Nesil Nükleer Reaktörler

Gelecekte nükleer enerji sistemlerinin enerji üretiminde önemli bir rol oynaması için Ar-Ge çalışmalarının mevcut problemleri çözmeye yönelik olması gerekmektedir (GIF, 2022; U.S. DOE, 2002). Bu doğrultuda, on ülke 2000 yılında Uluslararası IV Nesil Forumu (GIF) kurarak IV. Nesil sistemlerin geliştirilmesini hedeflemiştir. Burada temel amaç, seçilen nükleer reaktör tasarımlarının yaklaşık 2030 yılına kadar kullanıma hazır hale getirilmesidir. Bu hedef doğrultusunda GIF tarafından Tablo 1.2’de özellikleri verilen altı nükleer reaktör tasarımı seçilmiştir. Bu reaktör tasarımlarının seçiminde sürdürülebilirlik, ekonomi, güvenlik ve emniyet, nükleer silahların yayılmasına karşı direnç olmak üzere dört temel hedef göz önünde bulundurulmuştur. Bu doğrultuda altı reaktör tasarımı seçilmiştir. Bunlar; Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör (LFR), Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör (SFR), Çok-Yüksek Sıcaklık Reaktörü (VHTR), Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR), Gaz-Soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR) ve Süperkritik Su-Soğutmalı Reaktör (SCWR) sistemleridir (GIF, 2022; U.S. DOE, 2002). Seçilen altı reaktör tasarımı arasında MSR, günümüzde nükleer reaktör tasarımlarında kullanılan katı yakıt yerine ergimiş yakıt kullanması nedeniyle devrimsel niteliğe sahip bir reaktör tasarımı olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 1.2 IV. Nesil reaktörlere ait temel parametreler (Sierchuła, 2021; U.S. DOE, 2002).

Sistem	Nötron Spektrumu	Yakıt	Yakıt Çevrimi	Soğutucu	Basınç	Çalışma Sıcaklığı (°C)
LFR	Hızlı	U-Pu	Kapalı	Pb / Pb-Bi	Düşük	750– 800
VHTR	Termal	TRISO, grafit kompaktları n içinde UOC; ZrC kaplamalı	Açık	He	Yüksek	900– 1000
SCWR	Termal/Hızlı	UO ₂	Açık/ Kapalı	H ₂ O	Çok yüksek	510– 625
GFR	Hızlı	(U-Pu)C/SiC	Kapalı	He/ CO ₂	Yüksek /Çok yüksek	800– 850
MSR/ MSFR	Termal/Hızlı	Tuz	Kapalı	Florür tuzları	Düşük	750 – 1000/ 700 – 800
SFR	Hızlı	U-Pu-Zr	Kapalı	Na	Düşük	500 – 550

MSR tasarımlarının kullanılmış yakıtlardan faydalanma özelliği nükleer silahların yayılmasını önleme hedefine hizmet verebilmektedir. Ayrıca MSR, tasarıma bağlı olarak epitermal veya hızlı üretken reaktör özelliği ile kendi yakıtını üretilip yakıt gereksinimini minimize edebilmektedir (Sierchuła, 2021; U.S. DOE, 2002). MSR’ler atmosferik basınca yakın basınçlarda çalışabilmektedirler. Bu özellikleri ile Basınçlı Su Reaktörleri’nin (PWR) gerektirdiği sistemlere (pompa, özel borulama sistemi) ihtiyaç duymazlar. (Sierchuła, 2021). Yüksek sıcaklıkta çalışan reaktörlerde olduğu gibi, MSR’de de hidrojen üretilir.

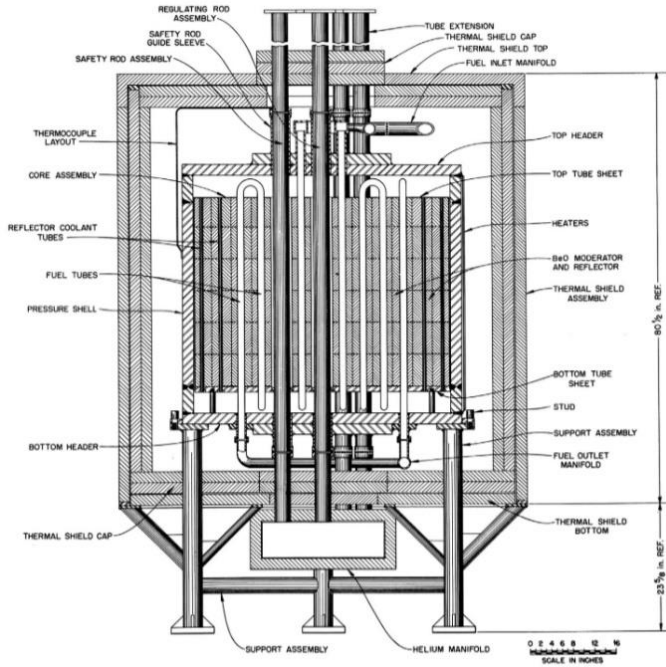
(U.S. DOE, 2002). Sıvı yakıt kullanımının getirdiği avantajlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir (Sierchuła, 2021; U.S. DOE, 2002; X. Wang, 2017).

- Yakıt çubuğu, zarf malzemesi gibi katı yakıt kullanılmamasından dolayı yakıt için gereken yapısal malzemelerin üretimine ve bu malzemelerin test edilmesine gerek yoktur.
- Sıvı yakıt kullanımından dolayı günümüzde kullanılan katı yakıtların erimesi sonucunda meydana gelen problemler ortadan kaldırılmıştır.
- Sıvı yakıt, çevrimiçi yakıt yeniden işlemeye elverişlidir. Bu da korda oluşan fazla reaktivitenin bertaraf edilmesini ve kor kontrolünü kolaylaştırır.
- Çevrimiçi yakıt döngüsü özelliği sayesinde yakıt yenileme işlemi için reaktörün kapatılmasına gerek yoktur. Ayrıca zincir fisyon reaksiyonu sonucu oluşan fisyon ürünleri çevrimiçi bir şekilde uzaklaştırılabilir
- Sıvı yakıt kullanımının getirdiği bir diğer özellik ise reaktördeki sıcaklık artışı fazla olduğunda erime tapası (melting fuse) eriyerek yakıt hava ile soğutulan tanklara boşalır ve burada katılaşarak radyoaktif salınımın önüne geçilir.

MSR'nin benzersiz özellikleri ve avantajları sayesinde bu reaktör hakkında birçok Ar-Ge çalışmaları yapılmış ve sonuç olarak çeşitli reaktör tasarımları önerilmiştir (Lewitz vd., 2020). Yapılan bu tez çalışmasında da MSR reaktörünün bir çeşidi olan Çift Akışkanlı Reaktör (DFR) konsept tasarımları nötronik açıdan incelenecektir. DFR, Gen IV Forumu'nda seçilen MSR ve LFR tasarımlarına ait özelliklerin birleştirildiği bir reaktör tasarımıdır. LFR tasarımı, soğutucu olarak kurşun veya kurşun-bizmut alaşımı kullanması ile ön plana çıkan bir reaktördür ve hızlı nötron spektrumunda çalışmaktadır. Hızlı nötron spektrumuna sahip olması nedeniyle kullanılmış yakıtlardan güç üretebilme potansiyeline sahiptir. LFR, kurşun soğutucu kullanması sonucunda diğer reaktör tasarımlarına göre daha küçük kor hacmine sahip olması yönünden ekonomik avantaja sahiptir. (GIF, 2022; U.S. DOE, 2002). Bu bölümde DFR tasarımı hakkında detaylı bilgi vermeden önce sıvı yakıt kullanan reaktör tasarımları hakkındaki gelişmeler değerlendirilecektir.

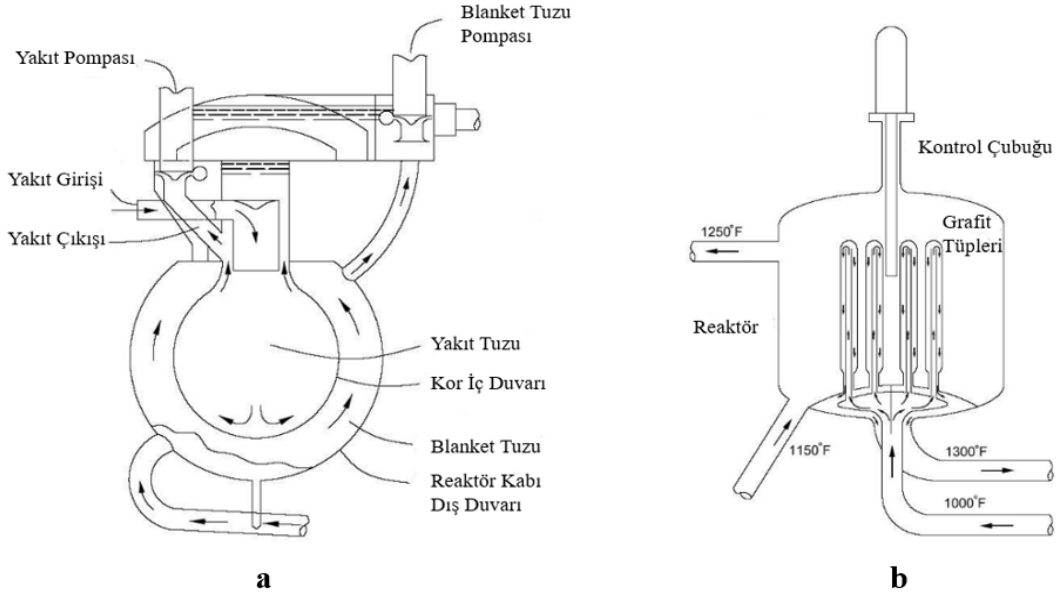
1.2. Sıvı Yakıtlı Reaktör Tasarımlarının Kısa Tarihçesi

MSR tasarımları, 1940'ların başında Amerika Birleşmiş Devletleri'nin nükleer güç ile çalışan bir bombalama uçağı yapma isteğı üzerine uçak nükleer güç sistemi programı (ANP) başlatılmıştır. Bu program sonucunda her ne kadar nükleer güç ile çalışan bir bombalama uçağı üretilmiş olmasa da bu konu hakkında bilgi birikimi edinilmiştir (IAEA, 2023b). Burada elde edilen tecrübe ile Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda (ORNL) Uçak Reaktörü Deneyi (ARE) adlı proje kapsamında ilk MSR kurulmuş ve ergimiş tuz üzerine kapsamlı deneyler yapılmaya başlanmıştır (IAEA, 2023b). Şekil 1.3 ile tasarımı verilen ARE, 3 Kasım 1954 tarihinde kritiklik seviyesine ulaşarak dokuz gün boyunca kararlı bir şekilde kimyasal ve mekanik problemler olmadan çalışmıştır (Bettis vd., 1957; X. Wang, 2017a). Bu reaktörde 52,8 mol% NaF, 41 mol% ZrF₄ ve 5,7 mol% yakıt tuzu bileşimi kullanılmıştır ve bu süre boyunca toplamda yaklaşık olarak 2,5 MW_{th} güç üretilmiştir.



Şekil 1.3 ARE tasarımı (Bettis, Schroeder, vd., 1957).

1950’li yıllarda ORNL’de, nükleer güç reaktörlerini hedef alan bir program kapsamında Th-²³³U çevrimi kullanan dönüştürücü ve üretken reaktör tasarımları geliştirme çalışmaları başlamıştır. Şekil 1.4’ün sol tarafındaki görselde verilen geometriye sahip iki akışkanlı reaktör tasarımında küresel sistemde merkezde ergimiş yakıt tuzu ve çevresinde ise ergimiş ThF₄ tuzu olacak şekilde iki akışkan tuz bulunmaktadır. Bu tasarım, çevresinde akan ThF₄ tuzu sayesinde üretken reaktör olarak kullanılabilme özelliğine sahiptir (Alexander vd., 1959; Bettis, Cottrell, vd., 1957; Bettis, Schroeder, vd., 1957; X. Wang, 2017).



Şekil 1.4 a) 1950’li ve b) 1960’lı yıllara ait iki akışlı reaktör tasarımları (LeBlanc, 2011).

1960’lı yıllara kadar yapılan çalışmalar sonucunda uzun süreli kullanımlarda grafitin yakıt tuzuyla uzun vadeli etkileşime dayanıklı olduğu kanıtlanmıştır (LeBlanc, 2011; Robertson vd., 1970). Bu gelişme sonucunda çift akışkanlı reaktör tasarımı kurulum olanağı artmış ve Şekil 1.4’ün sağ tarafında şeması verilen yeni bir iki akışkanlı tasarım önerilmiştir (LeBlanc, 2011). Bu tasarımda grafit yakıt tüpü kullanılarak yakıt tuzu ve üretken tuzu birbirinden ayırmaktadır. Ayrıca bu tasarımda ThF₄ üretken tuzu aynı zamanda soğutucu olarak da kullanılmaktadır. Ancak tasarımda kullanılan çok sayıda grafit tüpü grafit çatlaması riskini artırmaktadır. Yüksek sıcaklık ve nötron akısı ortamındaki grafitin büzülmesi ve genişlemesi sonucunda kordaki yakıt tuzu ve üretken tuz oranı değişmektedir ve bu durum, kor içerisinde reaktivitede değişimlere yol açmaktadır. Tesisat sorunları

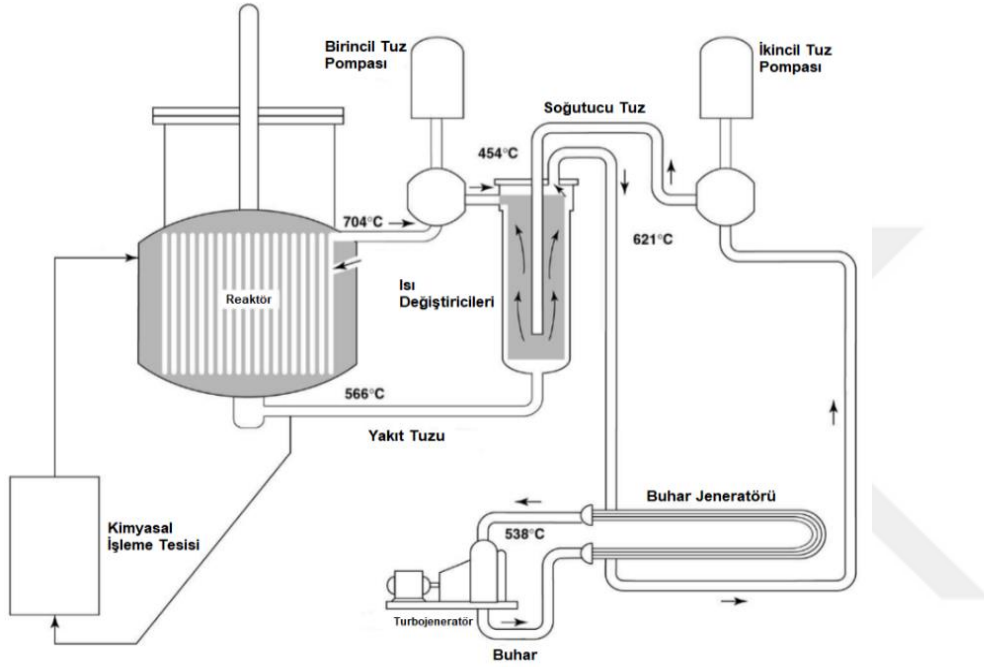
olarak adlandırılan bu problem ve tasarımın doğası gereği herhangi bir grafit tüpünde meydana gelen çatlama durumunda tüm korun değiştirilmesi gerektiğinden bu tasarım askıya alınmıştır (LeBlanc, 2010, 2011).

Aynı tarihlerde Ergimiş Tuz Reaktörü Deneyi (MSRE) deneyi başarılı bir şekilde devam etmektedir. Bu reaktör tasarımında sistemde tek akışkan olarak yakıt tuzu bulunmasından dolayı iki akışkanlı reaktöre göre daha basit geometriye sahiptir. 8 MW_{th} güce sahip MSRE, 1962 yılında operasyona başlatılmıştır. İki aşamadan oluşan deneyin ilk aşamasında reaktör, 1966 yılından itibaren iki yıl boyunca başarılı bir şekilde tüm güçte çalışmıştır. Toplam 5 yıl boyunca başarılı bir şekilde çalışması sonucunda Hastelloy-N malzemesinde sorunlar meydana gelmiştir. Bu sorunlardan biri fisyon ürünlerinden olan tellürün Hastelloy-N malzemesinde korozyona sebep olması, diğeri ise yüksek nötron radyasyonu sonucunda Hastelloy-N alaşımı içerisinde bulunan nikel ve bor elementlerinde (n,α) reaksiyonu sonucunda oluşan radyasyon hasarıdır. Bu yüzden nükleer reaktörlerde kullanılması planlanan Hastelloy-N alaşımının kor içerisinde değil, reaktör kabı malzemesi veya ısı değiştiricilerde kullanılması daha uygun görülmektedir (LeBlanc, 2011).

MSRE sonucunda elde edilen bir diğer önemli sonuç ise yakıt tuzunun kimyasal kararlılığı ve korozyonu ile ilgili problemlerdir. Projenin ikinci aşamasında ise yakıt tuzu üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu aşamanın tamamlanmasıyla beraber MSRE, ²³³U ile çalışan ilk reaktör olarak tarihe geçmiştir (LeBlanc, 2010, 2011; Robertson, 1965). İki akışkanlı reaktör tasarımının dezavantajlarının yanı sıra 1968 yılında geliştirilen “Sıvı Bizmut İndirgeme ile Ekstraksiyon” adlı fisyon ürünlerinin uzaklaştırılması metodu sonucunda toryum içeren yakıt tuzunun ayrıştırılabilir hale gelmesiyle ORNL, iki akışkanlı reaktör tasarımı hakkındaki çalışmalarını durdurmuştur (LeBlanc, 2010, 2011).

İki akışkanlı reaktörler üzerine çalışmaların durdurulmasının ardından ORNL’de yapılan çalışmalar ergimiş tuz yakıtı ve grafit yavaşlatıcıya sahip Ergimiş Tuzlu Üretken Reaktör (MSBR)’e yönelmiştir. Şekil 1.5 ile şeması verilen bu tasarım ayrıca günümüzde “geleneksel” MSBR tasarımı olarak da ele alınmaktadır. Nesil IV Uluslararası Forumu tarafından seçilen altı reaktörden biri olan MSBR, temel tasarımını günümüzde de büyük oranda korumaya devam etmektedir. 4,3 m yüksekliğe ve 5 m çapa sahip bu tasarım 1000

MWe güce sahiptir. MSBR programı 1970'li yılların başlarında teknik nedenlerden ziyade politik nedenler sonucunda Atomik Enerji Komisyonu (AEC) tarafından sonlandırılmıştır (Rosenthal vd., 1972).



Şekil 1.5 MSBR Şeması (Bettis & Robertson, 1969; LeBlanc, 2011).

İngiltere’de ise 1960’lı yıllarda 2,5 GWe güce sahip helyum soğutucu ve ergimiş plütonyum klorür yakıtı kullanan Ergimiş Tuzlu Hızlı Reaktör (MSFR) programı başlamıştır. Hızlı nötron spektrumunda çalışan MSR’ı öneren bu program fon yetersizliğinden dolayı sonlandırılmıştır (Smith vd., 1974; X. Wang, 2017).

MSFR programının sonlandırılmasının ardından ergimiş tuz reaktörleri tasarımları hakkındaki çalışmalar durgunluk dönemine girmiştir. 1970’li yıllarda öne çıkan nükleer silahların yayılmaması konusu ele alınarak Birleşmiş Milletlerdeki araştırmacılar tarafından 1000 MWe güce sahip denatüre edilmiş ^{235}U yakıtı kullanan Denatüre Edilmiş Ergimiş Tuz Reaktörü (DMSR) olarak adlandırılan konsept tasarım önerilmiştir.

DMSR’nin temel özelliği sürekli bir yakıt yeniden işleme prosesi olmadan yakıttan nötron zehri olarak da adlandırılan ^{135}Xe ve ^{149}Sm izotoplarının ayrıştırılması ve bu sırada gerekli

^{238}U miktarının yakıtı eklenmesiyle yakıt içerisindeki ^{235}U oranını korumaktır (LeBlanc, 2011; X. Wang, 2017). Başka bir ifadeyle “30 Yıl Tek Geçişli Tasarım” olarak da anılan DMSR tasarımının bir diğer özelliği düşük güç yoğunluğuna sahip olmasıdır, bu da reaktör içerisinde yavaşlatıcı olarak kullanılan grafitin ömrünü 30 yıla kadar uzatmıştır (LeBlanc, 2011; Zou vd., 2018).

1970’li yıllarda ise Rusya’da, Ergimiş Tuz Aktinit Geri Dönüştürücü ve Dönüştürücü (MOSART) tasarımını önermiştir. 2400 MW güce sahip olan bu reaktörde Hafif Sulu Reaktörler’den (LWR) alınan transuranik (TRU) elementlerin fisil izotoplara dönüştürülmesi ile güç üretimi hedeflenmiştir. MOSART’ın MSFR tasarımından en büyük farkı grafit yavaşlatıcı içermesidir.

Japonya, 1950 ile 1970 yılları arasında ORNL’de yürütülen MSR projelerinin sonuçlarından ve daha önce kendi yürüttükleri Toryum Ergimiş Tuz Sinerjik Sistemi (THORIUMS-NES) projelerinin sonuçlarından faydalanarak grafit yavaşlatıcıya sahip FUJI MSR tasarımını geliştirme ve bu teknolojiye bağlı hızlandırıcı sistemi üzerine çalışmalar yapmıştır. FUJI, MSBR ve DMSR tasarımlarının özelliklerinden faydalanarak geliştirilen bir seri konsept reaktör tasarımıdır. Grup reaktör tasarımı olarak $\text{Th-}^{233}\text{U}$ yakıt çevrimini kullanan ve sırasıyla 150 MW_e ve 200 MW_e güce sahip FUJI-II ve FUJI-U3 tasarımlarını geliştirmiştir. Ayrıca başlangıç yakıtı olarak plütonyum kullanan FUJI-Pu, küçük aktinitlerin dönüştürme yeteneği olan 1000 MW_e güce sahip süper FUJI tasarımlarını ve mini-FUJI güç santralini geliştirmiştir (IAEA, 2023b; X. Wang, 2017).

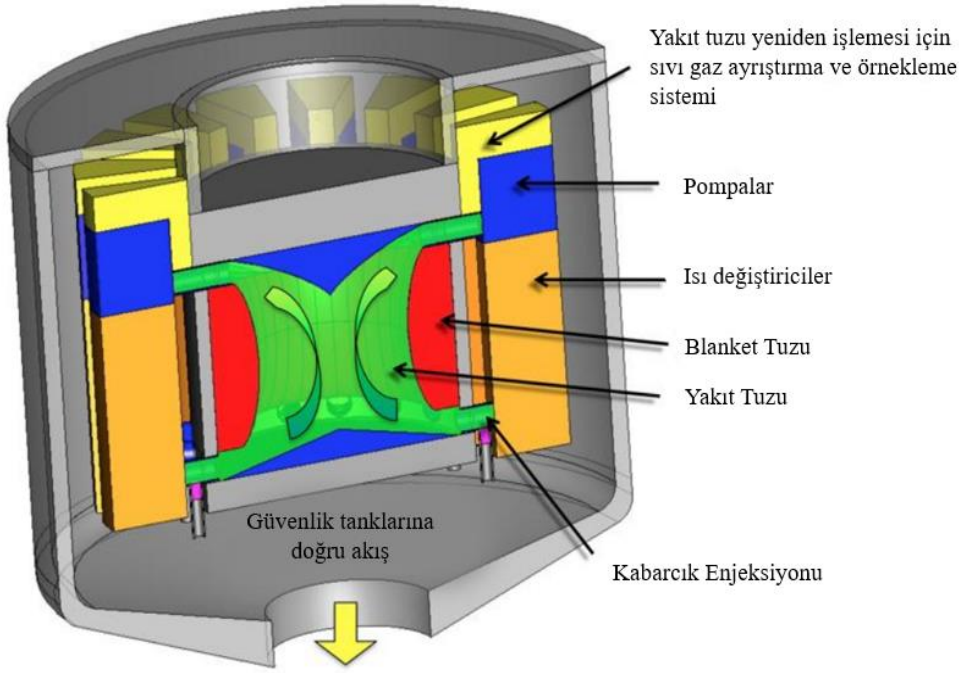
MSR tasarımının Nesil IV Uluslararası Forumu’nda seçilen altı reaktörden biri olması sebebiyle bu tasarım hakkındaki çalışmalar artmıştır. Sonuç olarak Avrupa’da MSR tasarımı hakkında birçok proje yapılmıştır. Yapılan projelerin amaçları ve kronolojisi Şekil 1.6 ile verilmiştir.



Şekil 1.6 Avrupa Birliği MSR Projeleri kronolojisi (IAEA, 2023b).

Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu (EURATOM) Beşinci Çerçeve Programı kapsamında Ergimiş Tuz Reaktör Teknolojisi (MOST) adlı bir proje başlatılmıştır. Bu projede geçmişten o güne MSR tasarımına ait veriler incelenerek MSR tasarımının uygulanabilirliği, karşılaşılabilecek zorluklar ve güvenlik analizini yapılmıştır (IAEA, 2023b; Renault & Delpech, 2005). MOST projesinin tamamlanmasının ardından MSR’de kullanılabilecek yakıt tuzlarının seçimini hedefleyen Yenilikçi Uygulamalar İçin Sıvı Tuzların Değerlendirilmesi Projesi (ALISA) başlatılmıştır. ALISA projesinin ardından Sıvı Yakıtlı Hızlı Reaktörün Değerlendirilmesi ve Uygulanabilirliği (EVOL) projesi başlatılmıştır. Bu proje kapsamında kapalı çevrimde ergimiş toryum/uranyum yakıt tuzu kullanan MSFR tasarımının termal hidrolik, nötronik ve güvenlik analizleri yapılmıştır.

MSFR reaktörünü ele alan bir diğer proje ise Ergimiş Tuzlu Hızlı Reaktörünün Değerlendirilmesidir (SAMOFAR). SAMOFAR projesi kapsamında çoklu fizik ve deneysel analizlerle Şekil 1.7’de geometrisi verilen MSFR tasarımı daha derinden araştırılmıştır.



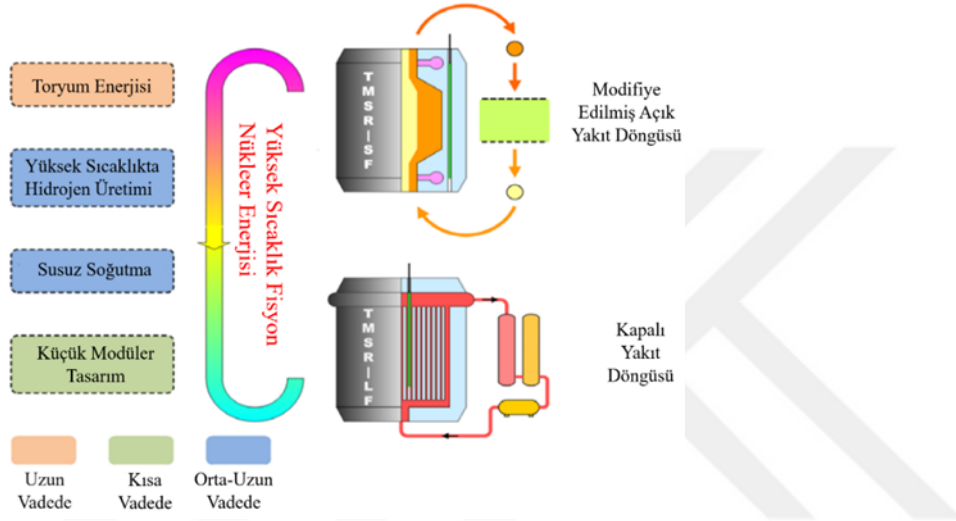
şekil 1.7 MSFR Tasarım (X. Wang, 2017).

2019 yılında ise dört yıl sürecek olan Sıvı Yakıtlı Enerji Reaktörleri İçin Ciddi Kaza Modellemesi ve Güvenlik Değerlendirmesi (SAMOSAfer) projesi başlamıştır. Bu projede, MSFR tasarımı için ergimiş yakıt tuzuna bağlı temel güvenlik kaygılarından olan kullanılan tuzun kor içerisinde donması, yeniden erimesi, fisyon sonucu oluşan izotopların sıvı yakıt tuzunun hareketiyle kor içerisinde dağılımı ve bunun sıcaklık, g ve doğal dolaşım üzerindeki etkileri, yakıt tuzunda meydana gelebilecek kimyasal değişimlerin araştırılması hedeflenmiştir (IAEA, 2023b).

Ergimiş tuz kullanan bir diğer reaktör tasarımı ise Gelişmiş Yüksek-Sıcaklık Reaktörü (AHTR), bir diğer adıyla Florür Tuzu-Soğutuculu Yüksek Sıcaklık Reaktörü'dr (FHR). Bu reaktörde katı yakıt ve katı yavaşlatıcı (grafit) kullanılırken soğutucu olarak ise ergimiş tuz kullanılmaktadır. AHTR'ye ait 5 MW_{th} gce sahip bir prototip şangay Nükleer Uygulamalı Fizik Enstitüsü'nde (SINAP) inşa halindedir.

Ocak 2011'de in'de, in Bilim Akademisi (CAS) tarafından toryum kullanımını ve 20-30 yıl gibi nispeten kısa bir süre içerisinde nükleer enerji ile hidrojen üretimini hedefleyen ve

Şekil 1.8 ile tasarımı verilen Toryum Ergimiş Tuz Reaktörü (TMSR) önerilmiştir. Bu reaktör tasarımı katı ve sıvı yakıt kullanılabilir. Katı yakıt kullanan TMSR tasarımı TMSR-SF, sıvı yakıt kullanılan tasarım ise TMSR-LF olarak adlandırılmaktadır. 2017 yılında 2MW_t güce sahip TMSR inşasına başlanmış raporlara göre 2019 yılında inşası tamamlanmıştır (IAEA, 2023b; Rosenthal vd., 1972; Zou vd., 2018).

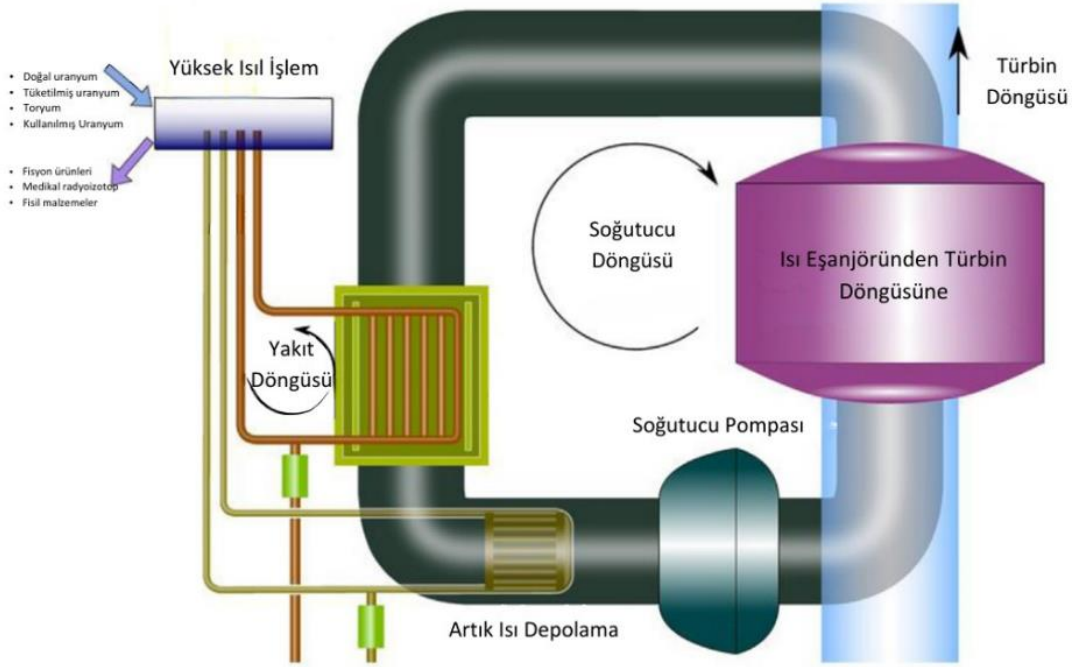


Şekil 1.8 TMSR Tasarımı (Zou vd., 2018).

Son yıllarda Küçük Modüler Reaktörlere (SMR) yönelik Kanada, SMR tasarımlarının arasında iki tane ergimiş yakıt kullanan reaktör tasarımı yer almaktadır. Bunlardan biri Terrestrial Enerji ve diğeri ise Moltex Enerji'dir. Terrestrial Enerji, bütünleşmiş ısı değıştiricilere sahip florür tuzu ve grafit yavaşlatıcı kullanan Entegre Erimiş Tuz Reaktörü (IMSR)'ı geliştirmektedir. Moltex Enerji ise Kanada Döteryum Uranyum (CANDU) reaktörleri tarafından kullanılmış yakıtı kullanmayı hedefleyen, hızlı spektrumda çalışan ve ergimiş klorür tuzu kullanan Kararlı Tuz Reaktörü olan SSR-W300'ü geliştirmektedir (IAEA, 2023b; X. Wang, 2017).

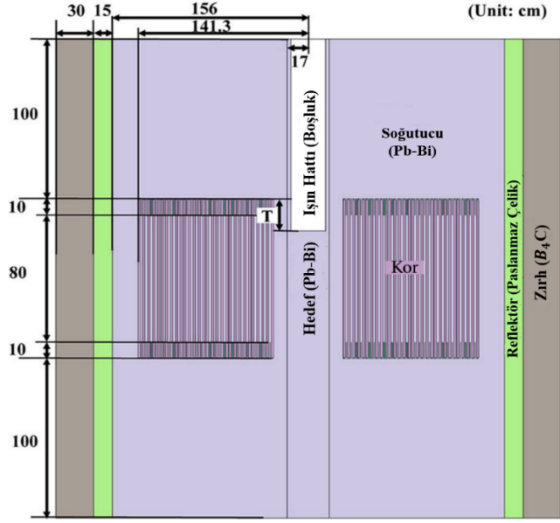
Almanya'da ise Katı Hal Nükleer Fiziği Enstitüsünde (IFK) bulunan araştırmacılar tarafından 1960'lı yıllarda çalışılan iki akışkanlı reaktör tasarımları gibi sistemde iki akışkan bulunan Çift Akışkanlı Reaktör (DFR) konsept tasarımı önerilmiştir (Huke vd., 2014). Sistem tasarımı Şekil 1.9 ile verilen bu tasarımın önceki iki akışkanlı reaktör tasarımlarından farkı bu tasarımdaki ikinci akışkanın ergimiş blanket tuzu yerine soğutucu

olarak görev yapan kurşun olmasıdır. Ayrı yakıt döngüsüne sahip olması nedeniyle DFR'de metalik yakıt kullanılabilir (Sierchuła vd., 2019a). Bundan dolayı DFR tasarımı için ergimiş yakıt tuzu kullanan DFR_s konseptinin yanı sıra metalik yakıt kullanan DFR_m konsept tasarımları önerilmiştir (Sierchuła vd., 2019a).



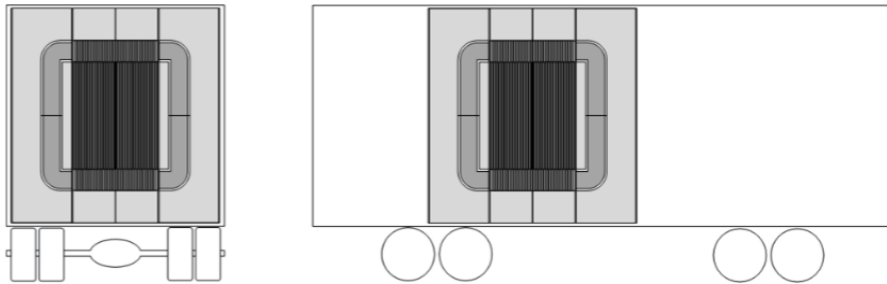
Şekil 1.9 DFR Sistemi (Lewitz vd., 2020).

Bir başka DFR tasarımı olarak ise soğutucu olarak PbBi ve yakıt olarak ise ergimiş NaCl-TRUCl₃ tuzu kullanarak küçük aktinitlerin dönüştürülmesini amaçlayan 800 MW_{th} güce sahip Hızlandırıcı Güdümlü Kritik Altı Çift Akışkanlı Reaktör sistemi AD-DFR önerilmiştir (Bak vd., 2019). AD-DFR tasarımına ait geometri Şekil 1.10 ile verilmiştir.



Şekil 1.10 AD-DFR Sistem geometrisi (Bak vd., 2019).

Son yıllarda nükleer güç alanında çalışmaların yoğunlaştığı ve birçok tasarımın önerildiği Küçük Modüler Reaktör (SMR) tasarımları arasında DFR, smDFR tasarımı ile yerini almıştır (Bak vd., 2019). Standart bir konteynıra sığabilecek boyutlara ve 2 MW_{th} güce sahip olan smDFR tasarımında soğutucu olarak kurşun ve yakıt olarak ise ergimiş (U-Pu)Cl₃ tuzu kullanılmaktadır (X. Wang vd., 2019). Standart konteynır içerisinde bulunan smDFR tasarımına ait görsel Şekil 1.11’de verilmiştir.



Şekil 1.11 Standart konteynır içerisinde smDFR (X. Wang vd., 2019).

Günümüzde DFR hakkındaki en güncel gelişme 2021 yılında Kanada-Alman nükleer firması olan “Dual Fluid” şirketinin kurulmasıdır. Dual fluid, Ruanda hükümeti ile yaptığı anlaşma ile DFR için bir tanıtım reaktörünün kurulmasına ve 2026 yılına kadar işleme alınmasını ve 2028 yılına kadar ise gereken testlerin tamamlanmasını hedeflenmektedir (Dual fluid, 2023). DFR hakkında birçok çalışma (Hanusek & Macian-Juan, 2022; Luo vd.,

2021; Sierchuła vd., 2019b, 2022; M. Wang vd., 2021; X. Wang, 2017; X. Wang & Macian-Juan, 2018) bulunsa da diğer nükleer reaktör sistemlerine göre yeni bir tasarım olması nedeniyle birçok yönden araştırmaya açık bir reaktör konseptidir.

1.3. Tez Kapsamı

Bu tez çalışmasında DFR konseptine ait reaktör ta DFR konseptleri için farklı yakıt malzemelerinin etkilerinin incelenmesi amacıyla bu çalışmada epitermal/hızlı nötron spektrumuna sahip DFR_s konsept tasarımında kullanılabilecek farklı yakıt tuzları, DFR_m için ise farklı metalik yakıt malzemelerinin nötronik etkileri incelenecektir.

Bu çalışmanın bir diğer hedefi ise, DFR kor ortamında kullanılabilecek yavaşlatıcı malzemeler önerilerek termal spektrumda çalışan DFR_s tasarımının değerlendirilmesidir. Termal DFR_s konseptinin önerilmesinin nedenleri;

- Termal reaktörler düşük fisil envanteri ve düşük üretme katsayısı ile, yüksek üretim katsayısına sahip hızlı reaktörlerde ulaşılan üreme performansı sağlayabilmektedir (IAEA, 1979).
- Hızlı nötronlar atomların yer değiştirmesine neden olarak mikroyapısal hasarlara yol açar, bu da malzemelerde şişme ve fiziksel özelliklerde önemli değişiklikler oluşturabilir. Bu nedenle, hızlı nötron spektrumunda çalışan reaktörlerde malzeme hasarı termal reaktörlere göre daha fazladır (Worrall vd., 2024). Bu, termal reaktörlerin malzeme hasarı nedeniyle ömrünün sınırlandırılmasını önler.
- Günümüzde nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılan uranyum miktarının aksine fertil izotop olan ²³²Th miktarı oldukça fazladır (Wider vd., 2007). Ayrıca termal reaktörlerde hızlı reaktörlerin aksine toryum-plütonyum yakıt döngüsüyle optimum performans elde edilmesi sonucunda toryum yakıt kullanımı tercih edilmektedir (IAEA, 1979).

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda DFR_s konsepti için yakıt olarak ThCl₄-PuCl₃ (ikili) ve MSR reaktörleri için gelecek vadede NaCl-ThCl₄-PuCl₃ (üçlü) yakıtları önerilmiştir. Termal DFR_s geometrisi elde etmek için (itriyum hidrat) YH_{1,85} ve magnezyum

oksit- berilyum oksit (MgO-BeO) olarak iki farklı katı yavaşlatıcı malzemesi önerilmiştir. DFR_s için önerilen her iki yakıt hem mevcut DFR_s tasarımında hem de termal DFR_s tasarımındaki nötronik davranışları incelenecektir.

Tez kapsamında ele alınan bir diğer DFR konsepti ise DFR_m'dir. DFR_m reaktör konsepti her ne kadar yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun olsa da reaktörde kullanılan U-Cr yakıtının MSR'lerde kullanılan yakıt tuzlarının erime sıcaklıklarından (~400 °C) daha yüksek erime sıcaklığına sahip olması yakıt sıcaklık aralığının düşük olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada reaktör çalışma sıcaklığı aralığının genişletilmesi amaçlanarak DFR_m konseptinde kullanılabilecek daha düşük erime sıcaklığına sahip U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilerek bu yakıtların nötronik davranışları incelenmiştir. Ayrıca bu konsept için yakıt tüpü olarak bu çalışma kapsamında önerilen katı yavaşlatıcılardan biri olan MgO-BeO önerilerek bu malzemenin nötronik davranışları incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, öncelikle tez kapsamında incelenen ayrı sıvı yakıt ve soğutucu döngüsüne sahip DFR sisteminin genel özellikleri ve reaktörün çalışma prensibi detaylandırılacaktır. Ardından, DFR tasarımının temel iki konsepti olan DFR_s ve DFR_m 'in geometrilerine ait parametreler ve her iki konseptte ortak kullanılan malzemelere ek bu çalışma kapsamında önerilen malzemelerin özellikleri kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. Bu bölümde sağlanan teorik bilgiler, çalışmanın amaçlarına uygun olarak DFR sistemlerinin tasarım ve performansını anlamak için gerekli temeli oluşturacaktır. Bu bölümde, çalışma kapsamında ele alınan malzemelerin reaktördeki performanslarının ve etkilerinin derinlemesine değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

2.1. DFR Sistemi

DFR, MSR ve LFR tasarımlarının en iyi özelliklerinin birleştirildiği, yakıt tüpleri içerisinde bulunan sıvı yakıtın ayrı döngüde sıvı soğutucu ile soğutulduğu bir reaktör tasarımıdır. Yaklaşık 1000 °C çalışma sıcaklığı ile yüksek sıcaklıkta çalışan reaktör sınıfına giren DFR, hızlı nötron spektrumunda çalışmaktadır. (Huke vd., 2015a, 2017a; X. Wang, 2017a; X. Wang vd., 2015). DFR, LFR tasarımından almış olduğu kurşun soğutucu kullanma özelliği sonucunda yüksek ısı transferi yeteneğine sahiptir. MSR tasarımından aldığı sıvı yakıt kullanma özelliği ile ise çevrimiçi yakıt yeniden işleme yeteneğine sahip olmaktadır. DFR'lerin MSR gibi sıvı yakıt ile çalışması, MSR'lerin sahip olduğu pasif güvenlik sistemlerini de içinde barındırmasına olanak sağlamaktadır. (Huke vd., 2017a). DFR tasarımını MSR'lerden ayıran en önemli özellik, yakıt ve soğutucunun ayrı döngülere sahip olmasıdır. DFR konsepti ergimiş tuz ve metalik yakıt kullanması sebebiyle sırasıyla DFR_s ve DFR_m olmak üzere iki farklı konsept tasarıma sahiptir. Her iki tasarımda benzer yakıt ve soğutucu döngüsüne sahiptir (Huke vd., 2017a). DFR'deki ayrı yakıt ve soğutucu döngüsünü daha açık bir şekilde tanıtılması amacıyla Şekil 2.1'de Dual Fluid şirketi tarafından tasarlanan DFR-600M tasarımında ait ergimiş yakıt ve kurşun soğutucu döngüleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1 DFR-600M tasarımında yakıt ve soğutucu döngüsü (Dual fluid, 2022).

DFR sistemindeki ele alınan ayrı yakıt ve soğutucu döngüsünün getirdiği avantajları şunlardır:

- Yakıt tüpleri içinde üretilen ısı daha verimli bir şekilde uzaklaştırılabilir (Huke vd., 2017).
- Ergimiş yakıt olarak saf seyreltilmemiş klorür yakıtların kullanımını mümkün kılar. Böylece, DFR tasarımının MSR ile aynı güç seviyesinde olduğu durumda daha küçük boyutlarda yakıt hacmi ve dolayısıyla daha küçük kor hacmine ulaşılabilir.
- Seyreltilmemiş klorür tuzunun pyro-kimyasal işleme birimindeki (PPU) prosesi MSR tasarımında kullanılan kompleks yakıt tuzu bileşimine göre daha kolaydır.
- Kor boyutunun küçülmesi ise DFR tasarımında yüksek sıcaklıklarda korozyona dirençli yapı malzemelerinin kullanımına olanak tanır.
- Yüksek korozyona dayanıklı malzemelerin kullanımı, ergimiş yakıt ve soğutucu kullanan bu reaktörün çalışma sıcaklığının yaklaşık 1000 °C olmasına imkân verir. Bu da DFR tasarımında kullanılabilecek yakıt olanağını ve yakıtların sıcaklığa bağlı güvenli çalışma aralığını genişletir (Huke vd., 2017).

DFR, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek sıcaklıklara ulaşmasının yanı sıra PPU döngüsü ile yakıtın yeniden işlenmesi sürecindeki ayırma ve dönüştürme (P&T) işlemlerini

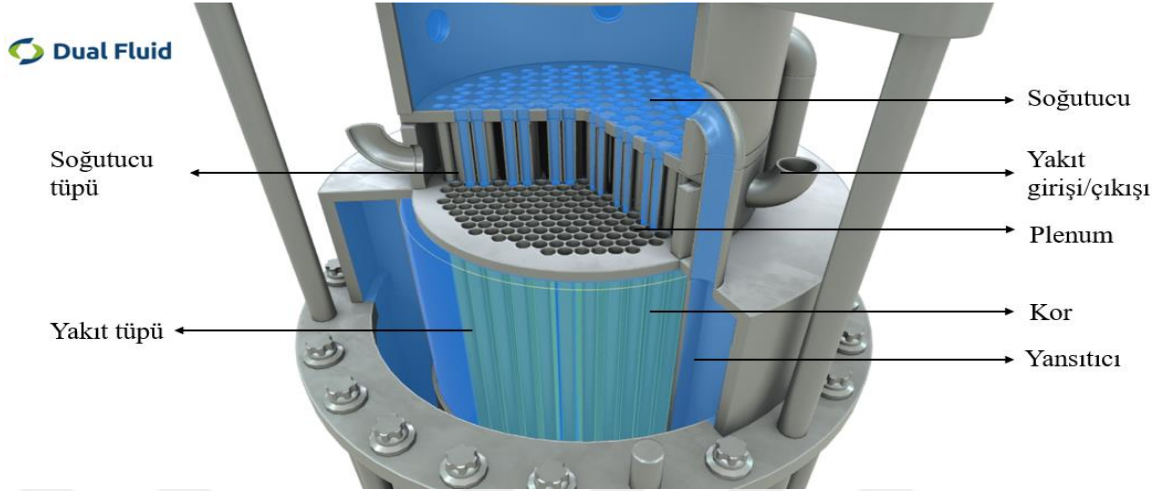
birleştirmektedir. Basitleştirilmiş yakıt yeniden işleme prosesi ile DFR tasarımı kullanılmış yakıt, toryum ve doğal uranyum kullanımı MSR sistemlerine göre daha kolaydır (Huke vd., 2017).

DFR tasarımını öne çıkaran bir diğer özellik ise bu reaktör tasarımının Yatırımın Enerji Getirisi (EROI) değerinin günümüzde kullanılan LWR'lerden 20 kat yüksek olmasıdır (Huke vd., 2014, 2015; Lewitz vd., 2020). DFR'nin yüksek çalışma sıcaklığına sahip olması nedeniyle malzeme seçeneğinin az olması ve kullanılabilir malzemelerin maliyetinin yüksek olması EROI değerini düşürse de kor boyutlarının küçük olması bu dezavantajın etkisini büyük ölçüde azaltmaktadır.

Bu çalışma kapsamında DFR tasarımının yukarıda sıralanan tüm avantajlara ek ve Bölüm 1.3'te bahsedildiği gibi birçok çalışma alanına açık olması sebebiyle farklı DFR konsept tasarımları için farklı yakıt ve malzemeler ele alınarak nötronik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerin ve sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla DFR tasarımının temel geometrik elemanları olan giriş/çıkış plenumu, reaktör koru, yansıtıcı ve bu elemanlarda kullanılan malzemelere ait özelliklerden bahsedilmektedir.

2.1.1. Kor geometrisi

DFR kor geometrisi silindirik bir yapıya sahiptir ve reaktörün merkezinde yer alır. Kor boyutları ulaşmak istenen reaktör gücüne göre değişebilmektedir. Ayrıca kor giriş ve çıkış plenumlarının arasında bulunur ve bunları birbirine bağlar. DFR'de kor, güç üretiminin büyük bir kısmının gerçekleştiği hacimdir. Korda tasarıma ve istenen güce bağlı olarak farklı geometride ve sayıda yakıt tüpleri bulunabilmektedir. Yakıt tüplerinin boyu plenum sınırlarına kadardır ve uzunluğu ise tasarıma göre değişmekte olup genellikle kor yüksekliği kadardır. Ayrıca, soğutucu olarak kurşun buradaki yakıt tüplerinin dış yüzeyinden akmaktadır (Sierchuła, 2021; X. Wang, 2017). DFR kor geometrisini temsil etmesi amacıyla Dual fluid şirketi tarafından tasarlanan DFRM-600M reaktörüne ait görsel Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 DFR-600M reaktör geometrisi (Dual Fluid, 2023).

2.1.2. Giriş/Çıkış Plenum Bölgesi

DFR plenum bölgelerinin temel amacı ergimiş yakıtı ve soğutucuyu kor içinde dağıtmaktır. Plenum bölgeleri kor ile aynı çapa sahip olacak şekilde giriş plenumu korun alt bölgesinde ve çıkış plenumu ise korun üst bölgesinde konumlanmıştır. Burada geometrisi yakıt tüpü çapına bağlı olarak değişen soğutucu tüpler bulunmaktadır. Bu soğutucu tüpler altıgen dizilime sahip olup merkezinde kordaki bir yakıt tüpü denk gelecek şekilde düzene ve adım aralığına sahiptir. Plenuma yakıt girişi reaktörün dış yüzeyindeki eşit aralıklarla dağıtılmış girişlerden sağlanmaktadır. Burada soğutucu, burada bulunan birçok soğutucu tüplerinin içerisinden akarken sıvı yakıt, bu tüplerin dış yüzeyinden akar. Böylece kordaki akış düzeninin tam tersi elde edilmektedir (Sierchuła, 2021; X. Wang, 2017). Plenum geometrisine ait temsili görsel Şekil 2.2’de verilmiştir.

2.1.3. Yansıtıcı

Yansıtıcı, koru ve plenumu çevreleyen bir kaptır. Temel görevi kordaki nötronların kaçmasını engellemek olan yansıtıcının bir diğer görevi ise zırhlamadır. DFR’de yansıtıcı aynı zamanda soğutucu olarak kullanılan sıvı kurşundan oluşmaktadır ve kalınlığı tasarıma göre değişebilmektedir. Yansıtıcı ile soğutucu malzemesinin aynı seçilmesinin nedeni reaktör tasarımının basitleştirmek ve reaktörde bulunan önemli bileşenlerin sıvı fazda

olmasını sağlamaktır (Huke vd., 2017; Sierchuła, 2021; X. Wang, 2017). DFR geometrisinde kullanılan yansıtıcıya ait görsel Şekil 2.2’de verilmiştir.

2.1.4. Blanket

Şekil 2.2’de verilen görselde blanket geometrisi de yansıtıcı geometrisine benzer yapıda olduğu ve yansıtıcıyı çevrelediği görülmektedir. Blanket, DFR’de temel reaktör elemanlarından değildir, bazı DFR tasarımlarında bu katman bulunmaz (örneğin DFR_m). Blanketin temel görevi, blanketi oluşturan fertil izotopların özelliği dolayısıyla fisil yakıt üretimidir. Blanket malzemesi ve geometrisi kullanılan yakıt kompozisyonuna ve tasarıma bağlı olarak değişebilmektedir (X. Wang, 2017).

2.1.5. Yakıt yeniden işleme

Ergimiş yakıt tuzu PPU ile çevrimiçi olarak yeniden işlenmektedir. PPU beslemesi LWR’lerden alınan kullanılmış yakıt tarafından yapılabilir. Burada yapılması gereken tek işlem oksitleri klorürlere çevirmektir ve bu işlem sahada yapılabilir. DFR, PPU çevrimi kullanarak P&T işlemini birleştirmektedir (Huke vd., 2017).

Büyük ölçüde basitleşen yakıt yeniden işleme süreci DFR’lerde kullanılabilen klorür tuzlarının düşük kaynama noktasına sahip olması bölme işlemi için ayrımsal damıtma yöntemi uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Burada uygulanan ayrımsal damıtma yöntemi, iki farklı sıvının farklı kaynama noktalarından faydalanılarak ayrıştırılması için geliştirilmiş bir yöntemdir (King, 1980). Böylece PPU’da MSR’de kullanılan yakıt tuzlarına göre çok daha kolay bir yeniden işleme süreci sunulur. Metal yakıt kullanan DFR tasarımında yakıt yeniden işleme prosesi ise PPU aşamasından önce ve sonrasına klorürleme ve indirgeme prosesi eklenerek gerçekleştirilebilir (Huke vd., 2017).

2.1.6. Yakıt ve soğutucu döngüsü

DFR konseptinde ergimiş yakıt SiC malzemesinden yapılmış yakıt tüpleri içerisinde akmaktadır. Yakıt tüpü geometrisi ve sayısı reaktör tasarım kriterlerini sağlayacak şekilde belirlenmektedir. Tüp içerisinde gerçekleşen zincir fisyon reaksiyonları sonucunda üretilen

ısı ise tüpün dış yüzeyinden akan kurşun soğutucu tarafından çekilmektedir. Kurşun soğutucu yüksek termal iletim katsayısına sahip olması nedeniyle ısı çekme işlemine çok hızlı ve verimli şekilde gerçekleştirmektedir. Soğutucu kurşun aynı zamanda yansıtıcı görevi üstlenerek büyük oranda nötronların kordan kaçmasını engellemektedir. Burada t p içerisinde akan yakıt çevrimi birincil çevrimi kurşun soğutucu ise ikincil çevrimi oluşturmaktadır (X. Wang, 2017).

Birincil çevrimde akan yakıt reaktöre içerisinde birçok soğutucu t p bulunan giriş plenumundan girmektedir. Plenumda yakıt bu soğutucu tüplerinin dış yüzeyinde akmaktadır. Plenumdaki ergimiş yakıt korda bulunan yakıt tüplerine dağıtılmaktadır. Kor içerisinde yakıt tüplerinden akan yakıt giriş plenumuyla aynı geometriye sahip olan çıkış plenumuna ulaşarak burada bulunan soğutucu tüplerinin dışında dağıtılarak yakıt yeniden işleme  nitesine (PPU) veya ihtiya a göre nihai depolama tankına gönderilir (Sierchu a, 2021).

 kincil çevrimde ise soğutucu kurşun kora korun alt kısmından, giriş plenumundan girerek burada bulunan soğutucu tüplerine dağıtılır. Plenumdan korda bulunan yakıt tüplerinin dışında akacak şekilde dağıtılan soğutucu, yukarı doğru hareket ederek giriş plenumuna ulaşır.  ıkış plenumunda ise tekrar soğutucu tüplerine dağıtılarak buradan ısı değiştirici, buhar jeneratörü vb. ekipmanlara doğru hareket ederek burada soğutulur. Soğutulan kurşunun tekrar giriş plenumuna gelmesiyle döngü yeniden başlamaktadır (Sierchu a, 2021; X. Wang, 2017).

2.1.7. DFR konseptlerinde ortak kullanılan malzemeler

DFR konseptlerinin benzer geometriye, benzer yakıt- soğutucu döngüsüne sahip olması ve birbirine yakın sıcaklıklarda çalışması nedeniyle yakıt tüpü olarak SiC ve soğutucu olarak kurşun kullanılmaktadır.

2.1.7.1. SiC

DFR konseptlerinde ayrı yakıt döngüsü ve soğutucu döngüsü korda bulunan yakıt tüpleri tarafından sağlanmaktadır. Dolayısıyla yakıt tüpü malzemesi seçimi büyük bir öneme

sahiptir. Malzeme seçiminde göz önünde bulundurulması gereken iki temel unsurdan biri DFR korundaki çalışma ortamı, diğeri ise yakıt tüpünün kordaki rolüdür. Seçilen yakıt tüpü malzemesinin DFR kor ortamındaki yüksek nötron akısı ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olması ve uzun süre bu çalışma ortamında meydana gelebilecek mekanik strese dayanıklı olması beklenmektedir. Ayrıca, yakıt tüpü malzemesinin hem soğutucu hem de yakıt ile direkt teması olmasından dolayı bu malzemelerle etkileşime girmemesi ve korozyona karşı dirençli olması gerekmektedir. Ayrıca nötron kaybını azaltmak için yakıt tüp malzemesinin soğurma tesir kesiti düşük olan malzemeden seçilmesi gerekmektedir. Bir diğer unsur olan yakıt tüpünün kordaki rolü nedeniyle malzemede bulunması gereken özellik ise yakıtta üretilen ısınn soğutucuya yüksek verimle iletebilme yeteneğı, başka bir deyişle ısı iletim katsayısının yüksek olması gerekmektedir. Bu özellikleri karşılayan malzemelere örnek olarak TiC, SiC, ZrC verilebilir. Piyasada bulunurluğunun daha fazla olması nedeniyle DFR konseptlerinde yakıt tüpü olarak SiC tercih edilmiştir (Sierchuła, 2021; X. Wang, 2017) .

Bileşiminde silisyum ve karbon içeren SiC, üstün mekanik özellikleri ve radyasyona karşı yüksek dirence sahip olması nedeniyle füzyon ve gelişmiş fisyon reaktörleri için cazip bir malzemedir (Ozawa vd., 2007). Ayrıca yüksek sıcaklık reaktörlerinde kullanılabilen en uygun malzemelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca SiC, TRISO yakıtının yapısında da bulunmaktadır. SiC, yüksek termal iletkenlik, yüksek sertlik ve iyi mekanik dayanıklılık özellikleriyle yakıt tüpü malzemesinden istenen özellikleri karşılamaktadır. SiC malzemesinin önemli özellikleri Tablo 2.1’de ve kompozisyonu is Tablo 2.2’de verilmiştir. SiC’ın kullanılması planlanan ortamda kurşun ile teması bulunması halinde Kimyasal Buhar Biriktirme CVD yöntemi ile boşluksuz SiC malzemesi üretilebilir. Bu yöntemle üretilen SiC, yaklaşık 1273 K sıcaklıklara kadar ergimiş kurşuna karşı yüksek korozyon direnci göstermesi ile DFR için uygun yapı malzemesi özelliğı taşır (Sierchuła, 2021; X. Wang, 2017).

Tablo 2.1 SiC özellikleri (X. Wang, 2017).

SiC	Formül	1200 K'deki değeri	Geçerli Aralık (K)
ρ (g/cm ³)	-	3,210	1000-2300
k (W/(m · K))	$\frac{6.11 \times 10^4}{T - 115}$	56,313	

Tablo 2.2 SiC kompozisyonu (Sierchuła, 2021).

Element	Kütlece %
Si	70,045
C	29,955

2.1.7.2. Kurşun

DFR konseptlerinde soğutucu ve reflektör olarak ergimiş kurşun kullanılmaktadır. Soğutucu malzeme seçimini yakıt tüpü malzemesinin seçiminde olduğu gibi kullanım ortamı ve kullanım amacı olmak üzere iki temel başlık altında değerlendirilebilir. İyi bir soğutucu malzemenin düşük viskozite, yüksek ısı kapasitesi, yüksek ısı iletim katsayısı özelliklerine ve düşük maliyete sahip olması beklenmektedir. Ancak DFR kor ortamında kullanılacak soğutucu malzemenin bu özelliklere sahip olması yeterli değildir. Burada kullanılacak soğutucunun yüksek nötron akı ortamında kararlılık göstermesi ve üstün özelliklerini kaybetmemesi beklenir. Zincir fisyon reaksiyonunun sürdürülebilmesinde hayati öneme sahip olan nötron sayısının azalmaması için soğutucu malzemesinin yakalama tesir kesitinin düşük olması gerekmektedir.

Yukarıda belirtilen özellikleri sağlamasının yanı sıra yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle DFR tasarımlarında soğutucu malzemesi olarak doğal kurşun seçilmiştir. Kurşunun atmosferik basınçtaki erime sıcaklığı yaklaşık olarak 600 K ve kaynama sıcaklığı yaklaşık ise 2020 K olup DFR işletim sıcaklığı için uygun bir aralığa sahiptir. Doğal kurşuna ait kompozisyon Tablo 2.3'de malzeme özellikleri ise Tablo 2.4'de ile verilmiştir.

Tablo 2.3 Doğal kurşun kompozisyonu (Chadwick vd., 2006).

İzotop	Kütlece yüzde oranı
²⁰⁴ Pb	1,4
²⁰⁶ Pb	24,1
²⁰⁷ Pb	22,1
²⁰⁸ Pb	52,4

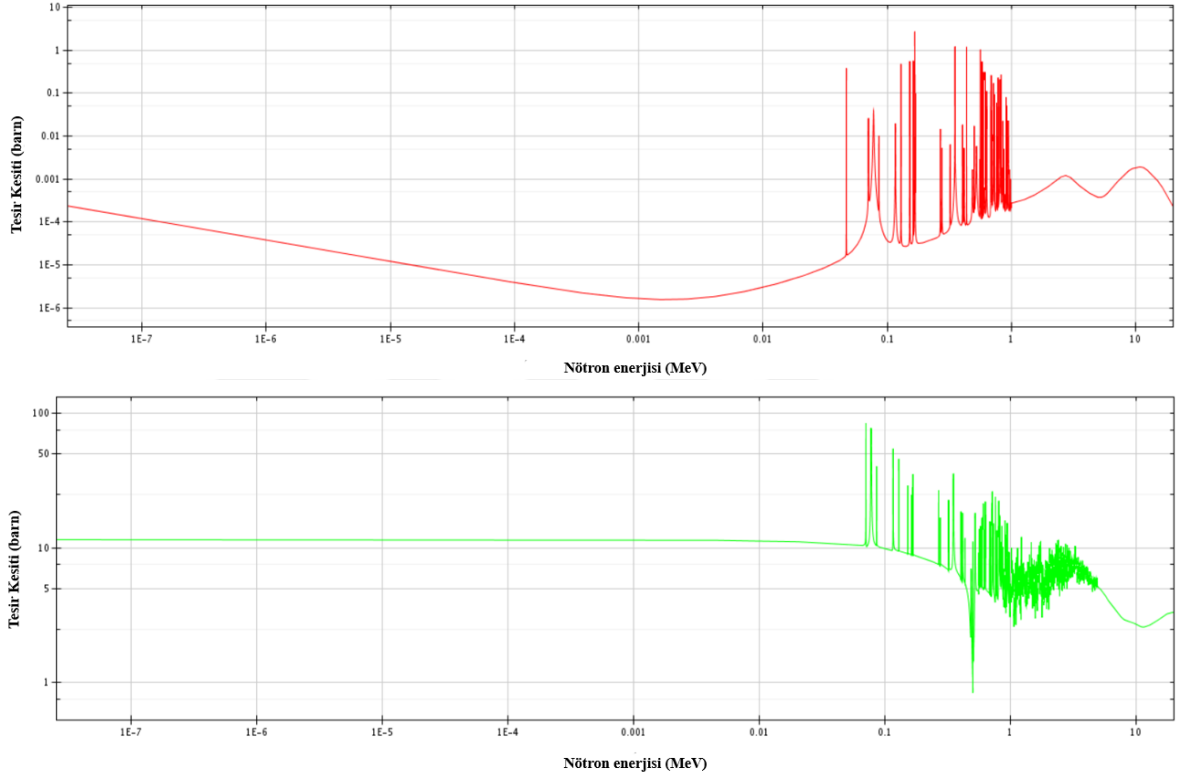
Tablo 2.4 Kurşun soğutucu özellikleri (X. Wang, 2017).

Özellik	Formül	Geçerli Aralık (K)
ρ (g/cm ³)	11.441-1.2795×T	600-2000
ν (m ² /s)	μ / ρ	600-1470
μ (Pa . s)	4,55×e ^{1069/T}	600-1470
k (W/(m . K))	9,2+0,011×T	600-1300
C_p (J/(kg . K))	176,2-4.923×T+1.544×T ² -1,524×T ²	600-1300

Kurşunun nötronik davranışını incelemek üzere Şekil 2.3'te doğal kurşun içeriğinde en yüksek değer olan %52,4 oranında bulunan ²⁰⁸Pb'a ait nötron yakalama tesir kesiti verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi düşük nötron enerjilerinde kurşunun yakalama tesir kesiti çok düşüktür ve hızlı nötron bölgesinde bu değer yükselmiştir. Ancak, bu yükselmeye rağmen kurşunun diğer malzemelere göre yakalama tesir kesiti ve dolayısıyla sistemdeki nötron kaybındaki etkisi çok düşüktür. Böylece kurşun hızlı nötron spektrumunda çalışan DFR için uygun bir malzeme olarak tanımlanmaktadır.

DFR tasarımında kurşun, soğutucu olarak kullanılmasının yanı sıra yansıtıcı görevi de üstlenmektedir. Soğutucu malzemede olduğu gibi yansıtıcı malzemeler için de nötronik açıdan değerlendirilmesi gereken en önemli unsur nötronlarla yaptığı elastik saçılma ve nötron yakalama reaksiyonu tesir kesitidir. Yansıtıcı malzemelerde nötron yakalama reaksiyonunun az ve elastik saçılma reaksiyonunun fazla olması beklenmektedir. Şekil

2.3'te verilen tesir kesitleri değerlendirildiğinde, bir yansıtıcı malzemesi için yakalama tesir kesitinin hızlı nötron enerjilerinde artması istenmeyen bir durumdur. Ancak her ne kadar tesir kesiti artsa da bu değerler nispeten düşük değerlerdir ve kurşunun reflektör olarak kullanılmasında bir engel teşkil etmemektedir.

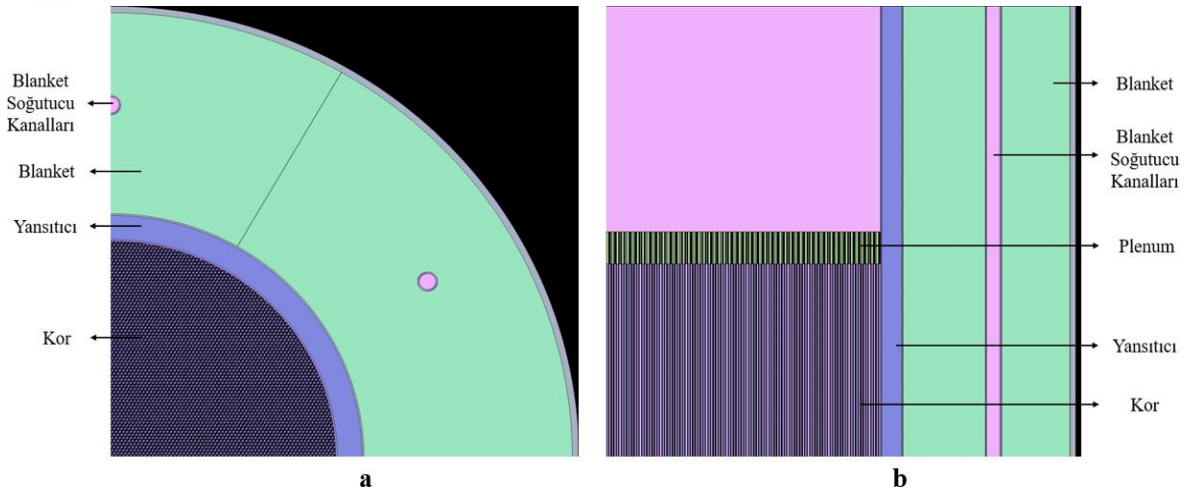


Şekil 2.3 ^{208}Pb yakalama (üst) ve elastik (alt) saçılma tesir kesiti (OECD NEA., 2024).

Kurşunun elastik saçılma tesir kesiti incelenecek olursa hızlı nötron enerjilerindeki yüksek elastik saçılma tesir kesiti kurşunu hızlı nötron spektrumunda çalışan DFR için ideal bir yansıtıcı ve zırh malzemesi konumuna getirmektedir. Sonuç olarak diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra nötronik özellikleri bakımından da kurşun iyi bir reflektör ve zırh malzemesi olarak değerlendirilerek DFR tasarımında soğutucu ve yansıtıcı malzemesi olarak seçilmiştir.

2.2. DFR_s konsepti

DFR_s tasarımını ele alan tez ve araştırma makalelerinde DFR_s'e ait 3 GWt ve 100 MWt güce sahip tasarımlar önerilmiştir (Liu vd., 2020; X. Wang, 2017). Bu çalışmada ele alınan referans DFR_s konseptinde ise 3 GWt güç üretilmektedir. Ergimiş yakıt tuzu kullanması nedeniyle DFR_s olarak adlandırılan bu konsept için bu çalışmada referans alınan tasarımda yakıt olarak ergimiş (U-Pu)Cl₃ tuzu kullanılmaktadır. Referans DFR_s geometrisine ait görsel Şekil 2.4, geometriye ait temel bilgiler Tablo 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.4 DFR_s reaktörünün a) radyal b) eksenel geometrisi.

DFR_s konseptinde reaktörün merkezinde bulunan korun yarı çapı 135 cm, yüksekliği ise 240 cm'dir. Korda SiC malzemesinden yapılmış olan 13 406 adet tamamlanmış yakıt tüpü bulunmaktadır. Burada tamamlanmış yakıt tüpü sayısının ayrıca belirtilmesinin nedeni SERPENT kodunda tanımlanan kor geometrisindeki sınırlarda tamamlanmamış yakıt tüplerinin mevcut olmasıdır. Altıgen dizilime sahip yakıt tüplerinin adım aralığı 2,2 cm olacak şekilde düzenlenmiştir. Her bir yakıt tüpünün iç yarı çapı 0,725 cm, dış yarıçapı 0,95 cm ve boyu ise kor uzunluğu ile aynı olacak şekilde 240 cm olarak tasarlanmıştır.

Her bir plenum yüksekliği 20 cm olmak üzere bu içerisinde birçok soğutucu tüpü bulunmaktadır. Plenumlarda altıgen dizilime sahip soğutucu tüplerinin içerisinde kurşun soğutucu akarken tüp dış yüzeyinde ise ergimiş yakıt tuzu akmaktadır ve böylece

plenumda, kordaki akış düzeninin tersi bir akış düzeni elde edilmektedir. Kor ve yansıtıcıyı ayırmak için arada 1 cm kalınlığında SiC malzemesi kullanılmıştır.

Tablo 2.5 Referans DFR_s konsepti geometrisine ait parametreler (cm) (X. Wang, 2017).

Parametre	Değer	Parametre	Değer
$r_{tüp,iç}$	0,725	R_{kor}	135
$r_{tüp,dış}$	0,95	Kor dış duvar kalınlığı	1
$L_{yakıt\ tüpü}$	240	Blanket kalınlığı	125
Adım aralığı	2,2	Yansıtıcı dış duvar kalınlığı	1
Tamamlanmış yakıt tüpü sayısı	13406	Blanket dış duvar kalınlığı	4
Yansıtıcı kalınlığı	15	R_{kor}	150
Plenum yüksekliği	20	$R_{reaktör}$	275

15 cm kalınlığa sahip yansıtıcı ile 125 cm kalınlığa sahip blanket arasında Tablo 2.6'da kompozisyonu verilen 1 cm kalınlığa sahip yapı malzemesi kullanılmaktadır. DFR_s tasarımının en dış katmanı olan reaktör kabı 4 cm kalınlığındadır ve yine Tablo 2.6'da kompozisyonu verilen malzemeden oluşmaktadır.

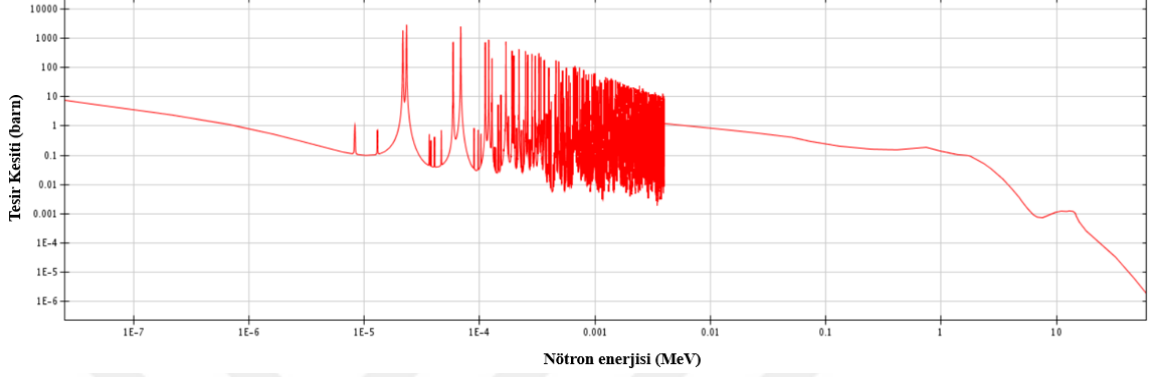
Tablo 2.6 Yapı malzemesi kompozisyonu (X Wang, 2017a).

İzotop	⁵⁵ Mn	Mo	Si	Ni	S	C	³¹ P	Fe
Kütlece %	1,500	0,500	0,030	0,500	0,035	0,250	0,035	97,150

2.2.1. İkili yakıt: ThCl₄-PuCl₃

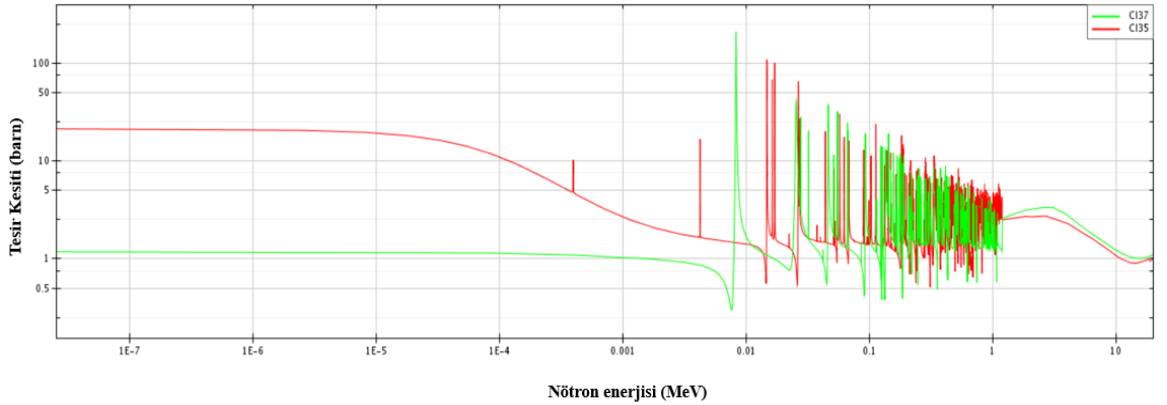
DFR_s tasarımında üretken malzeme olarak ²³⁸U izotopu U-Pu yakıtı içerisinde ve ²³⁸UCl₃ blanket malzemesinde kullanılmıştır. Ancak nükleer reaktörlerde fertil izotop olarak ²³²Th'de kullanılabilir. Şekil 2.5'te görülebileceği üzere ²³²Th, epitermal bölgedeki yüksek nötron yakalama tesir kesiti ile DFR reaktörü koşullarında üretken malzeme olarak kullanılmaya uygun bir izotoptur. Ayrıca, DFR_s, ayrı yakıt çevrimine sahip olmasıyla taşıyıcı seyreltilmemiş yakıt tuzlarının kullanımına elverişlidir. Bu özelliklerinden dolayı

DFR_s konsepti için ayrı bir taşıyıcı tuz bulunmayan ThCl₄-PuCl₃ yakıtının kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 2.5 ²³²Th yakalama tesir kesiti (OECD NEA., 2024).

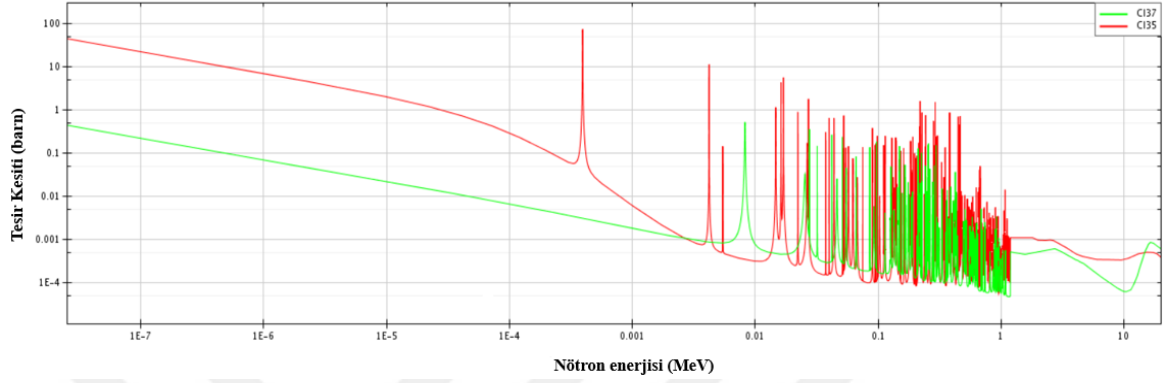
Ele alınan yakıtta seyreltici olarak kullanılan klor nötronik açıdan değerlendirilecek olursa Şekil 2.6'de verilen grafikte görülebileceği gibi düşük elastik saçılma tesir kesitiyle özellikle epitermal/hızlı spektrumda çalışan DFR_s için bir avantaj sağlamaktadır. Düşük elastik saçılma tesir kesiti sayesinde nötronlar yavaşlatılma miktarı düşük olur ve reaktördeki hızlı nötron popülasyonu korunur.



Şekil 2.6 Klor elastik saçılma (OECD NEA., 2024).

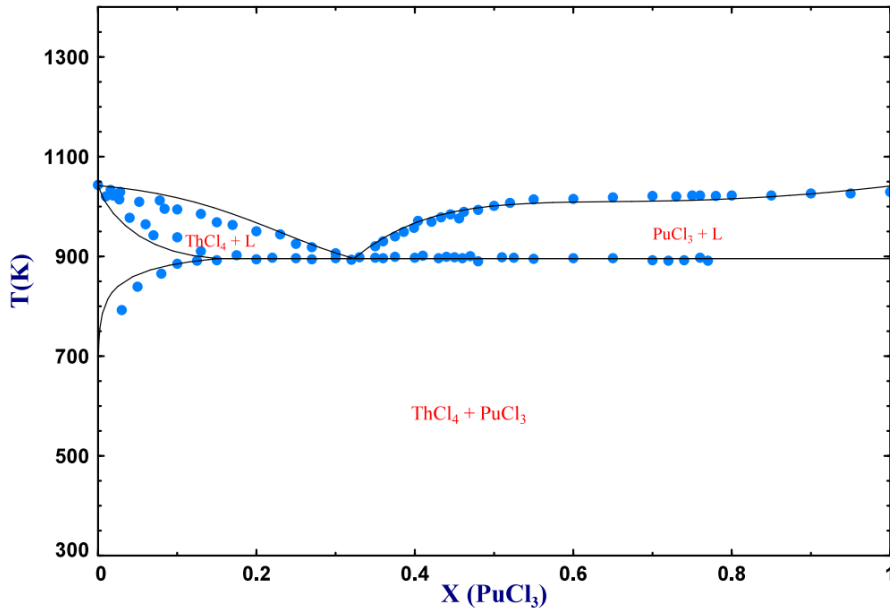
Klorun bir diğer önemli özelliği ise Şekil 2.7'de görülebileceği gibi özellikle yüksek enerjili nötronlar için düşük yakalama tesir kesitine sahip olmasıdır. Düşük yakalama tesir

kesiti sayesinde sistemde nötron kaybı azdır. Bu özelliklerden dolayı klor, hızlı nötron spektrumuna sahip DFR için uygun bir seyreltici malzeme olarak görev yapabilir.



Şekil 2.7 Klor yakalama tesir kesiti (OECD NEA., 2024).

Şekil 2.8'te görülebileceği gibi $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$, yakıtı 0,323 mol% PuCl_3 ve 0,677 mol% ThCl_4 bileşimi ile 895 K sıcaklıkta ötektik noktaya ulaşmaktadır. Bu erime sıcaklığının değeri MSR tuzlarına göre çok yüksek olsa da yaklaşık 1000 °C sıcaklıkta çalışan DFR_s konseptinde kullanılabilecek düzeydedir.



Şekil 2.8 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ yakıtı faz diyagramı (Dumaire vd., 2022).

ThCl₄-PuCl₃ yakıtını oluşturan PuCl₃ ve ThCl₄ bileşimlerine ait yoğunluk korelasyonları Tablo 2.7’de verilmiştir. İkili yakıt bileşimine ait belirli bir yoğunluk korelasyonu bulunmadığından dolayı yakıt içindeki her bir bileşenin yoğunlukları Tablo 4.1’de verilen korelasyonlar kullanılarak bağımsız olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak 1200 K sıcaklıktaki PuCl₃ bileşiminin yoğunluğu 4,1754 g/cm³, ThCl₄ bileşiği yoğunluğu ise 3,0857 g/cm³ olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.7 İkili ve üçlü yakıt sistemindeki bileşimlere ait yoğunluklar.

Bileşen	Formül	ρ (g/cm ³) @1200 K	Geçerli Aralık (K)
PuCl₃	5,0046 – 0,0006910×T	4,1754	1100 – 1300 (Duemmler vd., 2024)
ThCl₄	4,7537 – 0,00139 × T	3,0857	1000–1200 (G. Wang vd., 2023)
NaCl	2,1381 – 0,0005426×T	1,4869	1080- 1300 (Andersson & Beeler, 2022)

İkili yakıt sisteminin yoğunluğu ise karışımın yoğunluğunu hesaplamada kullanılan denklem (2.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sum_{i=1}^n \rho_i w_i \quad (2.1)$$

Bu denklemde w, elementinin kütlece oranını, ρ ise elementin yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu denklemin kullanılması sonucunda ikili yakıt sisteminin 1200 K sıcaklıktaki yoğunluğu 3,41884 g/cm³ olarak bulunmuştur. Çalışmada ele alınan ikili yakıt sistemindeki PuCl₃ bileşiminin içerisindeki plütonyum kütlece %4,95 zenginlikte ²³⁵U içeren yakıtı sahip VVER-1200 reaktörünün 60 GWd/t yanma seviyesine ulaşmasının ardından 10 yıl boyunca soğutulmuş olan tüketilmiş yakıttan elde edilmektedir. (Shelley vd., 2022). İlgili plütonyumun izotopik bileşimi Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8 Yakıtta bulunan plütonyum bileşimi (Shelley vd., 2022).

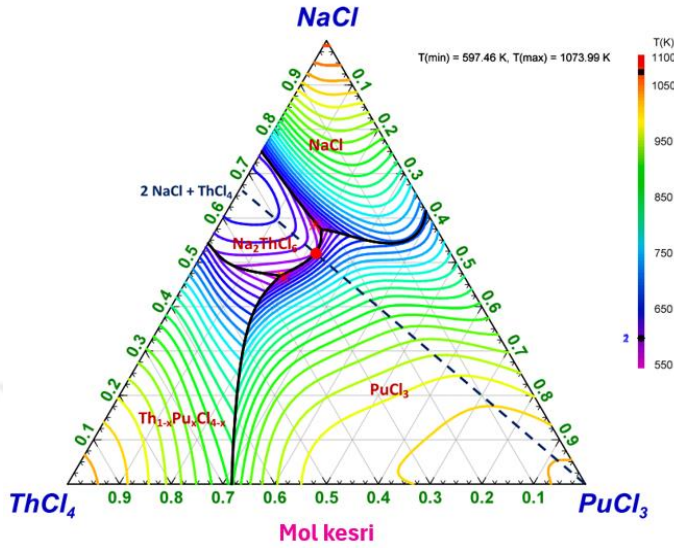
İzotop	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
Kütlece %	4,22	52,13	24,63	9,84	9,18

2.2.2. Üçlü yakıt: NaCl- ThCl₄-PuCl₃

Dumaire vd. (2022) tarafından yapılan çalışma sonucunda MSR reaktörleri için umut vaat eden üç sistemli bir yakıt tuzu kompozisyonu önerilmiştir; NaCl-ThCl₄-PuCl₃. DFR_s konseptinde her ne kadar ayrı yakıt döngüsü olmasından dolayı seyreltilmemiş yakıt tuzları kullanılabilir de ikili yakıt sistemine NaCl eklenmesiyle elde edilen NaCl-ThCl₄-PuCl₃ yakıtı daha düşük sıcaklıklarda ötektik noktaya ulaşabilir. Bu yakıtta ait avantajlar sıralanacak olursa;

- ThCl₄- PuCl₃ ikili yakıt sistemine göre daha düşük sıcaklıklarda ötektik noktaya ulaşması.
- NaCl'nin diğer MSR yakıt tuzlarında bulunan taşıyıcı tuzlara göre daha yaygın ve daha düşük maliyete sahip olması.
- İkili yakıt sistemine NaCl gibi klorür içeren bir taşıyıcı tuzun eklenmesiyle tüm bileşimler klor içermesiyle yakıt yeniden işleme sürecinin basite indirgenmesi.
- NaCl içerisinde bulunan ²³Na'nın özellikle hızlı nötron enerjilerinde düşük yakalama ve düşük elastik saçılma tesir kesitine sahip olması.
- İkili yakıt sistemine NaCl eklenmesiyle yakıt erime sıcaklığının yaklaşık 300 K kadar düşmesi olarak verilebilir.

Ayrıca ²³Na, özellikle yüksek enerjilerdeki düşük elastik saçılma tesir kesiti sayesinde hızlı nötron spektrumunda çalışan altı Gen IV reaktöründen biri olan SFR tasarımında da soğutucu olarak önerilmiştir. Bu da NaCl tuzunun epitermal/hızlı nötron spektrumuna sahip DFR tasarımında kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 2.9'da verilen faz diyagramında da görülebileceği gibi bu çalışmada ele alınan üçlü yakıt sistemine ait iki ötektik nokta bulunmaktadır.



Şekil 2.9 Üçlü yakıt sistemine ait faz diyagramı (Dumaire vd., 2022).

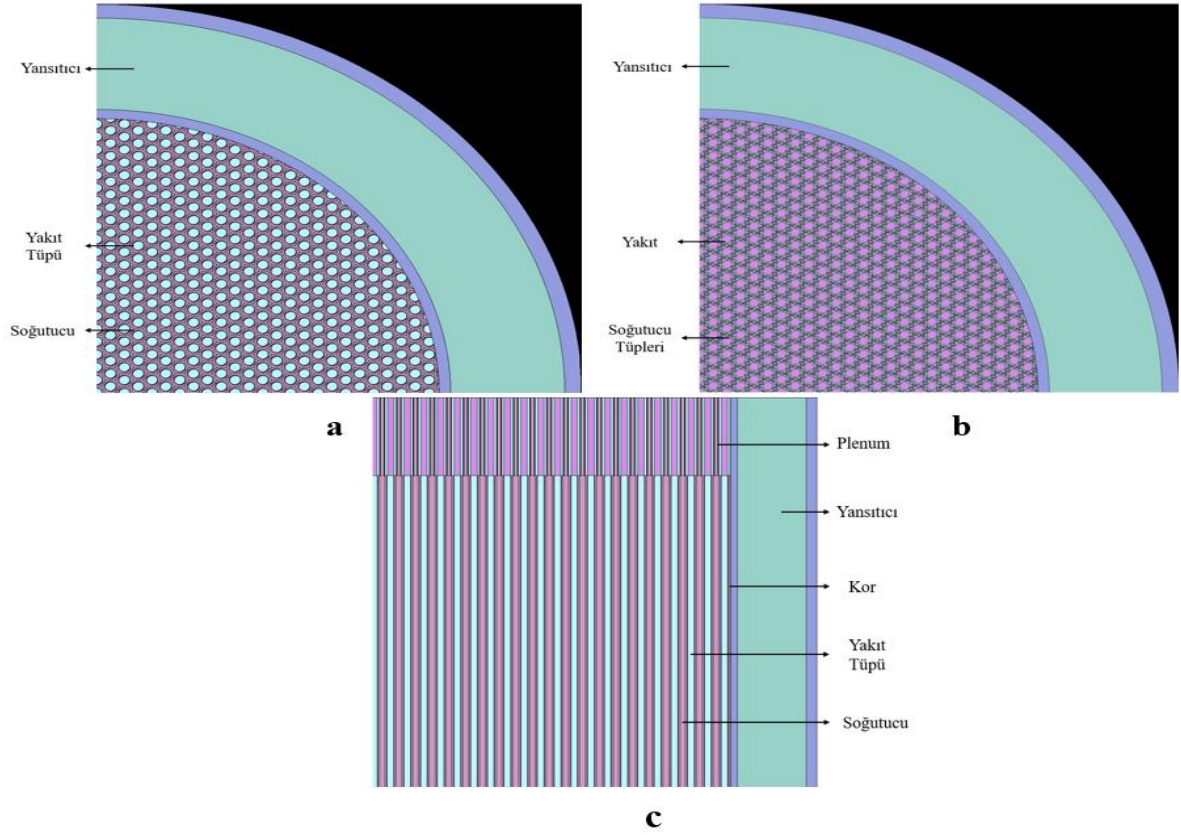
Diyagramda verilen ötektik noktalara ait veriler Tablo 2.9’da verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan üçlü yakıt sisteminde sadece ThCl_4 içeriği nispeten daha fazla olan Ötektik 1 yakıtı incelenmiştir. Yakıtı eklenen NaCl verileri Tablo 2.5’te verilen değerler ve denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Üçlü yakıt sistemi için hesaplamalar yapılırken ikili yakıt sistemi ile ortak olan bileşenler için ikili yakıt sistemindeki veriler kullanılmıştır.

Tablo 2.9 Üçlü yakıt sisteminin ötektik noktalardaki kompozisyonları (mol %) (Dumaire vd., 2022).

Bileşik	Sıcaklık (K)	X (NaCl)	X (ThCl_4)	X(PuCl_3)
Ötektik 1	597	0,470	0,354	0,176
Ötektik 2	598	0,574	0,223	0,203

2.3. DFR_m konsepti

DFR_m konsepti yakıt olarak ergimiş metalik yakıt kullanmaktadır. Bu çalışmanın referans aldığı DFR_m tasarımında ise 250 MW_t güç üreten ve yakıt olarak ötektik noktası 860 °C olan ergimiş U-Cr yakıt seçilmiştir. DFR_m tasarımına ait geometri Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10 DFR_m reaktörünün a) kor, b) plenum ve eksenel görüntüsü.

Referans çalışmada bu yakıtın seçilmesinin temel nedeni yüksek ısı iletkenlik katsayısına ve yüksek uranyum kompozisyonuna sahip olmasıdır. Yakıtın ötektik noktasındaki kompozisyonunda kütlece %4,78 Cr, %82,42 ²³⁸U ve %12,8 ²³⁵U bulunmaktadır. Hızlı nötron spektrumunda çalışan DFR_m için kromun bir diğer avantajı ise yüksek nötron enerjilerinde nispeten düşük nötron elastik saçılma ve nötron absorpsiyon tesir kesitine sahip olmasıdır. Böylece düşük kütlelerde yakıt kullanımı ve iyi nötron ekonomisiyle daha iyi güç üretim performansı elde edilebilmektedir.

Tablo 2.10'da geometri parametreleri verilen ve bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda kullanılan DFR_m geometrisinin merkezinde 60 cm yarıçapa ve 120 cm yüksekliğe sahip kor bulunur. Kor bölgesinde altıgen dizilime sahip 1666 adet yakıt tüpü bulunmaktadır. Adım aralığı 2,8 cm olan yakıt tüplerinin iç yarıçapı 0,95 cm ve dış yarıçapı

1,1 cm olacak şekilde tasarlanmıştır ve boyları kor yüksekliğiyle eşittir. Kor ile yansıtıcı arasında ise 2 cm kalınlığında SiC tabaka bulunmaktadır. 20 cm kalınlığa ve 150 cm uzunluğa sahip yansıtıcı bulunan bu tasarımda yakıt döngüsünün nispeten uzun olmasından dolayı blanket bulunmamaktadır. Yansıtıcının dışında ise en dış katman olarak 3 cm kalınlığında SiC yer almaktadır. Korun alt ve üst bölgesinde bulunan giriş ve çıkış plenumlarının yarıçapları kor geometrisiyle aynı olup, her birinin yüksekliği 15 cm'dir. Plenumlardaki yakıt ve soğutucu döngüsü DFR_s konseptinde olduğu gibi soğutucu tüplerin içerisinde soğutucu, dışında ise metalik yakıt akmaktadır.

Tablo 2.10 Referans DFR_m konsepti geometrisine ait parametreler (cm) (Sierchuła, 2021).

Parametre	Değer	Parametre	Değer
$r_{\text{tüp,iç}}$	0,95	R_{kor}	60
$r_{\text{tüp,dış}}$	1,1	Kor dış duvar kalınlığı	62
$L_{\text{yakıt}}$	120	Yansıtıcı dış duvar kalınlığı	3
Adım aralığı	2,8	Yansıtıcı kalınlığı	20
Yakıt tüpü sayısı	1666	Plenum yüksekliği	15

Bu çalışmada reaktör çalışma sıcaklığı aralığının genişletilmesi amaçlanarak DFR_m konseptinde kullanılabilecek daha düşük erime sıcaklığına sahip U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilmiştir.

2.3.1. U-Mn yakıtı

Tez çalışmasının bir amacı DFR_m konseptinde daha düşük erime sıcaklığına sahip yakıtlar önerilerek bu yakıtların nötronik davranışlarının incelenmesidir. Bu amaçla U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilmiştir. Şekil 2.11'de sağ tarafta bulunan grafikte U-Mn yakıtına ait faz diyagramı bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi U-Mn yakıtı, içeriğinde %5,9 ⁵⁵Mn ve %94,1 uranyum bulunduğu kompozisyonda 716 °C'de ötektik noktaya ulaşmaktadır. Bu sıcaklık değeri DFR_m için önerilen U-Cr yakıtın olabilecek en düşük erime sıcaklığı olan 860 °C'den daha düşüktür ve bu da U-Mn yakıtını DFR_m konseptinde güvenli çalışma

2.3.2. U-Fe yakıtı

- U-Cr metalik yakıtının erişebileceği minimum erime sıcaklığından yaklaşık olarak 135 °C daha az olan 725 °C erime sıcaklığına sahip olması.
- Ötektik noktadaki uranyum içeriğinin diğer metalik yakıtlara göre daha fazla olması (ASM International, 1992).
- Demirin piyasada yaygın olarak bulunması ve maliyetinin az olmasıdır.

40

demir eklendiğinde gerçekleştirdiği malzeme davranışları araştırılmıştır. Sonuç olarak SiC parçacıklarının dökme demir çözeltisiyle reaksiyona girdiği ve boyutlarının azaldığı gözlemlenmiştir (C. Wang vd., 2019).

DFR_m konsepti için ele alınan U-Fe ve U-Mn yakıtlarına ait yoğunluklar hesaplanırken sırasıyla denklem (2.2) ve (2.3) kullanılmıştır (Thurnay, 1998).

$$\rho_{U-Fe} = 0.955 \times \frac{100}{\frac{\text{wt. \%Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{\text{wt. \%U}}{\rho_U}} \quad (2.2)$$

$$\rho_{U-Mn} = \frac{100}{\frac{\text{wt. \%Mn}}{\rho_{Mn}} + \frac{\text{wt. \%U}}{\rho_U}} \quad (2.3)$$

2.4. Katı Yavaşlatıcılar

Günümüzde kullanılan nükleer reaktörler tasarımlarında genellikle çok iyi bir yavaşlatıcı malzemesi olan hafif su kullanılmaktadır. Ancak DFR gibi atmosferik basınçta ve çok yüksek sıcaklıklarda çalışan reaktörler için genellikle katı yavaşlatıcılar önerilmektedir. Bu tez kapsamında yüksek sıcaklık reaktörlerinde kullanılabilecek yavaşlatıcı adaylarından olan YH_{1,85} ve MgO-BeO malzemelerinin DFR konseptlerindeki etkileri incelenmiştir. Önerilen katı yavaşlatıcılar hakkında detaylı bilgi vermeden önce nükleer reaktörlerde kullanılması için iyi bir yavaşlatıcının temel özellikleri sıralanacak olursa,

- Elastik saçılma tesir kesiti yüksek olmalıdır.
- Soğurma tesir kesiti düşük olmalıdır.
- Malzeme yoğunluğu nispeten yüksek olmalıdır. Örneğin, helyum yukarıdaki özellikleri sağlamasına rağmen normal sıcaklık ve basınçta çok düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle iyi bir yavaşlatıcı olarak değerlendirilmemektedir (IAEA, 2024).

Ele alınan yavaşlatıcı malzemelerin bu özelliklerin sağlanması, DFR konsept reaktörlerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir.

2.4.1. YH_{1,85}

Diğer hidrat yavaşlatıcılara göre itriyum hidrat (YH_x) yaklaşık 1150 K gibi yüksek sıcaklıklarda en az hidrojen kaybının yaşandığı malzemedir (Cinbiz vd., 2023; Terlizzi & Labouré, 2022). Ayrıca, YH_x bileşenlerinin yaklaşık 1070 K sıcaklıklara kadar stabil kalması sayesinde yüksek sıcaklıkta çalışan reaktörler için çok iyi bir yavaşlatıcı malzeme olarak kabul edilmektedir (Cinbiz vd., 2023). Ayrıca diğer hidratlara göre çok yüksek yavaşlatma katsayısına sahip olmasından dolayı YH_x, küçük hacim gerektiren reaktörler için ideal bir yavaşlatıcı malzeme olarak değerlendirilmektedir (Tiftikci, 2024). Nükleer reaktörlerde hidrat yavaşlatıcılarda bulunması beklenen iki temel özellik bulunmaktadır. Bunlar; yavaşlatıcının reaktör ömrü boyunca tasarım limitlerinde yavaşlatma özelliğini kaybetmemesi ve yavaşlatıcının normal çalışma koşulunda veya transient durumda öngörülebilir ve kararlı davranış sergilemesidir. Bu iki temel özelliği etkileyen durumlar ise hidrojen kaybı ve hidrojenin yeniden dağılımıdır. YH_x içerisinde hidrojenin yeniden dağılımının temel nedeni sistemde eksenel veya radyal sıcaklık gradiyentlerinin bulunmasıdır. Sıcaklık gradiyentleri sonucunda hidrojen, YH_x içerisinde soğuk bölgeden sıcak bölgeye doğru göç eder. Hidrojenin malzeme içerisinde yeniden dağılımı kordaki nötronik kararsızlığa ve YH_x malzemesinin kırılabilirliğinde artış sonucunda meydana gelen mekanik arızalara neden olabilir (Cinbiz vd., 2023). Bunların sonucunda DFR tasarımında kullanılacak YH_x malzemesinin reaktör tasarım limitlerine uygun olacak şekilde hidrojen göçünün kontrolü veya göç stratejisi belirlenebilir (Cinbiz vd., 2023). DFR tasarımları için bu çalışma kapsamında ele alınan YH_{1,85} yavaşlatıcısına ait özellikler Tablo 2.11’de verilmiştir (Hu & Terrani, 2021; Rao & Narender, 2014; Taylor, 1962; Weber vd., 1957).

Tablo 2.11 Katı yavaşlatıcılara ait malzeme özellikler (Tiftikci, 2024).

Yavaşlatıcı	Yoğunluk (g/cm ³)	¹ H (w/o)	² H	⁹ Be	¹⁶ O	²⁴ Mg	⁸⁹ Y
YH _{1,85}	4,1947	64,90	0,0075	-	-	-	35,09
MgO-BeO	3,0900	-	-	10,53	46,81	42,66	-

2.4.2. MgO-BeO

Yüksek sıcaklıklarda çalışan reaktörler için uygun bulunan bir yavaşlatıcı ise MgO-BeO seramik malzemesidir. MgO-BeO, yüksek yavaşlatma katsayısı ve yüksek sıcaklıklarda kararlı olması nedeniyle diğer katı seramik yavaşlatıcılara göre ön plana çıkmaktadır. Oksit, hidrat ve nitrat seramikler arasında magnezyum oksit (MgO) özellikle piyasada kolay bulunabilir ve maliyeti az olan bir malzeme olarak ekonomik avantaj sunmaktadır. Ayrıca MgO, radyasyon ortamında yaklaşık 1170 K sıcaklıklara kadar kararlı davranış göstermektedir. Yavaşlatıcı malzemeler için bir diğer önemli özellik olan malzeme yoğunluğudur ve MgO seramik malzemesi için maksimum yoğunluk sinterleme işlemi uygulanarak elde edilebilir (Duchnowski vd., 2020).

Duchnowski vd., 2020 çalışmasında elde edilen sonuçlar göre farklı yavaşlatıcı içeriğine sahip MgO grafit yerine kullanılabilecek katı yavaşlatıcılar ile kor boyutu küçültülebilmektedir. Cheng vd., 2022 çalışmasında ise farklı berilyum oksit (BeO) kompozisyonlarında malzeme davranışları incelenerek hacimsel olarak %40 BeO içeren MgO-BeO yavaşlatıcısı yüksek sıcaklıklarda kararlı davranış sergileyerek çok iyi bir yavaşlatıcı davranışı sergilemiştir. Ayrıca MgO-BeO, yakıt çevrimi ömrünü ve yakıttan faydalanma oranını artırmıştır (Cheng vd., 2022). Tiftikci (2024) tarafından yapılan çalışmada ise standart HTGR tasarımında MgO-BeO kullanımında grafitte nazaran daha iyi bir yavaşlatma performansı sergilemiştir. Bu çalışma kapsamında hacimsel olarak %40 BeO içeren MgO-BeO yavaşlatıcısı DFR çalışma koşullarında kullanılabilecek bir yavaşlatıcı malzemesi olarak seçilerek bu malzemeye ait özellikler Tablo 2.11’de verilmiştir. Sonuç olarak ele alınan iki DFR konsepti için araştırılan tüm malzemeler Tablo 2.12’de özetlenmiştir.

Tablo 2.12 DFR konseptleri için önerilen malzemeler.

Reaktör Konsepti	Referans Yakıt	Referans Blanket	Önerilen Yakıtlar	Önerilen Blanket	Denenen Yavaşlatıcılar
DFR_s	U-Pu	Cl ₃	ThCl ₄ -PuCl ₃ NaCl-ThCl ₄ -PuCl ₃	ThCl ₄ -PuCl ₃	YH _{1,85} MgO-BeO
DFR_m	U-Cr	-	U-Mn U-Fe	-	

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında DFR_s ve DFR_m reaktör tasarımları için farklı yakıt kompozisyonları ve farklı yapı malzemelerinin reaktör nötronik davranışlarına etkileri incelenmiştir. Ele alınan her iki DFR konseptinin nötronik analizleri için üç boyutlu sürekli enerjili Monte Carlo kodu olan SERPENT kullanılmıştır. SERPENT, 2004 yılından itibaren VTT Finlandiya teknik araştırma merkezinden geliştirilmeye başlamıştır. Bu kod reaktör fiziği ve yanma hesaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca SERPENT, tükenme denklemlerini hızlı ve doğru bir şekilde çözen Chebyshev Rasyonel Yaklaşım Yöntemi (CRAM) metodunu kullanım imkânı sunmaktadır. CRAM, hesaplama süresini önemli ölçüde kısaltarak sağlam ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır (Pusa & Leppänen, 2010). Bu tez çalışmasında, SERPENT kodunun sunduğu CRAM metodunun avantajlarından yararlanmak ve halihazırda Sinop Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü'nde SERPENT 1.1.7 sürümüne ait lisansın mevcut olması nedeniyle bu kod versiyonu tercih edilmiştir (Leppänen vd., 2015). Hesaplamalarda nötron tesir kütüphanesi olarak ise SERPENT 1.1.7 sürümündeki en yeni ve güncel kütüphane olması sebebiyle ENDF/B-VII (Değerlendirilmiş Nükleer Veri Dosyası) kullanılmıştır (Chadwick vd., 2006). Monte Carlo yönteminin yüksek hesaplama maliyeti sebebiyle çalışma kapsamında oluşturulan SERPENT Monte Carlo kodu girdileri, Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı (TRUBA) bilgisayar hesaplama kümelerinde gerçekleştirilmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi (ULAKBİM) tarafından kurulan TRUBA, ulusal merkezi veri depolama ve yüksek performanslı hesaplama altyapısı sağlamaktadır. Her yıl geliştirilen TRUBA günümüzde 7,5PByte yapılandırılmış yüksek performanslı Lustre dosya sistemi, 216 adet GPU ve 80.000'i aşkın işlem çekirdeğine sahiptir (TRUBA, 2024).

3.1. Geometri ve Modellemelerin Doğrulanması

Çalışma kapsamında ele alınan DFR konseptlerinde önerilen yakıt ve malzemeler değerlendirilmeden önce referans DFR konseptlerine (Sierchula, 2021; X. Wang, 2017) ait geometriler SERPENT'te oluşturularak doğrulukları teyit edilmelidir. Bu amaçla SERPENT'te oluşturulan her iki DFR konseptine ait geometri ve modellemelerin referans

çalışmadaki sonuçlar ile karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Burada karşılaştırma parametresi olarak yanma boyunca değişen k_{eff} değeri seçilmiştir. Bu parametrenin seçilmesinin nedeni k_{eff} değerinin hem reaktör geometrisinden hem de yakıt kompozisyonundan etkilenmesidir. Böylece ele alınan konseptler için hem yakıt kompozisyonu hem de geometrik parametreler doğrulanmıştır.

3.2. DFRs Konsepti için Yakıt ve Malzemelerin İncelenmesi

Doğruluğu teyit edilen geometri ve modellemeler için bir sonraki aşama ise konsept tasarımlar için önerilen yakıt ve malzemelerin incelenmesidir. Burada ilk olarak ergimiş yakıt tuzu kullanan DFR_s konsepti ele alınacaktır. DFR_s konseptinde yakıt olarak ThCl₄-PuCl₄ (ikili) ve MSR reaktörleri için gelecek vadeden NaCl-ThCl₄-PuCl₃ (üçlü) yakıtları önerilmiştir. Nükleer reaktörde kullanılacak yakıtlarda düşük fisil izotop içeriği bulunması, zenginleştirme maliyetini düşürme ve nükleer silahların yaygınlaştırılması önleme konusunda istenen bir durumdur. Bu yüzden, düşük fisil izotop içeren ve yakıt döngüsünü uzatan en uygun ikili ve üçlü yakıt kompozisyonunu belirlemek üzere yakıtlarda bulunan plütonyum izotop kompozisyonu değişiminin reaktördeki etkisi incelenmiştir. Önerilen yakıt kompozisyonlarının etkileri ilk olarak referans DFR_s geometrisi için değerlendirilmiştir.

3.3. Yavaşlatıcı Malzemelerin Nötron Enerji Spektrumuna Etkisi

Çalışmanın bir diğer hedefi de termal nötron enerji spektrumunda çalışan DFR_s konsepti elde etmektir. Bu amaçla YH_{1,85} ve MgO-BeO katı yavaşlatıcı malzemeleri önerilmiştir. Bu malzemelerden YH_{1,85}'ın MgO-BeO malzemesine göre çok yüksek yavaşlatma kabiliyetine sahip olması nedeniyle reaktör içerisindeki miktarının daha az olması beklenmektedir.

YH_{1,85} malzemesinin geometrideki miktarına göre sergilediği davranış hakkında fikir sahibi olmak amacıyla ilk olarak birim yakıt hücresi için hesaplamalar yapılmıştır. Yakıt hücresi hesaplamalarında 0,225 cm olan SiC tabakası arasına kalınlığı 0,01 cm'den 0,22 cm'e kadar artan YH_{1,85} tabakası eklenmiştir. Bu geometrinin seçilmesinin temel sebebi YH_{1,85} malzemenin yüksek yavaşlatma kabiliyetine sahip olması nedeniyle düşük miktarlarda kullanılsa dahi nötronları termalize etme yeteneğine sahip olmasıdır (Tiftikci, 2024). Tüm

reaktör üzerinde $YH_{1,85}$ etkisini incelemek için birim yakıt hücre hesaplamalarında belirlenen $YH_{1,85}$ kalınlığı SiC tabakası arasına eklenmiştir. $YH_{1,85}$ kalınlığı SiC tabaka içerisine konulurken yakıt tüpü kalınlığı referans geometride olduğu gibi 0,225 cm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Böylece reaktördeki yakıt ve soğutucu miktarı korunarak geometriye yavaşlatıcı malzeme eklenmiştir. Burada yakıt tüpü kalınlığının değiştirilmemesinin sebebi, reaktör geometrisindeki yakıt ve soğutucu hacmini koruyarak referans geometride herhangi bir değişiklik yapmamaktır.

MgO-BeO malzemesi için birim hücre analizi atlanarak bu malzemenin tüm reaktördeki etkisi incelenmiştir. Bunun nedeni bu malzemenin yavaşlatma kabiliyetinin $YH_{1,85}$ 'a göre çok daha düşük olmasıdır (Tiftikci, 2024). MgO-BeO'nun tüm reaktördeki etkisi incelenirken $YH_{1,85}$ için izlenen adımlar takip edilmiştir. Sonuç olarak $YH_{1,85}$ ve MgO-BeO için en uygun kalınlıklar belirlenmiştir. Bu kalınlıkların ele alındığı reaktör geometrilerinde oluşturulan ikili ve üçlü yakıt kompozisyonlarının nötronik analizleri yapılmıştır. DFR_s konsepti için incelenen MgO-BeO malzemesi, DFR_m geometrisinde de kullanılmış ve bu malzemenin DFR_m nötron spektrumuna etkisi incelenmiştir.

3.4. DFR_s Konseptinde Blanket Malzemesi

Th-Pu içeriğine sahip ikili ve üçlü yakıt kompozisyonları kullanan DFR_s konsepti için yakıt bileşimlerine uygun ThCl₄-PuCl₃ blanket malzemesi önerilmiştir. Bu malzemenin önerilmesinin temel nedeni benzer yakıt ve blanket malzemesi kullanılarak daha basit PPU işlemi elde etmektir. Seçilen ikili ve üçlü yakıt kompozisyonları için DFR_s geometrisinde ThCl₄-PuCl₃ blanketinin etkisini incelemek üzere referans çalışmadaki UCl₃ malzemesi yerine ThCl₄-PuCl₃ eklenmiştir. Burada ThCl₄-PuCl₃ blanketi, referans geometri, $YH_{1,85}$ ve MgO-BeO kullanılan geometrilerindeki etkileri incelenmiştir.

3.5. DFR_m Konsepti için Yakıt ve Yavaşlatıcı Malzemelerin İncelenmesi

Bu tez kapsamında, bir diğer DFR konsept tasarımı olan DFR_m için U-Cr yakıtından daha düşük erime sıcaklığına sahip olan U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilmiştir. Bu yakıtlar, referans DFR_m geometrisinde herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. DFR_m konsepti için çalışma kapsamında önerilen katı yavaşlatıcı malzemeleri arasından MgO-

BeO malzemesinin etkisini incelemek için DFR_s konseptinde izlenen adımlar takip edilmiştir. DFR_s konseptinde elde edilen sonuçlar ile kazanılan tecrübelerle dayanarak DFR_m konsepti için YH_{1,85} malzemesinin etkisi incelenmemiştir.

3.6. Sıcaklık Katsayılarının Analizi

Reaktör içerisinde gerçekleşen herhangi bir sıcaklık değişiminde reaktör içerisinde kullanılan yakıt ve malzemeler sistemde fisyon sayısını artıran (pozitif reaktivite) veya fisyon sayısını azaltan (negatif reaktivite) etki oluşturabilir. Bu yüzden çalışma kapsamında ele alınan her iki DFR konseptinde önerilen tüm yakıtlar için yakıt sıcaklığının değişimi durumlarındaki yakıt sıcaklık geri bildirim (Doppler) katsayısı hesaplanmıştır. Ancak ele alınan bazı yakıtlarda yoğunluk korelasyonlarının geçerli olduğu sıcaklık aralıkları SERPENT'te yanma hesaplamalarında kullanılan ENDF/B-VII tesir kesiti kütüphanesindeki 300 K sıcaklık aralığı ile uyuşmamaktadır. Bundan dolayı burada gerçekleştirilen Doppler katsayı hesaplamaları için SERPENT kodundaki Doppler genişleme rutininden faydalanılmıştır. Elde edilen veriler ile Doppler katsayısının hesaplanması için denklem (3.1) kullanılmıştır.

$$\alpha_F = \frac{1}{k_1 k_2} \times \frac{k_2 - k_1}{T_2 - T_1} \quad (3.1)$$

Denklemden α_F yakıt sıcaklık katsayısını, k ilgili k_{eff} değerini ve T ise ilgili sıcaklığı temsil etmektedir (Daydas & Tiftikci, 2024; Lamarsh & Baratta, 2001). Her iki DFR konseptinde kullanılan kurşun soğutucu için soğutucu katsayısı 900 K'den 1800 K'ye kadar olan aralıkta, 300 K artışlarla Denklem (3.2)'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden α_C soğutucu katsayısını temsil etmektedir (Daydas & Tiftikci, 2024; Lamarsh & Baratta, 2001).

$$\alpha_C = \frac{1}{k_1 k_2} \times \frac{k_2 - k_1}{T_2 - T_1} \quad (3.2)$$

Önerilen yavaşlatıcı malzemelerinin sıcaklık katsayıları ise denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada sıcaklık farkı 300 K'dir ve denklemden α_M yavaşlatıcı reaktivite katsayısını ifade etmektedir (Daydas & Tiftikci, 2024; Lamarsh & Baratta, 2001).

$$\alpha_M = \frac{1}{k_1 k_2} \times \frac{k_2 - k_1}{T_2 - T_1} \quad (3.3)$$

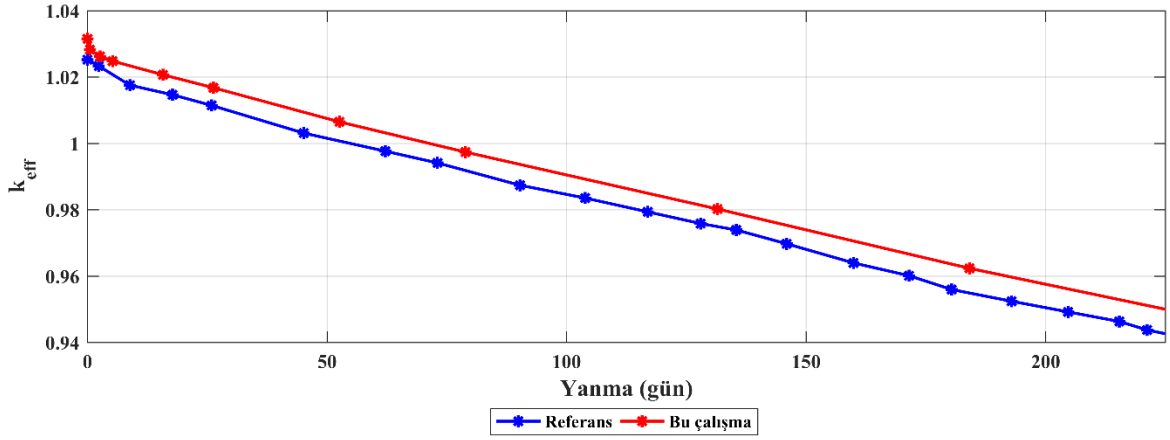
Bu çalışmada uygulanan metodoloji ve analiz yöntemleri sayesinde, DFR_s ve DFR_m konseptlerinin önerilen yakıt kompozisyonları ve yavaşlatıcı malzemeleri üzerindeki nötronik etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Hesaplamalar ve analizler sonucunda elde edilen veriler, her iki reaktör tasarımının nötronik performansına dair detaylı bir analiz sunmakta ve en uygun yakıt ve yavaşlatıcı kombinasyonlarını belirlemeye yönelik önemli bulgular sağlamaktadır. Bir sonraki bölümde elde edilen sonuçlar ve bulguların DFR_s ve DFR_m reaktör performanslarına olan etkilerini detaylı bir şekilde incelenecektir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, SERPENT kodu ile gerçekleştirilen hesaplamalar ve analizler sonucunda elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır. İlk olarak, referans veriler ile bu çalışma kapsamında geliştirilen geometri ve modellemelerin karşılaştırmasına ait sonuçlar verilecektir. İlerleyen kısımlarda ise nötronik hesaplamalara ilişkin sonuçlar kapsamlı bir biçimde sunulacak ve bu sonuçların analizleri yapılacaktır.

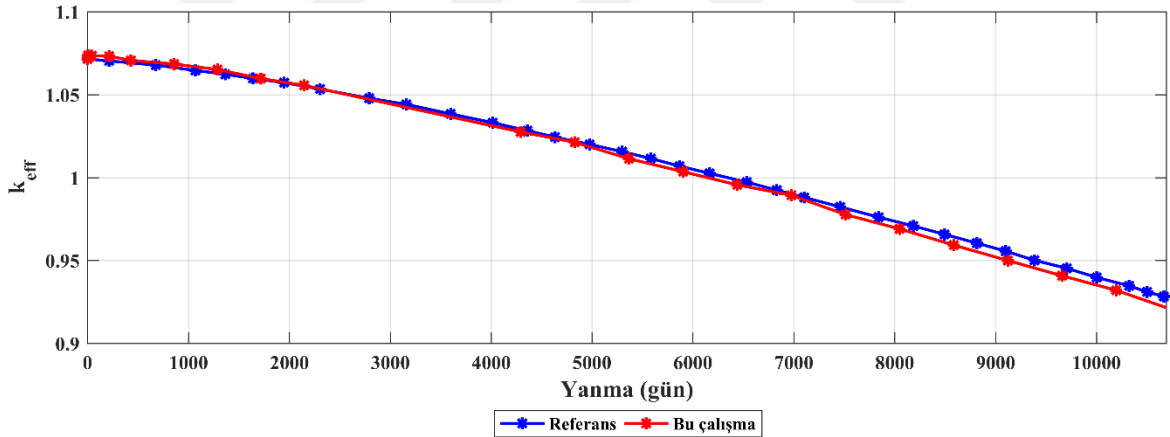
4.1. Referans ve Oluşturulan DFR_s/DFR_m Geometri ve Modellerinin Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında analiz edilen DFR_s (X. Wang, 2017) ve DFR_m konsept reaktörlerine (Sierchuła, 2021) ait geometriler sırasıyla Tablo 2.5 ve Tablo 2.10'de verilen değerler ele alınarak oluşturulmuştur. Hazırlanan geometrik modeller tüm koru kapsamaktadır ve veriler referans çalışmadaki kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Hesaplamalar için kaynak 100 000 nötron sayısı, 100 aktif döngü ve 50 pasif döngü olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda hata oranı en fazla 2.5 pcm'dir. Her iki konsept için de hem referans çalışmalarda hem de bu çalışmada tesir kütüphanesi olarak ENDF/B-VII kullanılmıştır. Her iki geometride yansıtıcı bulunmaktadır ve tüm yanma hesaplamaları için vakum sınır koşulu kullanılmıştır. Burada elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan SERPENT versiyonu büyük önem teşkil etmektedir. Şekil 4.1'de sonuçları verilen DFR_s konsepti için referans çalışmada SERPENT 2.1.23, bu çalışmada ise SERPENT 1.1.7 versiyonu kullanılmıştır.



Şekil 4.1 DFR_s konsepti için referans ((U-Pu)Cl₃) ve bu çalışma sonuçları.

Referans DFR_m çalışmasında SERPENT 2.1.31 kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DFR_m geometrisinde elde edilen k_{eff} değerleri de birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.2 DFR_m konsepti için referans U-Cr ve bu çalışma sonuçları.

Burada grafikler incelendiğinde özellikle DFR_s için elde edilen sonuçlardaki ufak sapmanın nedeni SERPENT 2 versiyonlarında karmaşık geometrilerin SERPENT 1’e göre daha hassas şekilde modellenenbilmesi olabilir. Bu farkın bir nedeni de referans çalışmalar ve bu çalışmada oluşturulan geometride kullanılan malzemeler için sıcaklık farkı, malzeme yoğunluğu ve kompozisyonlarındaki küçük farklar olabilir. Ayrıca, hesaplamada kullanılan nötron sayısına bağlı oluşan hatalar ve belirsizlikler burada elde edilen sonuçları etkilemektedir. Yapılan kıyaslamalar sonucunda çalışma kapsamında oluşturulan DFR_s ve

DFR_m geometri ve modellemelerin tez çalışmasının diğer kısımlarında gerçekleştirilecek nötronik hesaplamalar için yeterli doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir.

4.2. DFR_s Sonuçları

Bu bölümde, DFR_s konsepti için önerilen ikili ve üçlü yakıt kompozisyonlarının çeşitli geometrilerdeki nötronik davranışlarına ilişkin sonuçlar detaylandırılacaktır.

4.2.1. Referans DFR_s'de ikili yakıt sistemi

Ergimiş yakıt tuzu kullanan DFR_s için iki farklı yakıt sistemi önerilmiştir. Bunlardan biri ise ikili yakıt tuzudur. Bu çalışma kapsamında kütlece %4,95 zenginlikte ²³⁵U içeren yakıtı sahip VVER-1200 reaktörünün 60 GWd/t yanma seviyesine ulaşmasının ardından 10 yıl boyunca soğutulan tüketilmiş yakıttan elde edilen plütonyum kompozisyonu kullanılmıştır. Bu kompozisyonu içeren ikili yakıt “temel ikili yakıt” bileşimi olarak adlandırılmaktadır. Temel yakıttaki fisil-ağır metal izotop oranı yaklaşık kütlece %20,46’dır. Bu oran, araştırma reaktörleri için nükleer silahların yayılmasının önlenmesi amacıyla IAEA tarafından belirlenen kütlece %20 zenginleştirme sınırını geçmektedir (IAEA, 2005). Bu durum göz önünde bulundurularak çalışmanın ilk adımında ikili yakıt bileşimindeki fisil plütonyum izotoplarının değişiminin reaktör ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

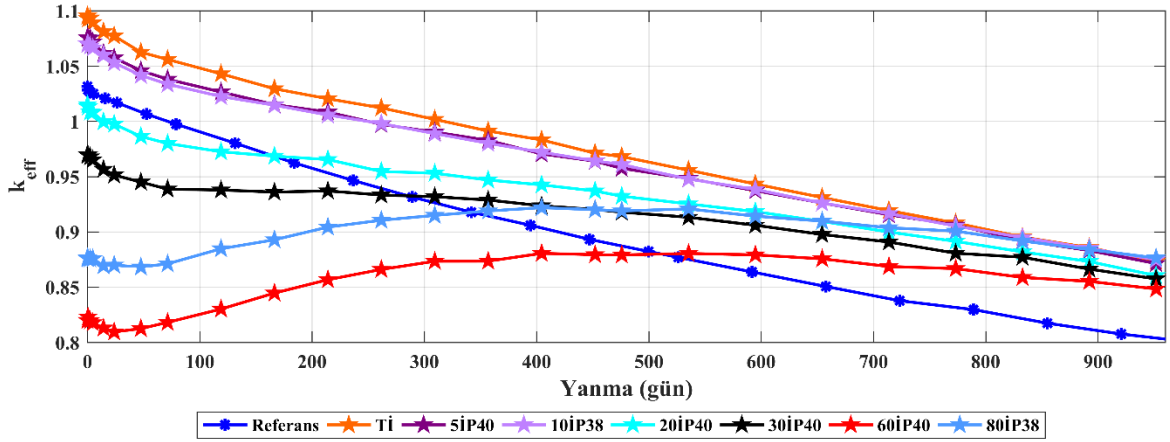
Temel ikili yakıttaki plütonyumdaki fisil izotop bileşimi, yakıttaki ²³⁹Pu izotopunun kütlece azaltıldığı oran kadar ²³⁸Pu veya ²⁴⁰Pu izotopunun artırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. İlgili yakıt bileşimleri Tablo 4.1’de kodlarıyla birlikte verilmiştir. Burada oluşturulan kodlarda ilk sayı ²³⁹Pu azaltma miktarı, ilk harf ikili veya üçlü yakıt olma durumunu P(X) ise “X” ²³⁸Pu veya ²⁴⁰Pu izotoplarını belirtmek üzere hangi izotopun artırıldığını temsil etmektedir. Örneğin 30İP40 kodu ²³⁹Pu izotopunun %30 azaltıldığı miktarda ²⁴⁰Pu izotopunun artırıldığı ikili yakıt kompozisyonunu temsil etmektedir.

Tablo 4.1 Farklı ikili yakıt sistemi kompozisyonları (wt. %).

İzotop	Temel yakıt (Tİ)	5 (5İP40)	10 (10İP38)	20 (20İP40)	30 (30İP40)	60 (60İP40)	80 (80İP38)
³⁷ Cl	36,692	36,692	36,692	36,692	36,692	36,692	36,692
²³² Th	42,406	42,406	42,406	42,406	42,406	42,406	42,406
²³⁸ Pu	0,882	0,882	19,717	0,882	0,882	0,882	9.599
²³⁹ Pu	10,896	10,351	9,806	8,717	7,627	4,360	2.179
²⁴⁰ Pu	5,148	5,693	5,148	7,327	8,417	11,686	5.148
²⁴¹ Pu	2,056	2,056	2,056	2,056	2,056	2,056	2,056
²⁴² Pu	1,918	1,918	1,918	1,918	1,918	1,918	1,918
Fisil/Ağır Metal oranı (%)	20,460	19,599	18,739	17,018	15,297	10,415	6,691

4.2.1.1. Yanma boyunca k_{eff} değişimi

İkili yakıtta bulunan fisil izotop kompozisyonlarının davranışını incelemek amacıyla ilk olarak referans DFR_s geometrisinde yanma hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 4.3Şekil 4.3'te verilen grafikte görülebileceği gibi fisil içeriği en fazla olan ikili yakıt kompozisyonu olan Tİ, yakıt döngüsü başında (YDB) en yüksek k_{eff} değerine ulaşarak yakıt döngüsü uzunluğunu 317 güne uzatmıştır.



Şekil 4.3 Farklı ^{239}Pu kompozisyonları içeren ikili yakıt sistemi için yanmaya göre k_{eff} değişimi.

DFR_s'de 5İP40 yakıt kompozisyonu kullanıldığı durumda, yakıt çevrimi süresi referans çalışmaya göre 3,5 kat artarak 250 güne ulaşmıştır. ^{238}Pu izotopunun artırıldığı 10İP38 yakıtı ise 5İP40 yakıtıyla benzer davranış sergilemiştir. Bu iki yakıt bileşimi değerlendirildiğinde ^{238}Pu izotopunun artırılmasıyla başlangıçta daha düşük fisil izotop içeriği ile aynı k_{eff} davranışına sahip olunabileceği sonucuna varılmaktadır.

Grafikte göze çarpan bir diğer durum ise ikili yakıtta ^{238}Pu veya ^{240}Pu izotopunun artırılmasının yanma ile k_{eff} üzerinde yaptığı değişimdir. Tüm ikili yakıt kompozisyonlarında ^{239}Pu içeriği azaldıkça YDB'deki k_{eff} değerleri düşmüştür. Ancak bu yakıtlarda ^{238}Pu ve ^{240}Pu miktarı arttıkça k_{eff} trendlerinde düzleşme meydana gelmiştir. Bunun nedeni bu izotopların nötron yakalama reaksiyonu ile fisil izotop üretmeleridir.

Burada değinilmesi gereken bir başka ikili yakıt kompozisyonu ise 30İP40 yakıtıdır. Bu yakıt kompozisyonunda fisil/ağır metal oranı referans DFR_s'de kullanılan U-Pu yakıtındaki oranla neredeyse aynıdır. Ancak bu kompozisyon içeriğindeki ^{232}Th 'nin yüksek nötron enerjilerdeki yüksek soğurma tesir kesitine sahip olması nedeniyle kritikliğe ulaşamamıştır.

60İP40 ve 80İP38 yakıtlarına gelince, burada elde edilen k_{eff} değerleri her ne kadar kritikliğin altında kalsa da yaklaşık 24 güne ulaşıldıktan sonra fisil izotop üretim miktarının, tüketim miktarını geçmesinden dolayı k_{eff} değeri artmış, yaklaşık 535 güne ulaşıldığında ise maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bunun nedeni, yakıt kompozisyonlarının içerisinde bulunan yüksek miktarda nötron yakalama ile fisil izotop üreten ^{238}Pu veya ^{240}Pu

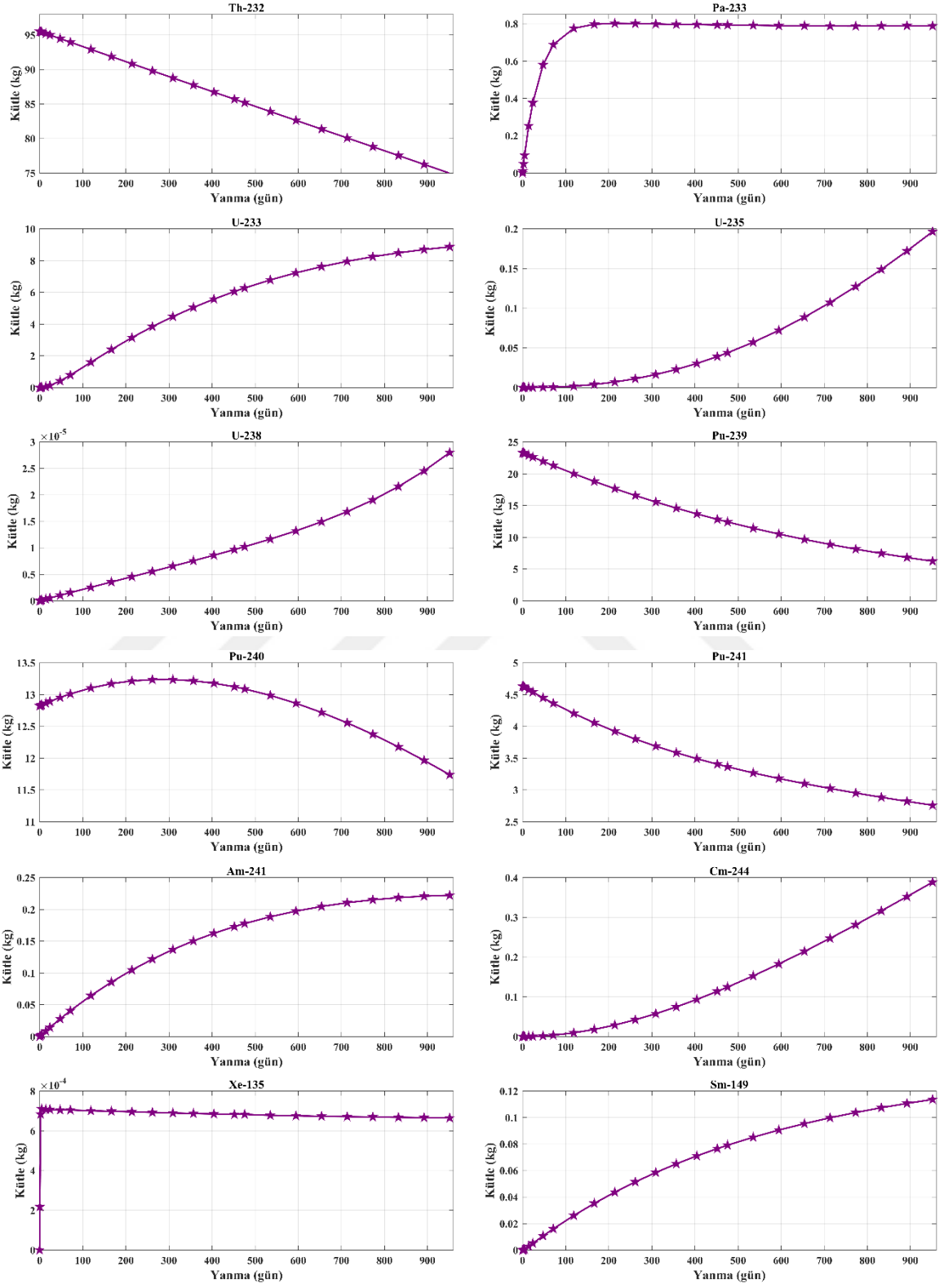
izotoplarıdır. DFR_s reaktörünü bu yakıt kompozisyonlarını kullanarak kritikliğe ulaştırmak için yavaşlatıcı ve alternatif blanket malzemeleri önerilerek sonuçlar sırasıyla Bölüm 5.2.1.2 ve Bölüm 5.2.1.5'te değerlendirilmiştir.

Şekil 4.4'te referans geometride kullanılması önerilen ikili yakıt kompozisyonu olan 5İP40 yakıtına ait önemli izotopların yanma ile değişimleri verilmiştir. Hızlı nötron spektrumunda çalışan bu DFR_s geometrisinde 5İP40 kullanıldığında yakıt içerisinde bulunan ²³²Th izotopu miktarı yüksek oranda nötron yakalama reaksiyonu gerçekleştirdiğinden dolayı yanma ile hızla düşmektedir. ²³²Th nötron yakalama sonucunda oluşan ²³³Pa ise yaklaşık 115 gün civarına kadar hızlar artarak dengeye ulaşmıştır. Üretilen ²³³Pa izotopunun beta bozunumu gerçekleştirmesi sonucunda oluşan ²³³U izotopunun miktarı yanma ile sürekli artmaktadır.

²³⁵U ve ²³⁸U üretim miktarı, gerçekleşmesi gereken reaksiyon sayısının fazla olması ve bu reaksiyonların oluşma olasılıklarının düşük olmasından dolayı çok düşüktür. Ancak bu izotopların miktarı yanma boyunca sürekli artmaktadır. Fisil izotop olan ²³⁹Pu ve ²⁴¹Pu miktarları ise fisyon reaksiyonu sonucu tükenmeleri nedeniyle sürekli azalmaktadır. Fertil ²⁴⁰Pu izotopu, ²³⁹Pu izotopunun nötron yakalama reaksiyonu yapmasıyla birlikte yanma ile 300 güne kadar artmış ancak daha sonra miktarı yavaşça düşmüştür.

²⁴¹Am izotopu, ²⁴¹Pu izotopunun beta bozunumu gerçekleştirmesi sonucunda oluşmaktadır. Bundan dolayı ²⁴¹Am miktarı yanma ile sürekli artmış ve sistemde bulunan ²⁴¹Pu miktarı düştükçe ²⁴¹Am artış miktarında bir azalma meydana gelmiştir. Sistemdeki ²⁴⁴Cm miktarı ise sürekli artmaktadır ve $k_{eff}=1$ olduğu günde yaklaşık olarak 0,5 kg ²⁴⁴Cm birikmiştir. ¹³⁵Xe ve ¹⁴⁹Sm izotopları incelenecek olursa ¹³⁵Xe, yakıt çevriminin başlangıcında hızla artıp ve yanma sürecinde sürekli aynı miktarda kalırken, kararlı bir izotop olan ¹⁴⁹Sm sistemde birikerek miktarı yanma ile sürekli artmıştır.

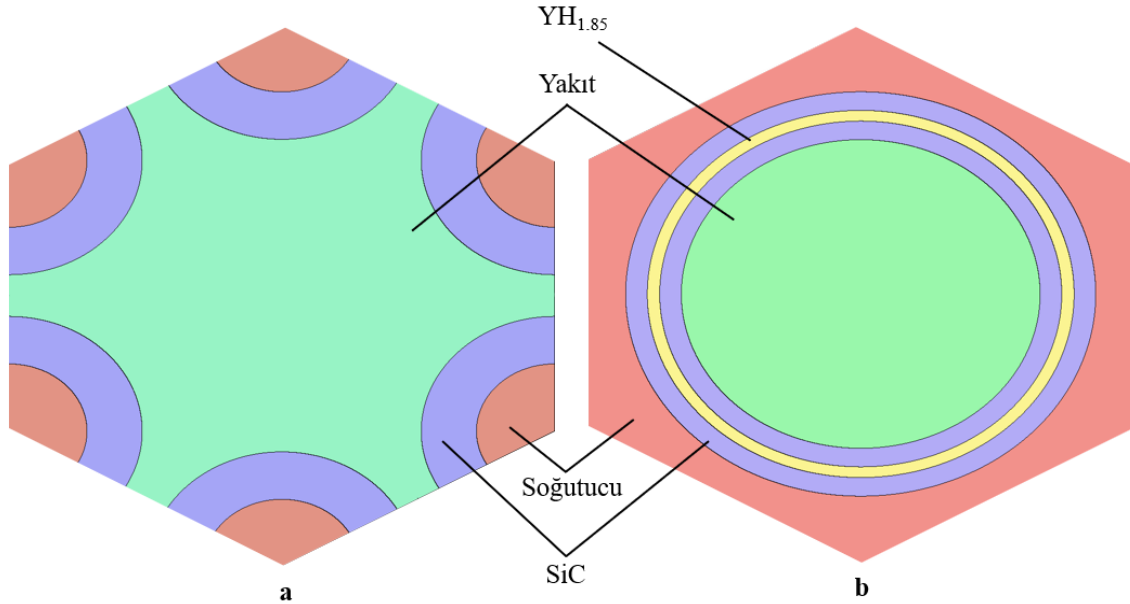
DFR_s konseptinin çevrimiçi yakıt yeniden işleme prosesi gerçekleştirmesi göz önünde bulundurulduğunda reaktörün güvenli aralıkta işletilmesine engel teşkil eden fisyon ürünlerinin bertarafı ile bu fisyon ürünlerinin olumsuz etkileri ortadan kaldırılacaktır.



Şekil 4.4 Referans DFR_s geometrisinde 5İP40 yakıtı için önemli izotopların değişimi.

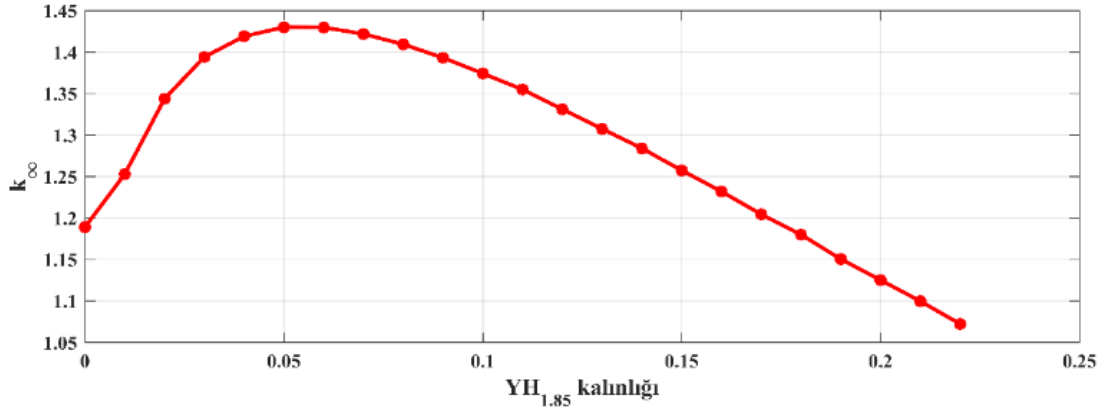
4.2.1.2. İkili yakıt için $YH_{1,85}$ etkisi

Bu çalışmanın bir diğer hedefi termal nötron spektrumunda çalışan bir DFR_s konsepti önermektir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında önerilen yakıtların kullanıldığı DFR_s geometrisinde $YH_{1,85}$ yavaşlatıcısının etkileri değerlendirilmelidir. $YH_{1,85}$ malzemesinin davranışlarının incelenmesi amacıyla ilk olarak birim yakıt hücresinde bir ön çalışma yapılmıştır. Bu amaçla Şekil 4.5'in (b) görselinde örneği verilen geometri oluşturularak kalınlığı 0,225 cm olan SiC tabakası arasına kalınlığı 0,01 cm'den 0,22 cm'e kadar artan $YH_{1,85}$ tabakası eklenmiştir. Burada önemli olan bir husus birim yakıt hücresinde $YH_{1,85}$ malzemesini çevreleyen SiC tabakalarının kalınlığının değişmemesidir. Başka bir deyişle burada $YH_{1,85}$ kalınlığı arttıkça tüm yakıt tüpü kalınlığı artmaktadır.



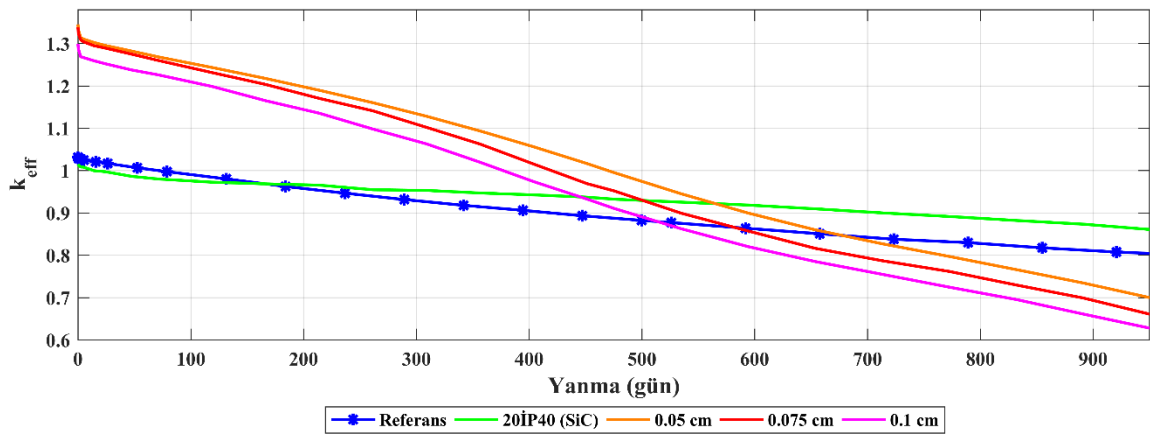
Şekil 4.5 a) plenumdaki birim hücre, b) kordaki birim hücre geometrisi.

Burada elde edilen sonuçlar Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekilde bulunan grafikte görüleceği gibi k_{eff} değeri büyük ölçüde artarak maksimum k_{eff} değeri, $YH_{1,85}$ kalınlığının 0,05 cm olduğu geometride elde edilmiştir. Bu ön çalışma her ne kadar $YH_{1,85}$ malzemesinin yavaşlatma davranışı hakkında bir fikir sunsa da tüm reaktör üzerindeki etkisi incelenmelidir.



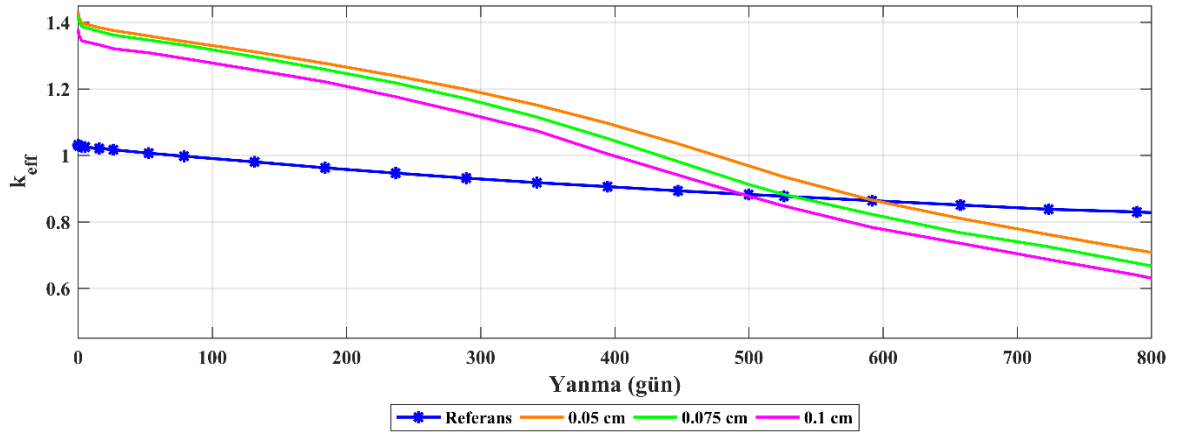
Şekil 4.6 DFR_s konsepti yakıt hücresinde YH_{1,85} kalınlığının etkisi.

YH_{1,85} kalınlığının tüm DFR_s reaktör geometrisi üzerindeki etkisini incelemek üzere, Şekil 4.5 (b)'deki örnekte gösterildiği gibi, toplam kalınlığı 0,225 cm olan yakıt tüplerine, tüm yakıt tüp kalınlığı aynı kalacak şekilde, iki SiC tabakası arasına sırasıyla 0,05 cm, 0,075 cm ve 0,1 cm kalınlığında YH_{1,85} tabakası eklenmiştir. İkili yakıt kullanımında YH_{1,85} kalınlığının etkisi incelenirken başlangıçta $k_{eff} > 1$ değeri veren en düşük fisil içeriğe sahip 20İP40 yakıtı seçilmiş ve sonuçlar Şekil 4.7 ile verilmiştir. Sonuçlara göre en uzun yakıt çevrim süresi 470 gün ile YH_{1,85} kalınlığının 0,05 cm olduğu geometride elde edilmiştir ve DFR_s reaktör kor geometrisinde bu kalınlık değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.



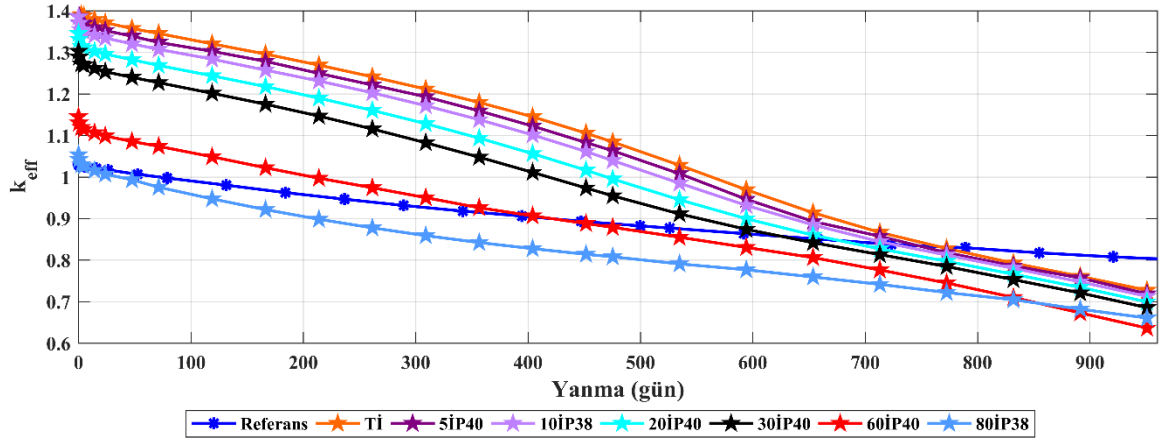
Şekil 4.7 20İP40 yakıtı için YH_{1,85} kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.

U-Pu yakıt kullanan referans DFR_s reaktörü için de YH_{1,85} kalınlığının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 20İP40 yakıtı için uygulanan adımlar takip edilerek U-Pu yakıtı için elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek k_{eff} değeri ve en uzun yakıt çevrim uzunluğu 475 gün ile 0,05 cm YH_{1,85} kalınlığında elde edilmiştir. k_{eff} değerlerinin yüksek olmasının sebebi sistemdeki termal nötron sayısının artması ve yüksek fisyon tesir kesitine sahip fisil plütonyum izotoplarının yüksek miktarda fisyon reaksiyonu gerçekleştirmesidir. Hem 20İP40 hem de U-Pu yakıtları için de 0,05 cm YH_{1,85} kalınlığı kullanıldığı durumlardaki yanma ile değişen k_{eff} değerlerindeki trend değerlendirilecek olursa, bu geometride fisil izotop tüketiminin yüksek olduğu ve yeni fisil izotop üretiminin referans DFR_s ye göre düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.8 Referans DFR_s geometrisinde YH_{1,85} kalınlığının k_{eff} değişimi üzerindeki etkisi.

Önerilen ikili yakıtlar ve referans U-Pu yakıtı için YDB’de elde edilen yüksek k_{eff} değerini düşürmek amacıyla yakıt içerisindeki fisil miktarının azaltılması değerlendirilebilir. Bu çalışmanın odağı önerilen alternatif yakıtları analiz etmek olduğundan, bu yakıtların fisil içeriklerinin değişiminin k_{eff} trendi üzerindeki etkileri incelenmelidir. Bu amaçla 0,05 cm YH_{1,85} içeren geometride tüm ikili yakıt kompozisyonları ele alınmıştır. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi yakıt döngüsünün başlangıcında (YDB) en yüksek k_{eff} değerine en fazla fisil içeriğe sahip temel ikili yakıtta ulaşılmıştır. Orijinal DFR_s geometrisinde olduğu gibi YH_{1,85} içeren geometride de fisil içeriği düştükçe başlangıçtaki k_{eff} değerleri düşmüştür.

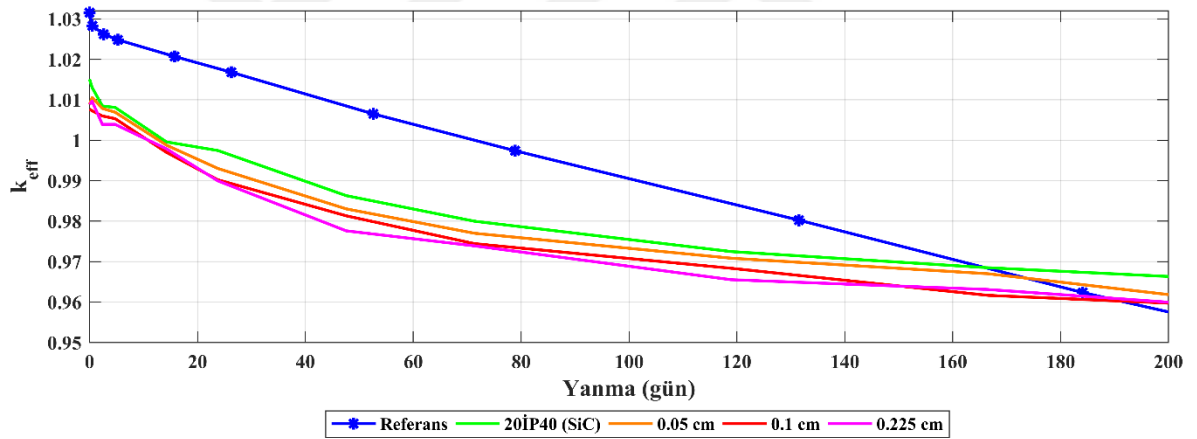


Şekil 4.9 Farklı ikili yakıt kompozisyonları için $YH_{1,85}$ kullanımının k_{eff} üzerindeki etkisi.

Burada $YH_{1,85}$ teknik olarak yakıt ömrünü uzamış olsa da ulaşılan k_{eff} sonuçları bir nükleer reaktör için çok yüksektir. Özellikle 60İP40 ve 80İP38 kompozisyonları haricindeki yakıtlar için YDB’de elde edilen k_{eff} değerleri ticari işletimde olan bir nükleer reaktör için uygun değildir. Bu yakıtlar için yanma ile değişen k_{eff} trendlerinin Tİ yakıttan 30İP40 yakıtına kadar birbirine paralel olmasıyla birlikte YDB’de elde edilen k_{eff} değerleri fisil içerikleri azaldıkça düşmüştür. Ancak 60İP40 yakıtındaki büyük miktarda ^{240}Pu izotopu bulunmasından dolayı bu trend diğer yakıtlara göre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi ^{240}Pu izotopunun nötron yakalama reaksiyonu yaparak ^{241}Pu fisil izotop üretmesi ve bu izotopun reaktör içerisinde birikmesi olarak söylenebilir. Burada 60İP40 yakıtı YDB’de 1.14397 değeri ile yakıt çevrim ömrünü yaklaşık olarak 208 güne artırmıştır. 80İP38 yakıtı kullanıldığı durumda ise 1.05358 değeri ile referans DFR_s ’ye yakın bir k_{eff} değeri sağlayarak yakıt çevrimi ömrü yaklaşık 26 gün elde edilmiştir. Burada göz önünde bulundurulması gereken önemli bir durum ise 80İP38 yakıtında fisil/ağır metal oranı yaklaşık olarak kütlece %6,691 ile referans yakıttaki orandan çok daha düşük olmasıdır. Bu da 80İP40 yakıtındaki fisil içeriğinin bir miktar artırılmasıyla $YH_{1,85}$ kullanılan geometride daha düşük fisil içerikleriyle aynı yakıt çevrim uzunluğuna erişilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

4.2.1.3. İkili yakıt MgO-BeO etkisi

Önerilen bir başka yavaşlatıcı malzemesi MgO-BeO'dur. Bu yavaşlatıcı malzeme için $YH_{1,85}$ kalınlığını belirlemek amacıyla takip edilen adımlar izlenmiştir. Burada en büyük fark MgO-BeO yavaşlatıcısı için kalınlıkların 0,05 cm, 0,1 cm ve 0,225 cm olarak belirlenmesidir. 0,225 cm MgO-BeO kalınlığında yakıt tüpü tamamen MgO-BeO'dan meydana gelmektedir. Bu kalınlığın uygulanmasının sebebi MgO-BeO yavaşlatıcısının seramik malzeme olması sebebiyle dış katmanda SiC katman bulunmasına gerek olmamasıdır. İlgili sonuçlar Şekil 4.10'daki grafikte verilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda MgO-BeO kalınlığı arttıkça yakıt çevrim uzunluğu çok az miktarda azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak MgO-BeO'nun nötronik açıdan SiC ile benzer davranışa sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.10 20İP40 yakıtı için MgO-BeO kalınlığının k_{eff} değeri üzerindeki etkisi.

4.2.1.4. İkili yakıt geometrisinde $ThCl_4$ - $PuCl_3$ blanketi kullanımı

DFR_s konsepti için önerilen başka bir değişiklik ise blanket malzemesidir. Blanket malzemesi olarak ^{239}Pu 'un kütlece %60 azaltıldığı ve geriye kalan ^{239}Pu ve ^{241}Pu fizil izotoplarının ^{238}Pu izotopuna eklendiği $ThCl_4$ - $PuCl_3$ blanket malzemesi önerilmiştir. Yeni blanket malzemesi önerilmesinin nedeni;

- Referans geometride kullanılan $^{238}UCl_3$ blanketinde bulunan ^{238}U izotopunun sistemden çıkarılmasıyla yakıt yeniden işleme sürecini basite indirmek.

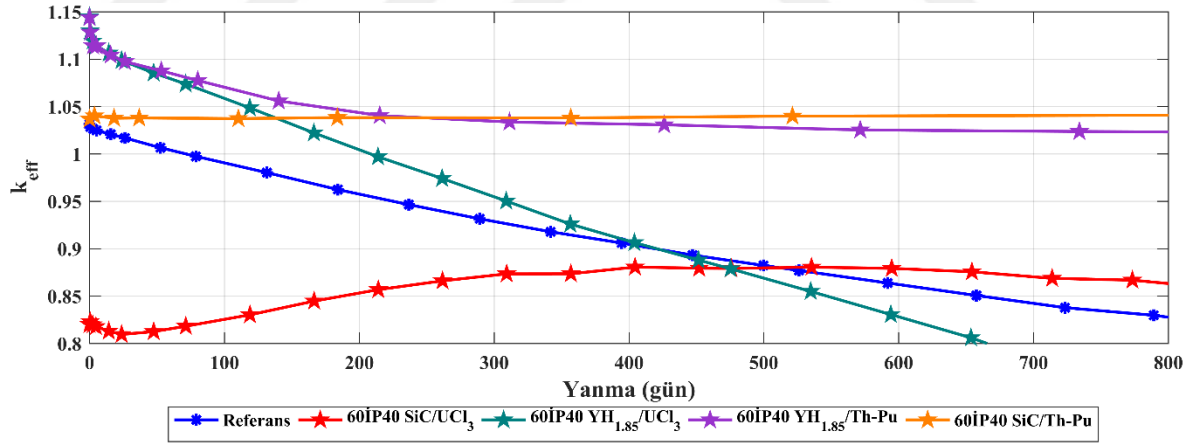
- ^{232}Th 'nin termal enerjilerde yakalama reaksiyonu tesir kesiti ^{238}U 'e göre daha yüksektir (OECD NEA., 2024). Bu yüzden sitemdeki ^{232}Th miktarını artırarak termal ve hızlı nötron spektrumunda çalışan DFR_s'de fisil izotop üretiminin maksimum seviyeye çıkarılmasını sağlamaktır.

$\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketine ait kompozisyon Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketi kompozisyonu.

İzotop	^{37}Cl	^{232}Th	^{238}Pu	^{240}Pu	^{242}Pu
wt. %	36.692	42.406	7.298	11.686	1.918

Burada ^{238}Pu izotopunun artırılmasının nedeni ise ^{238}Pu 'in özellikle termal enerjilerde yüksek yakalama tesir kesitine sahip olmasıdır. Şekil 4.11'de verilen grafikte ise blanketin yanma ile değişen k_{eff} değeri üzerindeki etkisi verilmektedir.



Şekil 4.11 Farklı DFR_s geometrilerinde 60İP40 yakıt kullanımının k_{eff} üzerindeki etkisi.

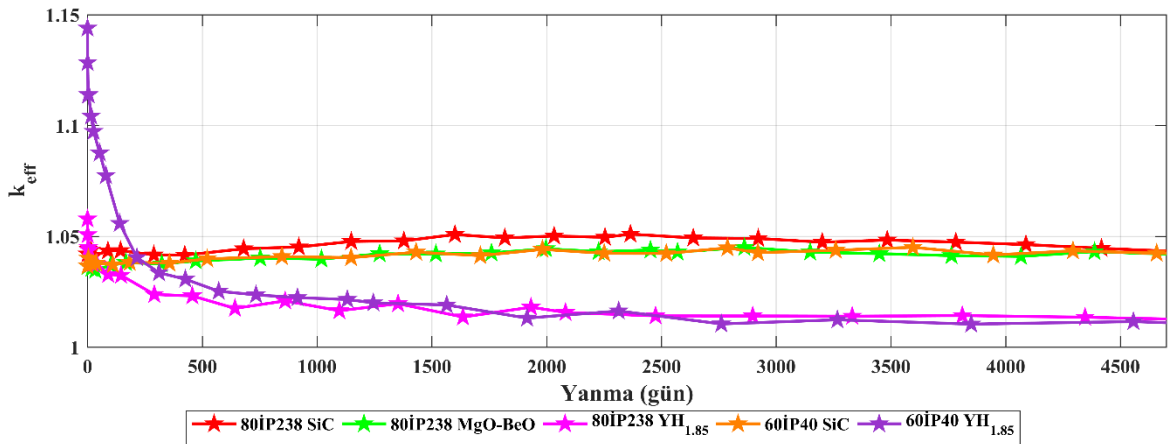
60İP40 yakıt ve 0,05 cm kalınlığa sahip $\text{YH}_{1.85}$ içeren geometriye $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketi eklendiğinde YDB'deki k_{eff} değeri 1.14397'dir. YDB'den sonra ilk yanma adımlarında k_{eff} değerinin ani düşüşünün sebebi toryumun termal enerjilerde yüksek nötron soğurma reaksiyonu yapmasıdır. Referans geometride $\text{YH}_{1.85}$ kullanılan geometri incelendiğinde referans geometride kullanılan $^{233}\text{UCl}_3$ blanketinde yeteri kadar fisil izotop üretilmemiş

olup k_{eff} değerinin hızla düştüğü gözlemlenmektedir. Sonuç olarak termal nötron enerjilerinde çalışan DFR_s konsepti için ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanıldığında uzun süreli yakıt çevrimi sağlanmıştır.

Referans geometride ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanıldığı durumda YDB’de elde edilen k_{eff} değeri 1.03672’dir. Bu geometride elde edilen k_{eff} değerlerinde, YH_{1,85} kullanılan geometride gözlemlenenin aksine, ilk yanma adımlarında hızlı bir düşüş meydana gelmemiş ve yakıt döngüsü ömrü uzamıştır.

Şekil 4.12’de ise ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanılan geometriler değerlendirilmiştir. Grafikte ilk göze çarpan veri 60İP40 ve 80İP38 yakıtlarının kullanımıyla ulaşılan k_{eff} değerleridir. Burada hızlı nötron spektrumunda çalışan DFR_s geometrilerinde (YH_{1,85} bulunmayan geometri) 80İP38 yakıtı, daha düşük fisil izotop içeriğine sahip olmasına rağmen, yüksek ²³⁸Pu izotop içeriği sayesinde, 60İP40 yakıtı ile elde edilen k_{eff} değerlerine çok yakın değerlere ulaşmaktadır.

Burada ayrıca 80İP48 yakıtının kullanıldığı DFR_s geometrisinde YH_{1,85}, MgO-BeO ve SiC malzemelerinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak MgO-BeO ve SiC kullanıldığında benzer k_{eff} değerleri ve davranışları elde edilmiştir. YH_{1,85} kullanıldığında ise elde edilen k_{eff} değerinin ilk yanma adımlarında hızla düştüğü gözlemlenmiş ve tüm yanma adımlarında $k_{eff} > 1$ durumu sağlanmıştır.



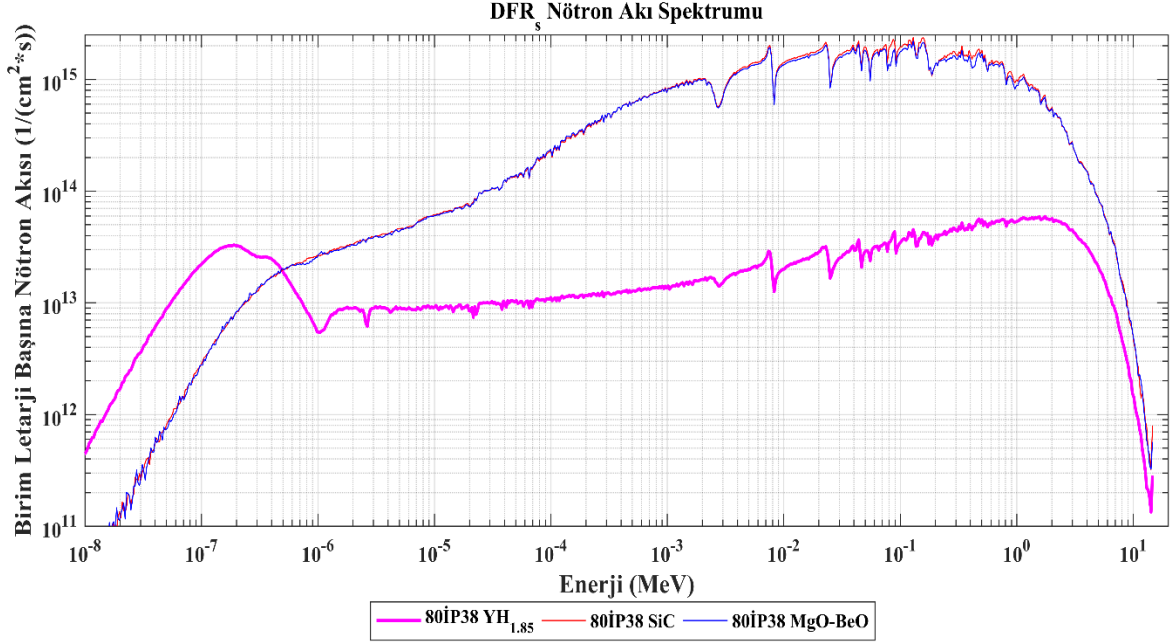
Şekil 4.12 ThCl₄-PuCl₃ blanketi bulunan geometride farklı yakıt kompozisyonlarının yanma ile değişen k_{eff} üzerindeki etkisi.

4.2.1.5. Yavaşlatıcıların nötron spektrumu üzerindeki etkisi

Şekil 4.13'te, çalışma kapsamında önerilen 60İP40 yakıtı ve $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanket içeren geometrideki SiC, YH_{1,85} ve MgO-BeO yavaşlatıcılarının kullanıldığı geometriler için logaritmik ölçekle çizilmiş nötron enerjisine karşılık gelen birim letarji başına düşen nötron akısının nötron spektrumu gösterilmektedir. Spektrumda görüldüğü gibi aynı kalınlıkta MgO-BeO ve SiC malzemelerinin kullanıldığı DFR_s geometrisinde reaktör hızlı nötron spektrumunda çalışmaktadır.

Elde edilen nötron spektrumuna göre malzeme seçimi değerlendirilecek olursa DFR_s reaktörlerinde SiC malzemesine alternatif olarak MgO-BeO seramik malzemesi kullanılabileceği öngörülmektedir. Ancak MgO-BeO her ne kadar nötronik açıdan iyi bir davranış gösterse de SiC'a göre çok daha düşük termal iletkenliğe sahiptir (Taylor, 1962). Bu da yakıtta üretilen ısının çekilmesinde problemler meydana getirebilir. Ayrıca, MgO-BeO seramik malzemesinin yakıt tuzu ve kurşun ile yüksek sıcaklıklarda yaptığı etkileşimler incelenmeli ve yüksek nötron akısı ortamındaki kararlılığı araştırılmalıdır.

0,05 cm YH_{1,85} kullanılan geometride, reaktördeki termal enerjilerdeki nötron popülasyonu artmıştır. Bu da 0,05 cm YH_{1,85}'in DFR_s reaktörünü termal spektrumda çalıştırmak için yeterli olduğunu göstermektedir. Ancak burada reaktör tasarımından istenilen spektruma göre YH_{1,85} kalınlığı artırılabilir veya reaktör geometrisi değiştirilerek farklı düzende (örneğin YH_{1,85} tüpü) kullanılabilir.



Şekil 4.13 Önerilen katı yavaşlatıcıların DFR_s nötron spektrumundaki etkisi.

4.2.1.6. Önemli izotoplar

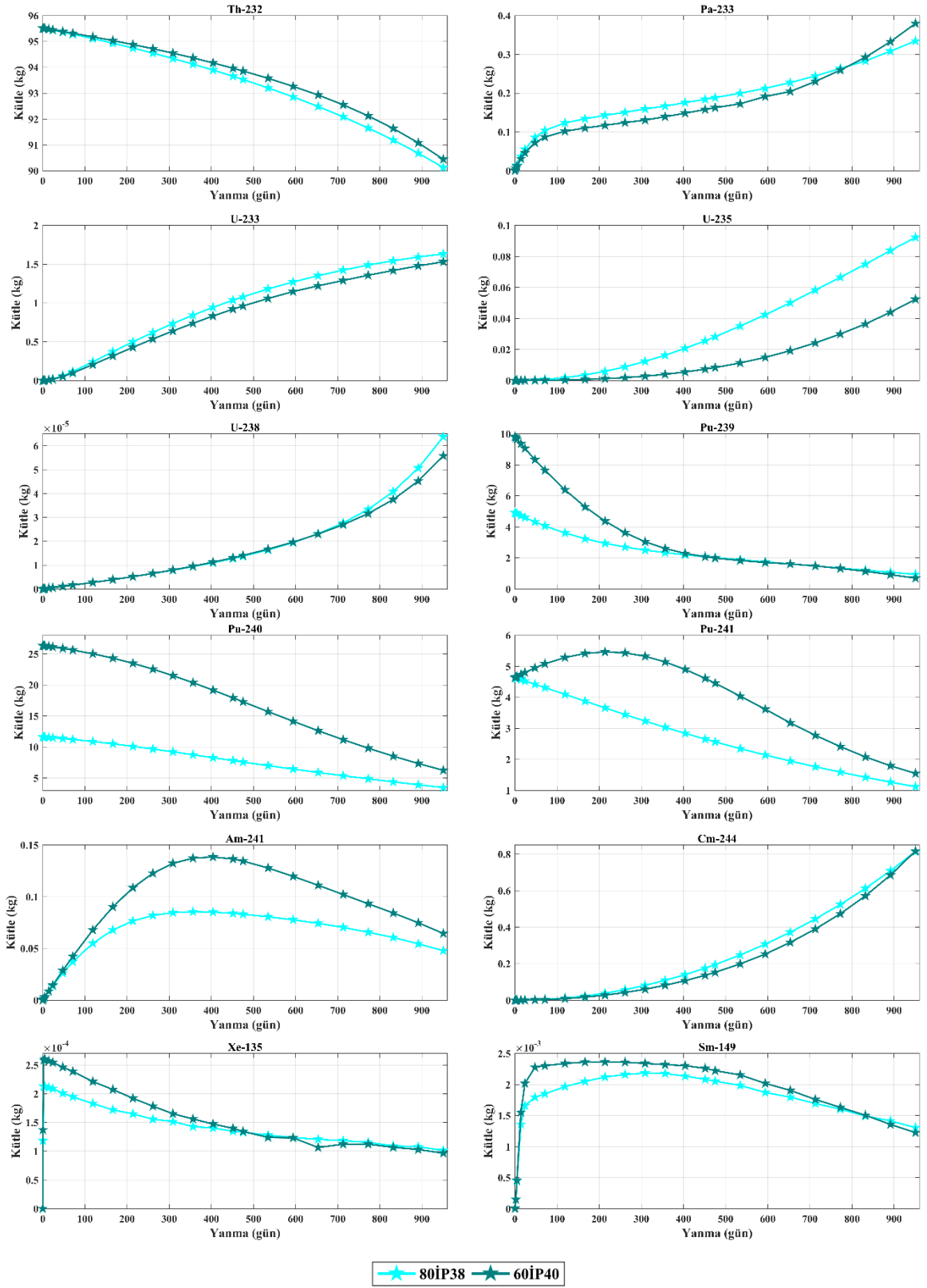
Şekil 4.14’te verilen grafiklerde referans DFR_s geometrisinde YH_{1.85} kullanılmasıyla elde edilen termal reaktörde 60İP40 ve 80İP38 yakıtlarına ait önemli izotopların miktarının yanma boyunca değişimi verilmektedir. Sonuçlara göre ²³²Th izotopu tüketimi ve dolayısıyla ²³³Pa ve ²³³U izotoplarının üretimleri her iki yakıt için paralel seyretmiştir.

İki yakıt karşılaştırıldığında, 60İP40 yakıtında daha fazla ²³⁹Pu ve ²⁴⁰Pu içeriği bulunduğundan dolayı YDB’de bu izotopların miktarı daha yüksektir. 60İP40 yakıtında yüksek miktarda bulunan ²³⁹Pu izotopu yanma boyunca fisyon reaksiyonu yaparak hızla azalmaktadır. 80İP38 yakıtında ²³⁹Pu izotopunun tükenme miktarı 60İP40 yakıtına göre daha azdır. Bunun nedeni ²³⁸Pu izotopunun nötron yakalama reaksiyonu gerçekleştirmesiyle ²³⁹Pu izotopuna dönüşmesidir.

Burada ele alınan her iki yakıtta ²⁴¹Pu miktarı başlangıçta aynıdır. Ancak, 80İP38 yakıtında ²⁴¹Pu miktarı yanma boyunca sürekli düşerken, 60İP40 yakıtında durum biraz farklıdır. 60İP40 yakıtında ²⁴¹Pu izotopu miktarı yanma boyunca artarak 210 günde maksimum seviyeye ulaşmış, daha sonra fisyon reaksiyonu gerçekleştirerek yavaşça azalmıştır. Bunun

nedeni 60İP40 yakıtında yüksek miktarda bulunan ^{240}Pu izotopunun nötron yakalama reaksiyonu sonucunda ^{241}Pu izotopuna dönüşmesidir. ^{241}Am izotopunun miktarı ise sistemde ^{241}Pu izotopunun artması ve birikmesiyle artmış ve yaklaşık olarak 400. günde maksimum seviyeye ulaşmıştır.

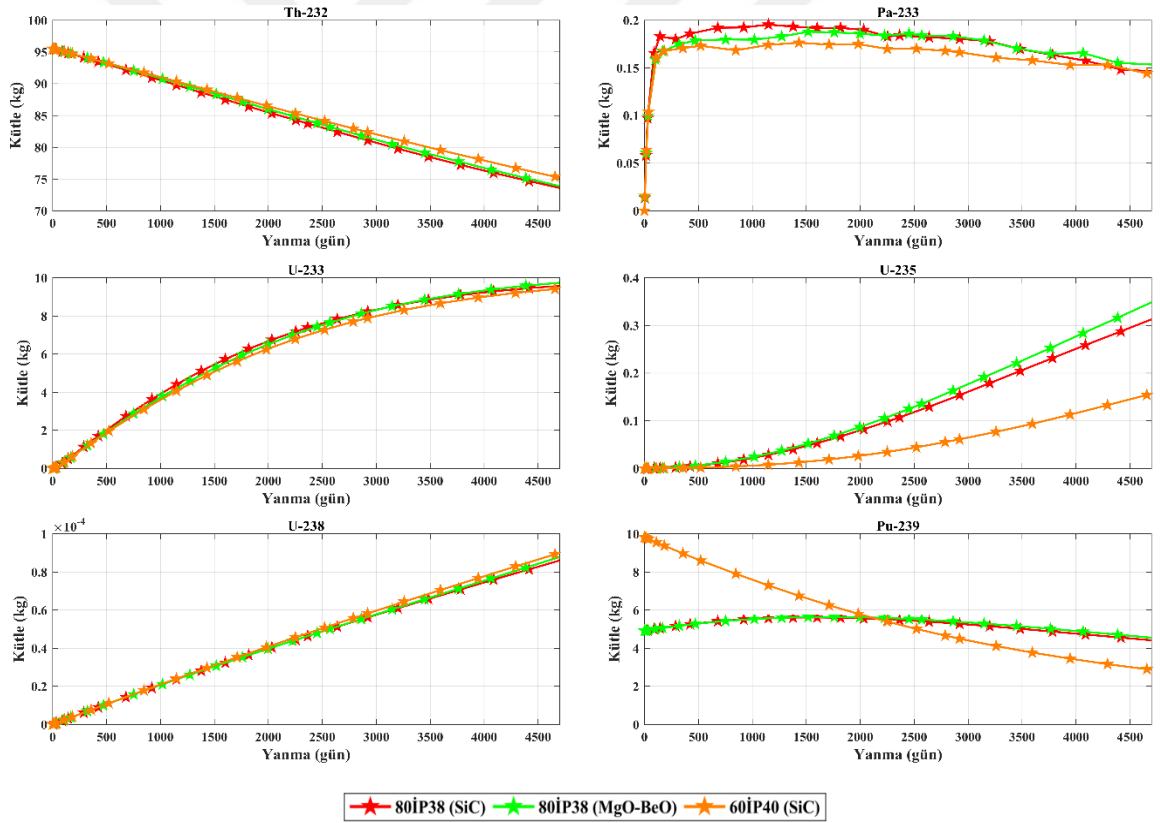




Şekil 4.14 Termal DFR_s konseptinde önemli izotopların yanmaya bağlı değişimi.

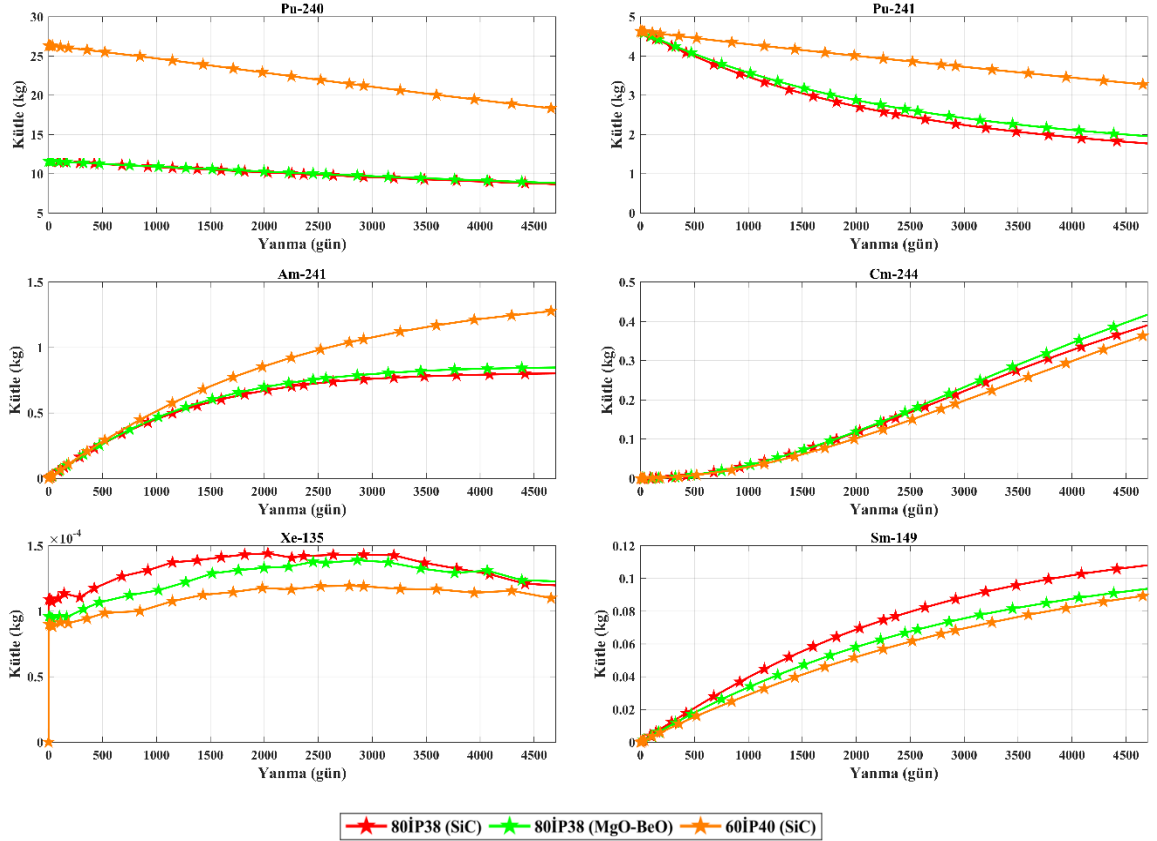
Burada önemli izotopların incelenmesi gereken bir diğer durum, reaktörde $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin bulunduğu geometrilerdir. Burada yakıt tüp malzemesi olarak SiC ve MgO-BeO malzemelerinin kullanıldığı epitermal/hızlı nötron spektrumunda çalışan DFR_s geometrisi incelenmiştir. Bu amaçla, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da 60İP40 ve 80İP38 yakıtlarında bulunan önemli izotopların miktarlarının yanma boyunca sergilediği değişim verilmiştir.

Şekil 4.15’te bulunan grafikler genel olarak incelendiğinde, 80İP38 yakıtının SiC ve MgO-BeO malzemelerinin bulunduğu geometrilerde izotopların yanma boyunca sergilediği davranışların oldukça benzer olduğu, yani SiC ve MgO-BeO malzemelerinin benzer etkilere neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin kullanıldığı geometrilerdeki önemli izotopların yanmaya bağlı değişimi – kısım 1.

Burada ele alınan geometrilerde her iki yakıt için elde edilen davranışlar, Şekil 4.14'te verilen izotoplardaki davranışlarla benzerdir. En büyük fark, $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin kullanılmasından kaynaklanarak sistemdeki toryum ve plütonyum izotoplarının miktarlarının daha yüksek olmasıdır.

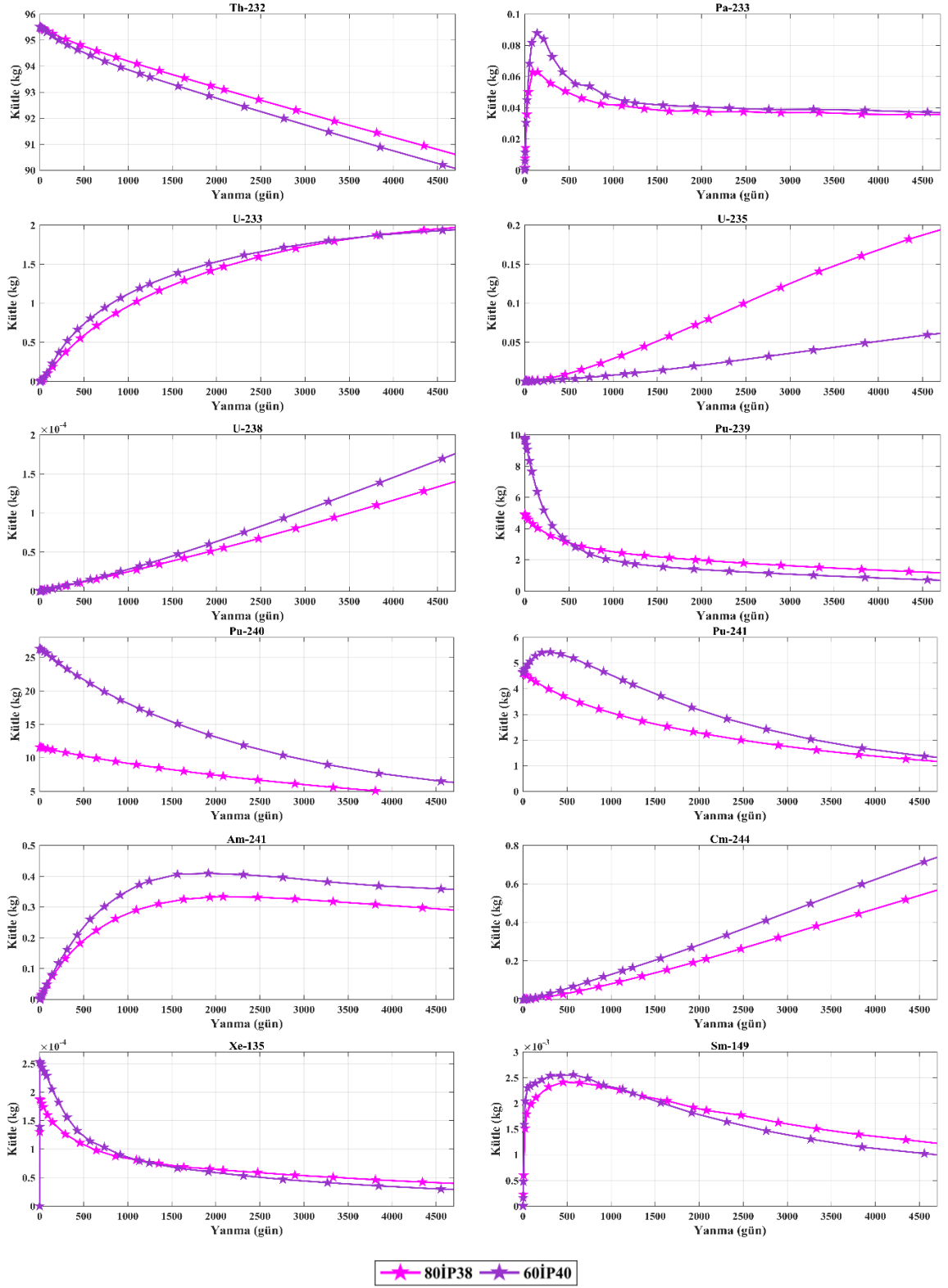


Şekil 4.16 $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketinin kullanıldığı geometrilerdeki önemli izotopların yanmaya bağlı değişimi – kısım 2.

Şekil 4.17'de $\text{YH}_{1,85}$ yavaşlatıcısı kullanılması sonucunda elde edilen termal DFR_s 'de $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketi kullanımı sonucunda önemli izotopların yanma boyunca değişim incelenmiştir. ^{232}Th , özellikle epitermal nötron enerjilerinde yüksek nötron yakalama tesir kesitine sahiptir. ^{233}U üretimi, ^{232}Th 'nin nötron yakalama reaksiyonu sonucunda ^{233}Pa izotopuna ve ^{233}Pa izotopunun β^- bozunumu gerçekleştirilerek ^{233}U izotopuna dönüşmesiyle gerçekleşir. Bu sebepten dolayı termal DFR_s 'de ^{232}Th tüketimi ve buna bağlı olarak ^{233}U izotopu üretimi daha düşüktür.

Her iki yakıt için ^{233}Pa izotopu değişimi incelendiğinde, ilk yanma adımlarında hızla artarak yaklaşık 140 günde maksimum seviyeye ulaşmıştır. Daha sonra, yaklaşık 27 günde gerçekleştirdiği β^- bozunumu ile ^{233}U izotopuna dönüşmüş ve miktarı hızla azalmıştır. Sonuç olarak, yaklaşık 1915 günde dengeye ulaşmıştır.





Şekil 4.17 Termal DFR_s konseptinde ThCl₄-PuCl₃ blanketinin kullanımında önemli izotopların yanma boyunca davranışları.

4.2.2. Referans DFR_s'de üçlü yakıt sistemi

DFR_s için önerilen bir yakıt ise üç bileşene sahip olan NaCl-ThCl₄-PuCl₃ yakıtıdır. Üçlü yakıtta ikili yakıtta olduğu gibi Tablo 4.2'de verilen plütonyum bileşimi kullanılmıştır. Bu yakıt için farklı fisil/ağır metal oranlarına sahip kompozisyonların yanma ile değişen k_{eff} değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada farklı yakıt kompozisyonları ikili yakıt sisteminde olduğu gibi yakıt içerisindeki ²³⁹Pu azaltılma oranı kadar ²⁴⁰Pu izotopunun artırılmasıyla elde edilmiştir. Bu yakıtlara ait kompozisyonlar ve bunlara ait kodlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

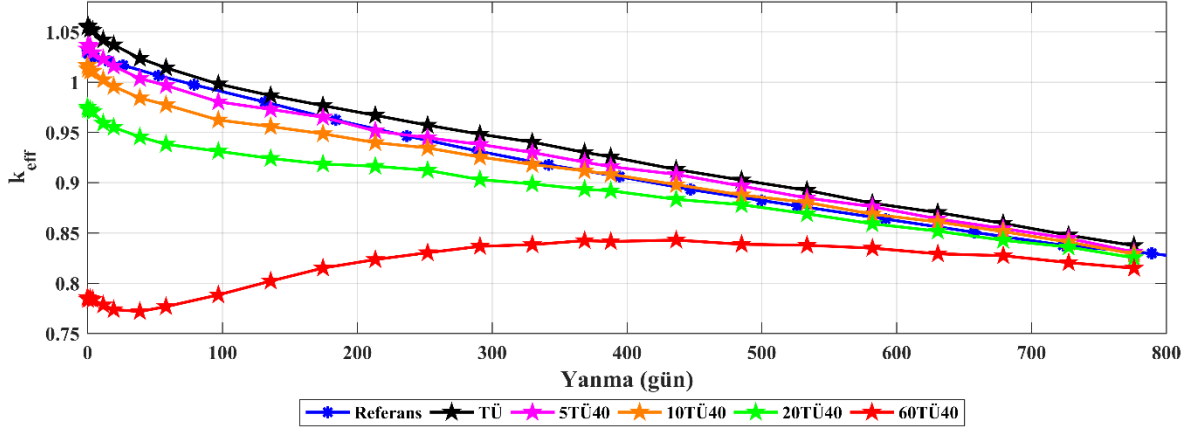
Tablo 4.3 Üçlü yakıt kompozisyonları (wt. %).

İzotop	TÜ	5TÜ40	10TÜ40	20TÜ40	60TÜ40
³⁷ Cl	39,771	39,771	39,771	39,771	39,771
²³ Na	4,815	4,815	4,815	4,815	4,815
²³² Th	36,609	36,609	36,609	36,609	36,609
²³⁸ Pu	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
²³⁹ Pu	9,802	9,312	8,822	7,842	3,921
²⁴⁰ Pu	4,631	5,121	5,612	6,592	10,513
²⁴¹ Pu	1,850	1,850	1,850	1,850	1,850
²⁴² Pu	1,726	1,726	1,726	1,726	1,726
Fisil/Ağır Metal oranı (%)	21,029	20,144	19,260	17,491	10,414

4.2.2.1. Yanma ile keff değişimi

Referans DFR_s geometrisinde Tablo 4.3'te verilen farklı üçlü yakıt kompozisyonlarının yanma ile değişen k_{eff} değerleri üzerindeki etkileri incelenmiş olup sonuçlar Şekil 4.16'daki grafikte verilmiştir. İkili yakıt kompozisyonlarında olduğu gibi en yüksek k_{eff} ve yakıt çevrim ömrüne, en yüksek fisil içeriğine sahip kompozisyon olan TÜ yakıtı kullanıldığı ulaşılmıştır. TÜ ile elde edilen yakıt çevrim uzunluğu 93 gün olarak elde edilmiştir. Tüm üçlü yakıt kompozisyonlarında bulunan ²³²Th izotopunun yüksek nötron yakalama tesir

kesitine sahip olmasından dolayı başlangıçta k_{eff} değerinde hızlı bir düşüş meydana gelmiştir.

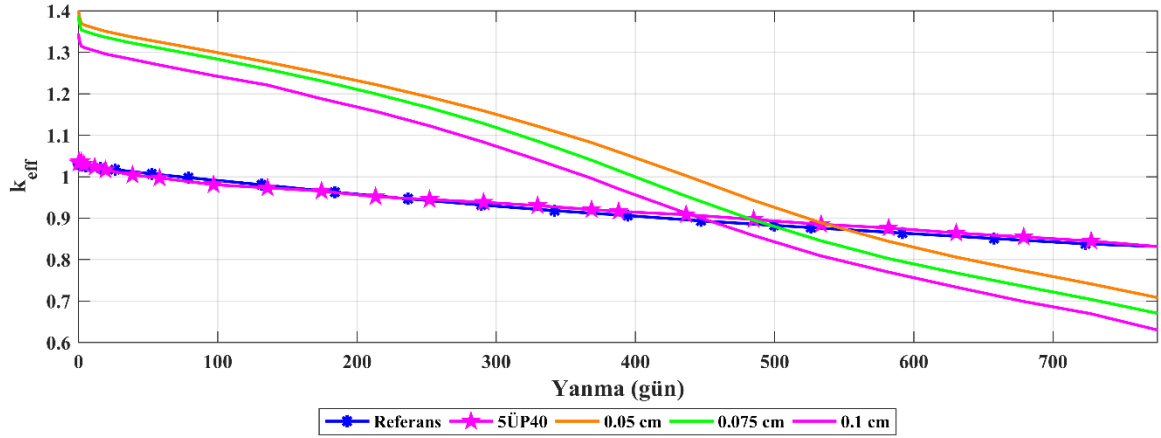


Şekil 4.18 Farklı ^{239}Pu kompozisyonları içeren üçlü yakıt sistemi için yanmaya göre k_{eff} değişimi.

Grafikte gözlemlenen bir diğer durum da yakıtlardaki ^{240}Pu miktarı arttıkça yanma boyunca k_{eff} değişim eğiminin düzleşmesidir. Bunun nedeni, ^{240}Pu izotopunun nötron yakalama reaksiyonu yapmasıyla fisil ^{241}Pu izotopuna dönüşmesidir. 60TÜ40 yakıtının kullanıldığı geometride k_{eff} değeri yaklaşık 39 günden sonra artarak 400 günde maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ancak bu yakıt ile reaktör kritikliğe ulaştırılamamıştır.

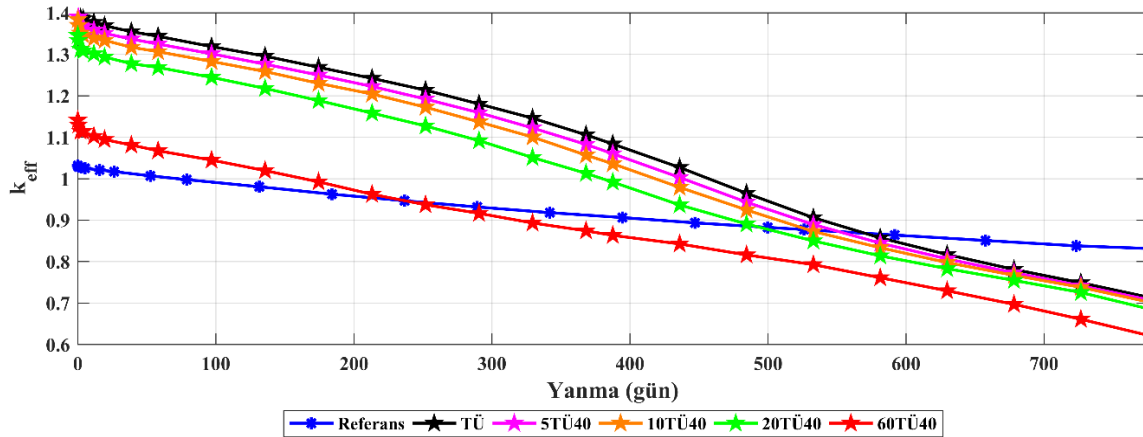
4.2.2.2. $\text{YH}_{1,85}$ etkisi

İkili yakıt sisteminde olduğu gibi üçlü yakıt sistemi için de $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığının etkisi incelenmiştir. Şekil 4.19'da verilen grafikte görülebileceği gibi 20ÜP40 yakıtı için $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığı arttıkça hem başlangıçta ulaşılan k_{eff} değeri hem de yakıt ömrü azalmaktadır. Grafikte elde edilen sonuçlar ikili yakıt kullanıldığında elde edilen sonuçlar ile paraleldir. Sonuç olarak farklı üçlü yakıt kompozisyonları kullanan DFR_s geometrisinde 0,05 cm $\text{YH}_{1,85}$ kalınlığına sahip yakıt tüpü kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 4.19 5ÜP40 yakıtı için $YH_{1,85}$ kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.

Yukarıda değerlendirilen tüm yakıt kompozisyonları için $YH_{1,85}$ 'in etkisini incelenmiş ve Şekil 4.20'de bu yakıtların yanma sürecindeki k_{eff} değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, sisteme $YH_{1,85}$ 'in eklenmesiyle termal nötron sayısı ve dolayısıyla fisil plütonyum izotoplarının fisyon reaksiyonu miktarının artması sonucunda k_{eff} değeri yükselmiştir.

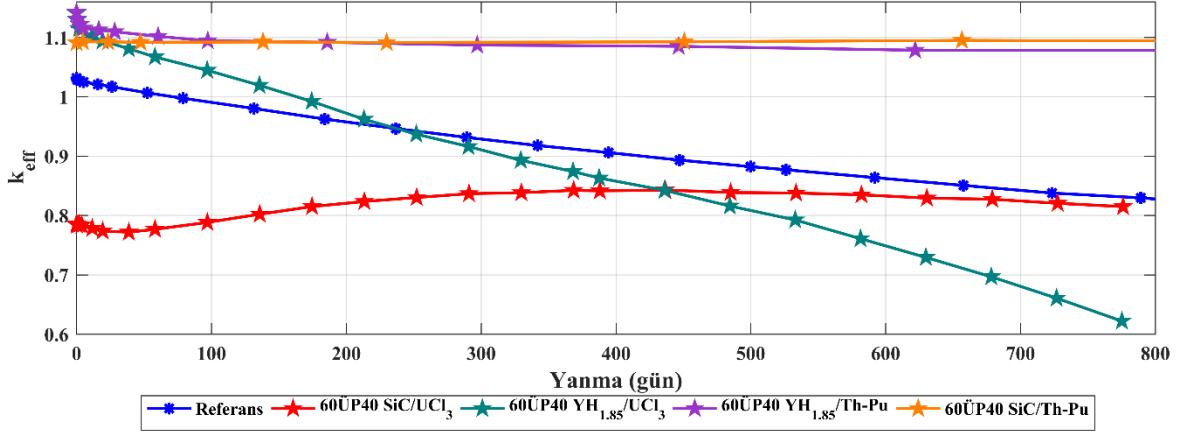


Şekil 4.20 Farklı üçlü yakıt kompozisyonları için $YH_{1,85}$ kullanımının k_{eff} üzerindeki etkisi.

5.2.2.3. Üçlü yakıt geometrisinde $ThCl_4$ - $PuCl_3$ blanketi kullanımı

$YH_{1,85}$ kullanılan geometride $k_{eff} < 1$ elde edilen 60İP40 yakıtı için $ThCl_4$ - $PuCl_3$ blanketi önerilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.21'de sunulmuştur. Sonuçlara göre UCl_3 blanketi

yerine $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketi kullanıldığında üretim oranı ve yakıt döngüsü uzunluğu artmıştır.



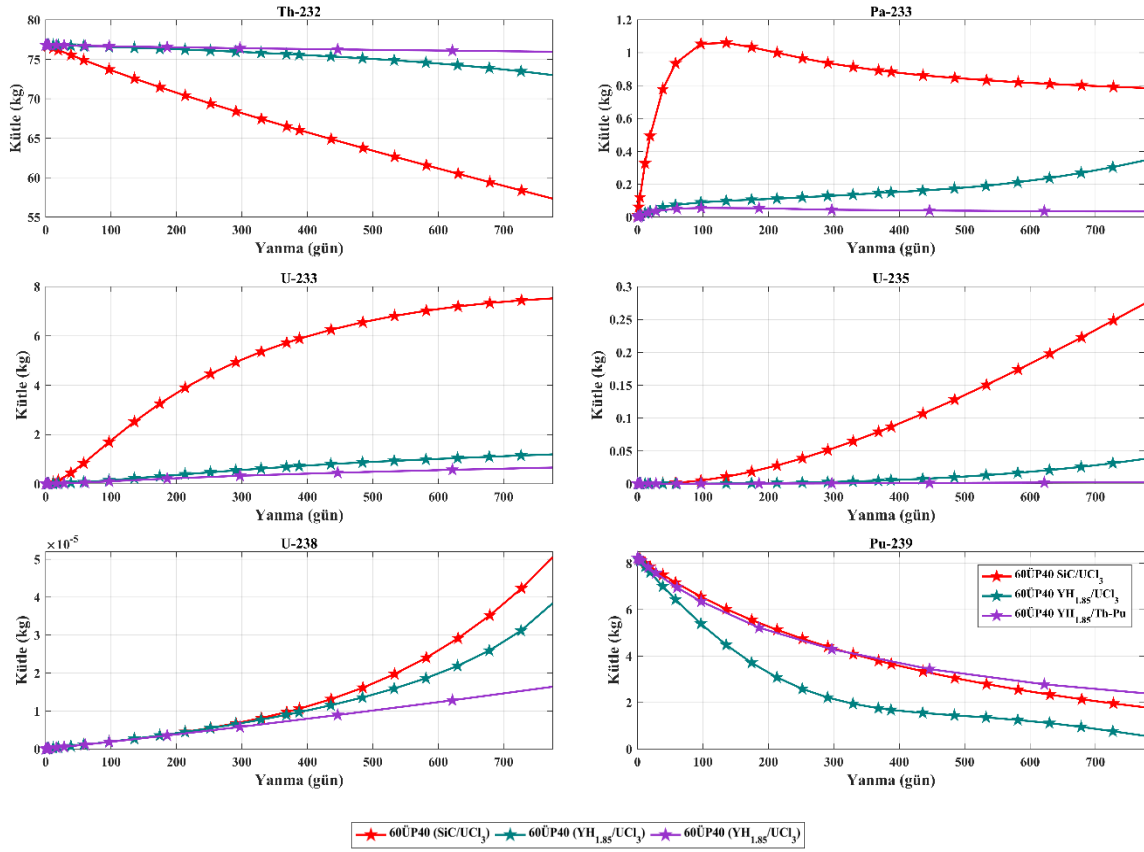
Şekil 4.21 Farklı DFR_s geometrilerinde 60ÜP40 yakıtının k_{eff} üzerindeki etkisi.

60ÜP40 yakıtı SiC yakıt tüpü ve $\text{ThCl}_4\text{-PuCl}_3$ blanketi bulunan geometride k_{eff} değerinde düşüş meydana gelmemiş, üstelik yanma boyunca düşük miktarda artmıştır. Bunun nedeni, blanketteki yüksek ^{238}Pu miktarıdır. ^{238}Pu izotopunun yüksek nötron yakalama tesir kesiti, ^{239}Pu izotopunun fisyon reaksiyonunu artırarak ^{232}Th 'nin nötron yakalama etkisini dengelemiştir. Bu, k_{eff} değerinin YDB'den itibaren stabil kalmasını sağlamıştır. YH_{1.85} ve $^{238}\text{UCl}_3$ blanket kullanılan geometride ise termal nötron sayısı artması nedeniyle ^{238}U 'den üretilen fisil izotop miktarı düşmüştür. Sonuç olarak reaktördeki üretim oranı düşmüş ve daha kısa bir yakıt ömrü elde edilmiştir. Ancak burada elde edilen yakıt ömrü, yakıt içerisinde bulunan ^{232}Th ve plütonyum izotoplarının katkılarından dolayı referans çalışmaya göre daha uzundur ve yaklaşık 175 gün olarak elde edilmiştir.

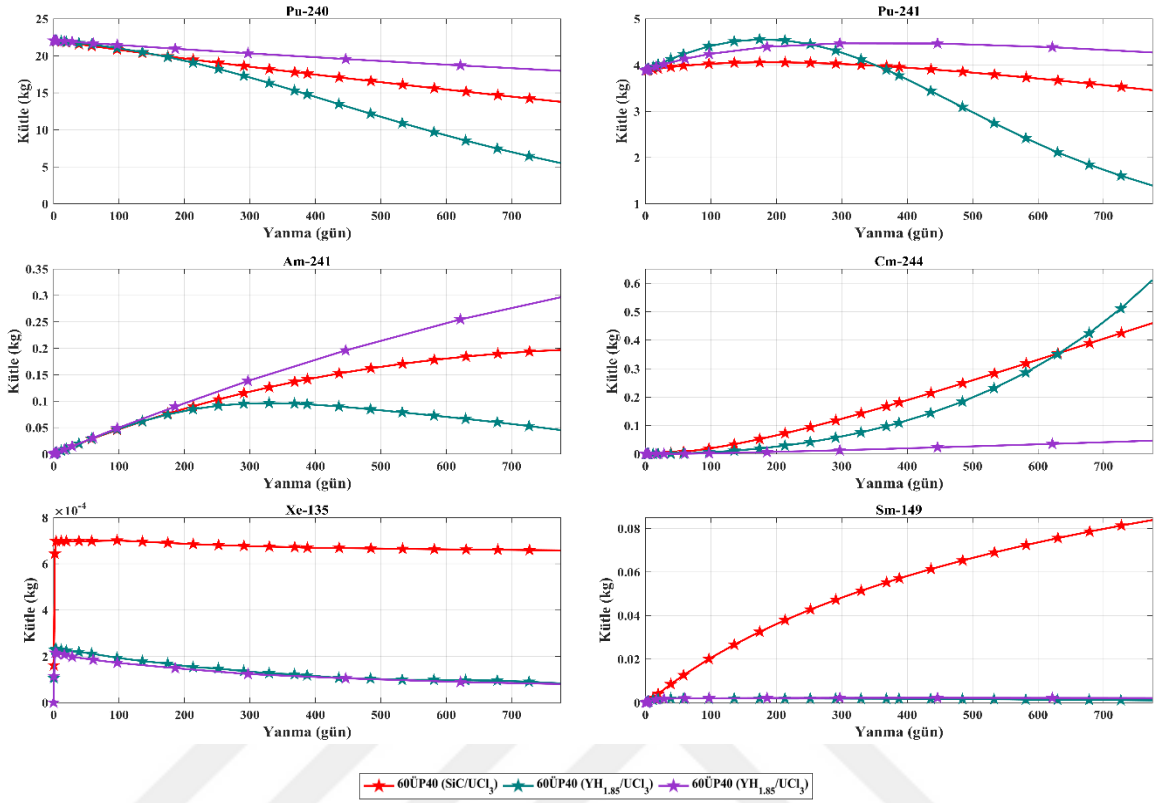
60ÜP40 için elde edilen sonuçlar ikili yakıt bileşimi olan 60İP40 yakıtı ile karşılaştırıldığında elde edilen en büyük fark YDB'deki k_{eff} değerinin 60İP40 için daha yüksek olmasıdır. Bunun nedeni, ikili yakıt sistemindeki fisil plütonyum miktarının daha fazla olmasıdır.

4.2.2.4. Önemli izotoplar

DFR_s konsepti için incelenen bir diğer yakıt üçlü yakıt sistemidir. Farklı DFR_s geometrileri için 60ÜP40 yakıtına ait önemli izotopların yanma boyunca sergilediği davranışlar Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.22 Önemli izotopların farklı geometrilerdeki yanmaya bağlı değişimi– kısım 1.



Şekil 4.23 Önemli izotopların farklı geometrilerdeki yanmaya bağlı değişimi– kısım 2.

Sonuçlarda aynı geometrilerde ikili ve üçlü yakıttaki önemli izotopların davranışlarının birbirine çok benzer olduğu görülmektedir. Buradaki en büyük fark izotopların üretim/tüketim miktarlarıdır. Bunun en büyük nedeni üçlü yakıt bileşiminde yakıt içeriğine NaCl eklenmesiyle ThCl₄ ve PuCl₃ miktarının azalmasıdır.

4.3. DFR_s'de güvenlik: Sıcaklık Geribildirim Katsayıları

Nükleer reaktörde kullanılan malzemelerin sıcaklık değişimlerinin reaktivite üzerindeki etkileri, reaktör güvenliği açısından önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle, malzemelerin sıcaklık değişiminde gösterdikleri bu davranışların reaktör güvenliği açısından değerlendirilmesi için sıcaklık geri besleme katsayıları bulunmaktadır. Reaktör güvenliği açısından, sıcaklık katsayılarının negatif değerde olması istenen bir durumdur; yani, reaktörde kullanılan malzemelerin herhangi bir sıcaklık artışında sisteme negatif reaktivite eklemesi, başka bir deyişle k_{eff} değerini düşürmesi istenmektedir (Lamarsh & Baratta, 2001). Bu bölümde reaktivite değişimi üzerinde en fazla etkisi olan malzemeler olan yakıt

(Doppler), soğutucu ve yavaşlatıcı malzemeleri için sıcaklık geri bildirim katsayıları hesaplanmıştır.

4.3.1. İkili yakıt sistemlerinin sıcaklık katsayıları

İkili yakıt sistemi kullanılan geometrilerde seçilen yakıtlar için yakıt sıcaklığının düştüğü durumlardaki yakıt sıcaklık geri bildirim (Doppler) katsayısı hesaplanmıştır. Tablo 4.1’de verilen yakıt bileşimlerine ait yoğunluk korelasyonları incelendiğinde hem ikili hem de üçlü yakıt için ortak yoğunluk hesaplama aralığı 1100 K ile 1200 K aralığıdır. Bu nedenle, yakıtların 1100 K, 1150 K ve 1200 K sıcaklıkları için yanma hesaplamaları yapılmıştır.

4.3.1.1. Doppler katsayısı

Belirli yakıt ve geometriler için Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanan Doppler katsayılarına ait sonuçlar Tablo 4.4’te verilmiştir. Burada sadece reaktör ömrünü iyileştiren yakıtlar ele alınarak yakıt döngüsünün başlangıcında (YDB) ve yakıt döngüsünün sonundaki (YDS) Doppler katsayısına ait değerler verilmektedir.

Referans geometride ve MgO-BeO yakıt tüpü kullanılan geometride 5İP40 yakıtı için elde edilen tüm Doppler katsayıları ele alınan tüm sıcaklıklarda negatiftir. 10İP38 yakıtının kullanıldığı durumda hem SiC hem de MgO-BeO malzemesi içeren geometri için YDB ve YDS’de negatif Doppler katsayıları elde edilmiştir. Sonuç olarak referans geometride 5İP40 ve 10İP38 yakıtları herhangi bir sıcaklık yükselişinde sistemdeki k_{eff} değerini düşme eğilimindedir.

60İP40 yakıtı için farklı yakıt tüpü malzemelerinde sıcaklık aralıklarına bağlı olarak YDB veya YDS’de pozitif Doppler katsayılar elde edilmiştir. Aynı yakıt kullanıldığında ThCl₄-PuCl₃ blanketi bulunan geometride SiC ve YH_{1,85} kullanıldığı durumlar ele alındığında 1100 K – 1150 K aralığında SiC, 1150 K – 1200 K sıcaklık aralığında ise YH_{1,85} malzemesi için pozitif reaktiviteye ulaşılmıştır. 60İP40 yakıtı ²³⁸UCl₃ blanketi ve YH_{1,85} içeren geometride incelenecek olursa YH_{1,85}, YDB’de düşük sıcaklıklarda pozitif katsayıya sebep olurken yakıtın tükenmesiyle YDB’de negatif katsayıya sebep olmuştur. Ancak 1150 K – 1200 K sıcaklık aralığında bu durum tam tersine dönmüştür.

Tablo 4.4 İkili yakıtlara ait doppler katsayıları (pcm/ ΔK).

Yakıt	Zaman	1100 K- 1150 K	1150 K- 1200 K
5İP40 (SiC/ $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	-7,766	-7,694
	YDS	-12,682	-9,066
5İP40 (MgO-BeO/ $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	-14.458	-4.939
	YDS	-3.788	-11.251
10İP38 (SiC/ $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	-8.321	-12.666
	YDS	-12.538	-9.838
10İP38 (MgO-BeO/ $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	-11.708	-8.892
	YDS	-8.475	-9.516
60İP40 (SiC/ ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	0.445	-3.139
	YDS	0.553	1.362
60İP40 (YH _{1,85} / $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	4,275	-2,462
	YDS	-2,377	4,180
60İP40 (YH _{1,85} / ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	-1,394	6,003
	YDS	-3,559	4,369
80İP38 (YH _{1,85} / $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	-2.232	-0.232
	YDS	-4.243	-2.247
80İP38 (SiC/ ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	-0.863	2.202
	YDS	-2.186	3.149
80İP38 (YH _{1,85} / ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	5.783	-4.190
	YDS	-5.656	-1.197
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı 1.788×10^{-4} - 2.131×10^{-4} arasındadır.			

^{240}Pu izotopunun artırılmasıyla elde edilen bu pozitif reaktiviteleri bertaraf etmek için yakıtlarda ^{240}Pu izotopu yerine ^{238}Pu izotopunun oranı artırılmıştır. Sonuç olarak 80İP38 yakıtı, YH_{1,85} yavaşlatıcı ve $^{238}\text{UCl}_3$ blanketi bulunan geometride kullanıldığında hem YDB hem de YDS'de negatif Doppler katsayıları elde edilerek güvenli çalışma koşulu sağlamıştır.

80İP38 yakıtı, SiC yakıt tüpü ve ThCl₄-PuCl₃ blanketi bulunan geometride kullanıldığında 1150 K -1200 K sıcaklığı arasında hem YDB hem de YDS'de pozitif Doppler katsayısına ulaşılmıştır. Sonuç olarak 80İP38 yakıtı SiC yakıt tüpü ve ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanılan geometride kullanılması uygun değildir.

4.3.1.2. Soğutucu katsayısı

DFR_s'de kullanılan kurşun soğutucu için soğutucu katsayısı 900 K'den 1800 K'ye kadar olan aralıkta, 300 K artışlarla Denklem (3.2)'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler Tablo 4.5'te verilmiştir. 5İP40 yakıtı için elde edilen verilere bakılacak olursa YDB'de 900 K – 1200 K sıcaklık aralığı haricinde tüm sıcaklıklarda negatif reaktivite katsayısına ulaşılmıştır. 900 K – 1200 K sıcaklık aralığında ise düşük bir pozitif reaktivite katsayısı elde edilmiştir. 5İP40 yakıtı ile aynı k_{eff} trendine sahip olan 10İP38 yakıtı için MgO-BeO kullanılan geometride elde edilen soğutucu katsayıları değerleri 5İP40 yakıtına benzerdir.

60İP40 yakıtı için YH_{1,85} içeren geometride 600 K – 900 K ve 900 K – 1200 K aralığında negatif reaktivite katsayısı elde edilirken aynı sıcaklık aralıklarında YDS'de reaktivite katsayıları pozitive dönüşmüştür. 1200 K – 1500 K ve 1500 K – 1800 K sıcaklık aralığında ise tam tersi bir durum söz konusudur; YDB'de pozitif olan reaktivite katsayıları YDS'de negatiftir. Bu değişimin nedeni yakıt kompozisyonunun yanma ile değişmesi olabilir.

60İP40 yakıtı ve YH_{1,85} kullanılan geometride blanket olarak ThCl₄-PuCl₃ kullanıldığı durumda ise soğutucu sıcaklığı 600 K – 900 K olduğu aralıkta pozitif reaktivite elde edilse de 900 K – 1800 K sıcaklık aralığında negatif soğutucu reaktivite katsayıları elde edilmiştir. YDS'de ise 600 K – 900 K ve özellikle 1500 K – 1800 K sıcaklık aralıklarında pozitif reaktivite edilmiştir.

Tablo 4.5 İkili yakıtlara ait soğutucu katsayıları (pcm/ ΔK).

Yakıt	Zaman	900K-1200K	1200K-1500K	1500K-1800K
5İP40 (SiC/ $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	0,161	-0,339	-0,265
	YDS	-0,699	-0,244	-0,588
10İP38 (MgO-BeO/ $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	0.700	-0.376	-0.333
	YDS	0.767	-0.268	-0.342
60İP40 (YH _{1,85} / $^{238}\text{UCl}_3$)	YDB	-0,159	0,185	0,430
	YDS	0,044	-0,114	-0,993
60İP40 (YH _{1,85} / ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	0.953	-1.148	1.008
	YDS	-0.004	0.424	1.668
80İP38 (MgO-BeO/ ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	-0.375	-0.224	0.307
	YDS	-0.953	1.945	-0.617
80İP38 (YH _{1,85} / ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	0.607	-0.607	1.018
	YDS	2.438	-3.746	-1.985
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı 2.623×10^{-4} - 2.792×10^{-4} arasındadır.				

4.3.1.3.Yavaşlatıcı Katsayısı

DFR_s konsepti için önerilen YH_{1,85} yavaşlatıcısına ait sıcaklık katsayıları 900 K – 1800K sıcaklık aralığında Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yavaşlatıcı katsayılarına ait sonuçlar Tablo 4.6’da verilmiştir. 60İP40 yakıtı ait yavaşlatıcı katsayıları $^{238}\text{UCl}_3$ ve ThCl₄-PuCl₃ blanketleri kullanılan termal DFR_s geometrisi (YH_{1,85} bulunan geometri) için hesaplanmıştır. Sonuçlara göre $^{238}\text{UCl}_3$ blanketi kullanıldığında hem YDB hem de YDS’de negatif yavaşlatıcı katsayısı değerleri artmıştır.

Tablo 4.6 İkili yakıtlara ait yavaşlatıcı katsayıları (pcm/ ΔK).

Yakıt	Zaman	900K-1200K	1200K-1500K	1500K-1800K
60İP40 (YH _{1,85} / ²³⁸ UCl ₃)	YDB	-0,69793	-9,4246	-13,601
	YDS	-0,64319	-4,0537	-9,0674
60İP40 (YH _{1,85} / ThCl ₄ - PuCl ₃)	YDB	-0,86598	-8,3395	-13,982
	YDS	-0,758	-2,273	-1,021
10İP38 (MgO-BeO/ ²³⁸ UCl ₃)	YDB	-0.546	–	–
	YDS	+0.481	–	–
80İP38 (MgO-BeO/ ThCl ₄ - PuCl ₃)	YDB	0.053	–	–
	YDS	-2.269	–	–
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $3.008 \times 10^{-4} - 3.292 \times 10^{-4}$ arasındadır.				

4.3.1. Üçlü yakıt sistemlerinin sıcaklık katsayıları

Üçlü yakıt sistemine ait reaktivite hesaplamaları, ikili yakıt için uygulanan adımlar takip edilerek yapılmıştır.

4.3.1.4. Doppler katsayısı

Burada, en uzun yakıt döngüsü sağlayan üçlü yakıtlar için Doppler katsayıları hesaplanmış olup sonuçlar Tablo 4.7’de verilmiştir. Sonuçlara göre referans DFR_s konsepti geometrisinde kullanılmak üzere seçilen TÛ yakıtının ele alınan tüm sıcaklık ve zamanlarda negatif Doppler katsayısı sağlamıştır. Geometriye YH_{1,85} yavaşlatıcısı eklendiğinde, yani termal DFR_s reaktörü için öne çıkan yakıt olan 60İP40 yakıt için de aynı durum söz konusudur. Bu da reaktörde herhangi bir sıcaklık düşüşünde reaktörde negatif reaktivite ekleneceğini ve güvenli bir şekilde çalışacağını göstermektedir. Sonuç olarak iki yakıtın ilgili DFR_s geometrilerinde kullanılabileceği söylenebilir.

Tablo 4.7 Üçlü yakıtlara ait doppler katsayıları (pcm/ ΔK).

Yakıt	Zaman	1100 K-1150 K	1150 K-1200 K
TÜ	YDB	-8,3372	-8,1246
	YDS	-9,6647	-15,127
60ÜP40 (YH _{1,85} / ²³⁸ UCl ₃)	YDB	-1,0231	-1,8813
	YDS	-1,7159	-1,7189
60ÜP40 (YH _{1,85} / ThCl ₄ -PuCl ₃)	YDB	3,0616	-5,3341
	YDS	-5,1448	-1,6360
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $3.435 \times 10^{-4} - 3.448 \times 10^{-4}$ arasındadır.			

Termal DFR_s geometrisinde 60ÜP40 yakıt kullanılan geometride blanket olarak ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanıldığı durumda ise 1100 K-1150 K sıcaklık aralığında pozitif reaktivite elde edilmiştir. Bu da reaktörün ömrünün başlangıcında herhangi bir sıcaklık düşüşünde sisteme pozitif reaktivite ekleneceğini göstermektedir, ancak yakıt tükendikçe yakıt döngüsünün sonunda pozitif reaktivite yerini negatif reaktiviteye bırakmıştır.

4.3.1.5. Soğutucu katsayısı

Temel üçlü yakıt için elde edilen soğutucu katsayılarına ait değerler Tablo 4.8’de verilmiştir. Verilere göre referans geometride temel üçlü yakıt kullanımındaki soğutucu katsayılarının tamamı negatiftir. Bu da TÜ yakıt kullanımında kurşun soğutucuda gerçekleşen herhangi bir sıcaklık değişiminde sisteme negatif reaktivite eklenerek ve k_{eff} değerinin düştüğünü göstermektedir.

Termal DFR_s geometrisi için 60ÜP40 yakıtı seçilmiştir. Sonuç olarak tüm sıcaklıklarda negatif reaktivite elde edilmiştir. Aynı yakıt ve geometride ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanıldığı durumda ise 1100 K-1150 K sıcaklık aralığında YDB’de pozitif reaktivite elde edilmiştir. Ancak yanmayla beraber sisteme negatif reaktivite eklenmektedir.

Tablo 4.8 Üçlü yakıtlara ait soğutucu katsayıları (pcm/ΔK).

Yakıt	Zaman	900 K-1200 K	1200 K-1500 K	1500 K-1800 K
Temel Üçlü	YDB	0,033	-0,866	0,183
	YDS	-0,530	0,667	-0,925
60ÜP40 (YH_{1,85}/²³⁸UCl₃)	YDB	0,166	-0,209	0,174
	YDS	-0,257	-0,009	0,653
60ÜP40 (YH_{1,85}/ ThCl₄- PuCl₃)	YDB	-0,817	-0,110	0,547
	YDS	-1,127	1,296	-0,494
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $3.003 \times 10^{-4} - 3.170 \times 10^{-4}$ arasındadır.				

4.3.1.6. Yavaşlatıcı Katsayısı

Üçlü yakıt için yavaşlatıcı katsayısı sadece YH_{1,85} malzemesi için hesaplanmış olup sonuçlar Tablo 4.9’da verilmiştir. UCl₃ blanket kullanıldığı durumda hem YDB hem de YDS’de tüm sıcaklıklar için negatif reaktivite katsayısı elde edilmiştir. Bu da referans geometride YH_{1,85} yavaşlatıcısının beklenen güvenli çalışma koşullarını sağladığını göstermektedir. Aynı yakıt için geometride ThCl₄-PuCl₃ blanketi kullanıldığında 900 K-1200 K sıcaklıklarda pozitif reaktivite elde edilmiştir ve bu, yavaşlatıcı için istenmeyen bir durumdur.

Tablo 4.9 Üçlü yakıtlara ait yavaşlatıcı katsayıları (pcm/ΔK).

Yakıt	Zaman	900 K-1200 K	1200 K-1500 K	1500 K-1800 K
60ÜP40 (YH_{1,85}/²³⁸UCl₃)	YDB	0,009	-8,125	-14,737
	YDS	0,975	-5,437	-9,119
60ÜP40 (YH_{1,85}/ ThCl₄- PuCl₃)	YDB	0,562	-6,532	-6,413
	YDS	-0,248	-0,466	0,4633
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $2.715 \times 10^{-4} - 3.013 \times 10^{-4}$ arasındadır.				

4.4. DFR_m Sonuçları

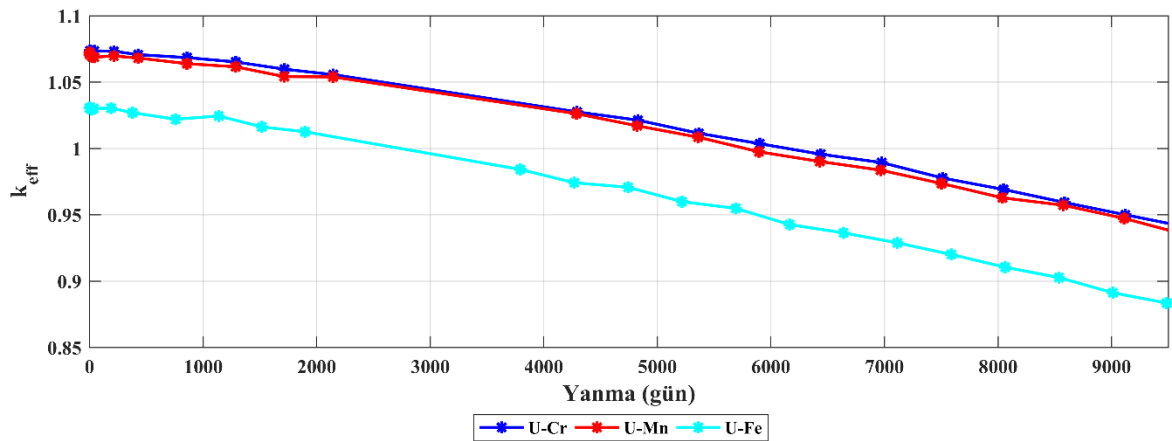
Bu tez çalışması kapsamında metalik yakıt kullanan DFR_m konsepti için U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilmiştir. Seçilen metalik yakıtlardaki katkı maddelerinin yakıt çevrimi üzerindeki etkisinin sağlıklı bir şekilde incelenmesi amacıyla U-Mn ve U-Fe yakıtları için U-Cr yakıtındaki zenginleştirme oranı kullanılmıştır. Ele alınan yakıtlara ait kompozisyonlar Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10 DFR_m yakıt kompozisyonları (wt.%).

Yakıt	²³⁵ U	²³⁸ U	Cr	Mn	Fe
U-Cr	12.80	82.42	4.78	—	—
U-Mn	12.68	81.45	—	5.9	—
U-Fe	12.072	77.728	—	—	10.2

Analiz edilen tüm yakıtlarda kullanılan katkı maddelerinin doğada bulunan izotop kompozisyonlarına göre belirlenmiş olmasıdır. Bu katkı malzemelerinden krom ve demirin doğada bulunan izotoplarına ait atomik bolluklar Tablo 4.11'de verilmiştir. Doğada mangana ait tek izotop ⁵⁵Mn olduğundan bu izotopa ait veriye tabloda yer verilmemiştir.

Seçilen U-Mn ve U-Fe yakıtları için yanma hesaplamaları yapılmış olup, k_{eff} değerinin yanma süresince değişimi Şekil 4.24'te verilmiştir.



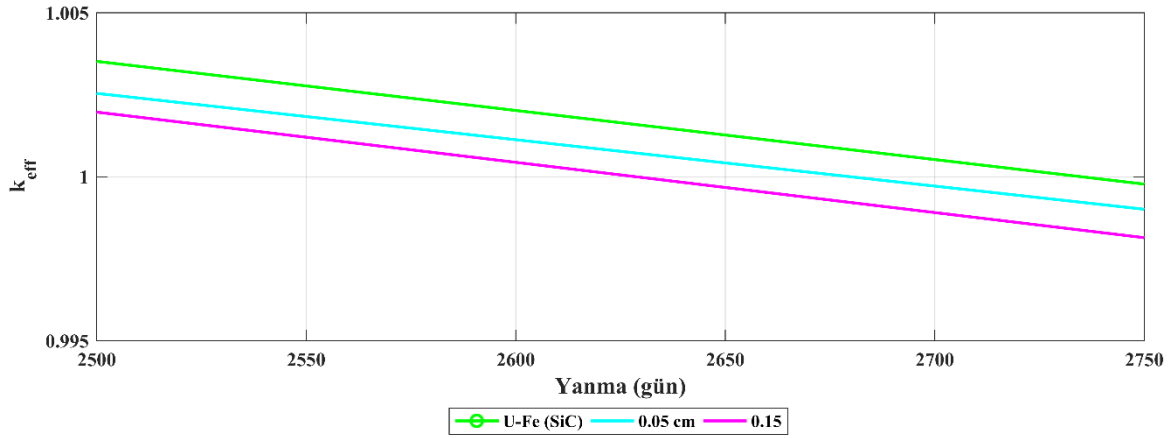
Şekil 4.24 U-Mn ve U-Fe yakıtları için yanma ile k_{eff} değerindeki değişim.

Sonuçlara göre U-Mn yakıtı, U-Cr yakıtına göre çok az bir farkla daha düşük k_{eff} değerlerine sahiptir. Ancak önerilen her iki yakıt için paralel k_{eff} dağılımı elde edilmiştir. Her ne kadar U-Cr yakıtında doğal krom bileşimi kullanılsa da %83,789 bolluk oranına sahip ^{52}Cr izotopunun ^{55}Mn izotopundan daha düşük yakalama tesir kesitine sahip olması, U-Mn yakıtında U-Cr yakıtına göre daha düşük k_{eff} değeri elde edilmesine neden olmaktadır.

U-Fe yakıtı için YDB’de elde edilen k_{eff} değeri U-Cr ve U-Mn yakıtlarına göre çok daha düşüktür ve burada elde edilen yakıt döngüsü ömrü ise 2735 gündür. Bunun en büyük nedeni U-Fe yakıtı kompozisyonunda U-Cr (kütlece %95,22) ve U-Mn (kütlece %94,1) yakıtlarına göre kütlece %89,8 oranla çok daha düşük uranyum içeriğine sahip olmasıdır. Bir diğer neden ise doğal demir izotoplarının nötron yakalama tesir kesitlerinin krom izotoplarına ve ^{55}Mn ’e göre yüksek olmasıdır.

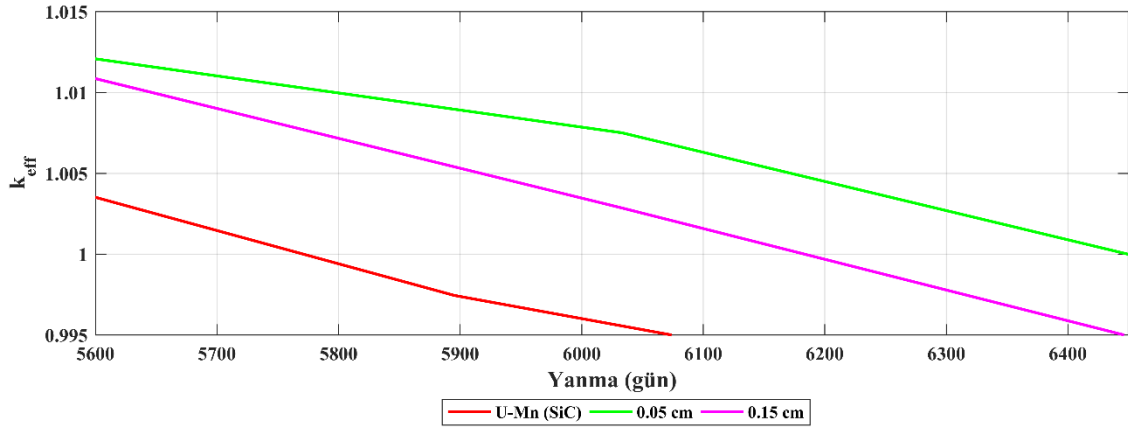
4.4.1. DFR_m konseptinde MgO-BeO etkisi

DFR_s geometrisine YH_{1,85} malzemesinin eklenmesi k_{eff} değerini yüksek miktarda artmıştır. DFR_m konseptinde, DFR_s’de elde edilen verilerin yanı sıra U-Mn ve U-Fe yakıtlarına ait k_{eff} değerlerinin reaktörü kritik edecek düzeyde olması nedeniyle YH_{1,85} yavaşlatıcısı yerine MgO-BeO yavaşlatıcısının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla iki farklı MgO-BeO kalınlığı ele alınmıştır. İlk olarak 0,15 cm kalınlıktaki SiC yakıt tüpünde, SiC kalınlığı 0,05 cm azaltılarak yerine MgO-BeO yavaşlatıcısı eklenmiş, daha sonra SiC yerine 0,15 cm MgO-BeO kullanılarak bu geometrilerin yakıt döngüsü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.25’teki grafikte verilmiştir. Sonuçlara göre U-Fe yakıtı kullanıldığı durumda sistemde MgO-BeO kalınlığı arttıkça yakıt ömrü kısalmıştır.



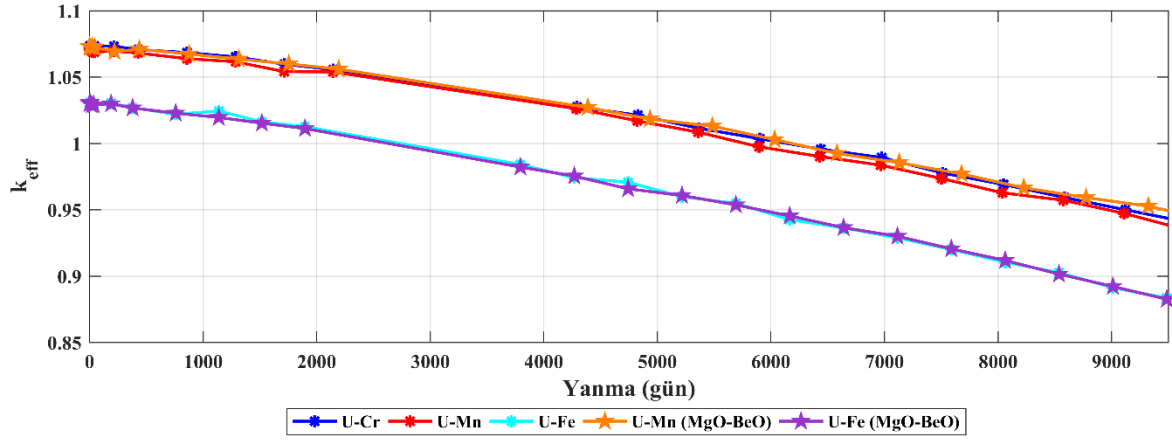
Şekil 4.25 U-Fe yakıtı için MgO-BeO kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.

Aynı işlemler U-Mn yakıtı için de gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Şekil 4.26’da verilmiştir. Grafikte görüleceği gibi U-Mn yakıtında 0,05 cm MgO-BeO kalınlığı 0,15 cm kullanıldığındakinden daha iyi sonuç verse de yakıt çevrimi süresini SiC kullanımına göre kısaltmıştır. Sonuç olarak yakıt tüpü olarak MgO-BeO kullanıldığı taktirde yakıt ömrü yaklaşık 413 gün artmaktadır.



Şekil 4.26 U-Mn yakıtı için MgO-BeO kalınlığının k_{eff} üzerindeki etkisi.

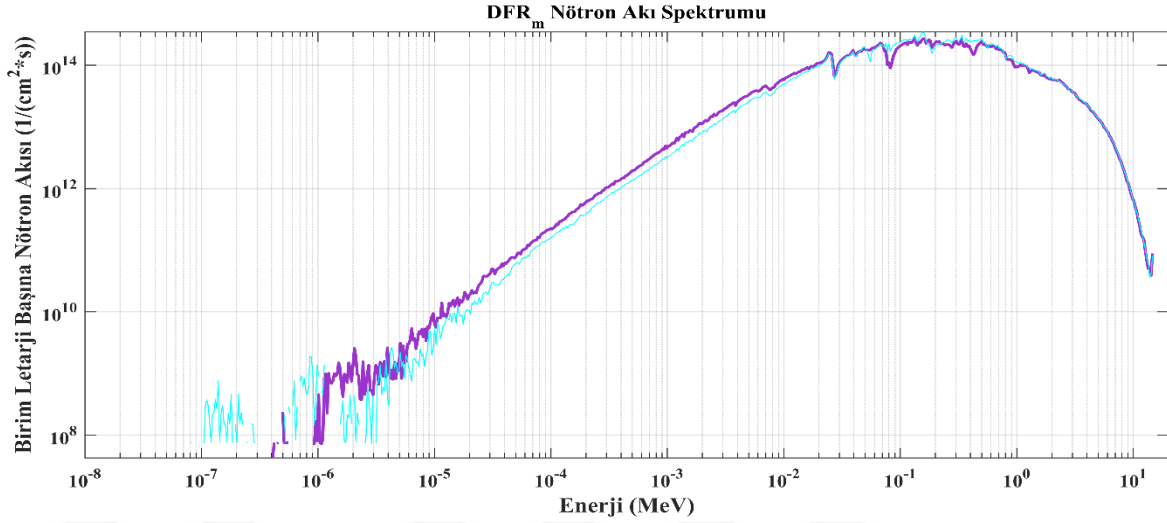
Sonuç olarak her iki yakıt için de SiC yerine 0,15 cm MgO-BeO seramik malzemesinin kullanılması uygun görülmüş olup sonuçlar Şekil 4.27’de verilmiştir. Sonuçlara göre MgO-BeO’nun k_{eff} üzerindeki etkileri SiC’a çok benzerdir.



Şekil 4.27 DFR_m konseptinde MgO-BeO malzemesinin k_{eff} üzerindeki etkisi.

4.4.2. DFR_m konsepti nötron enerji spektrumu

MgO-BeO malzemesinin nötron enerji spektrumundaki etkisini değerlendirmek üzere Şekil 4.28’de nötron enerjisine karşılık gelen birim letarji başına nötron akısı değerlerini gösteren nötron spektrumu verilmektedir. Sonuçlara göre metalik yakıt kullanılan DFR_m geometrisinde MgO-BeO, SiC’a çok benzer davranış sergilemiştir. Bunun nedeni MgO-BeO’nun yavaşlatma katsayısının düşük olmasıdır. Bu malzemenin nötron spektrumunda önemli değişime sebep olabilmesi için sistemde daha fazla miktarda MgO-BeO kullanılması gerekmektedir. MgO-BeO’nun nötronik açıdan malzeme davranışı değerlendirildiğinde, SiC malzemesine alternatif olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.



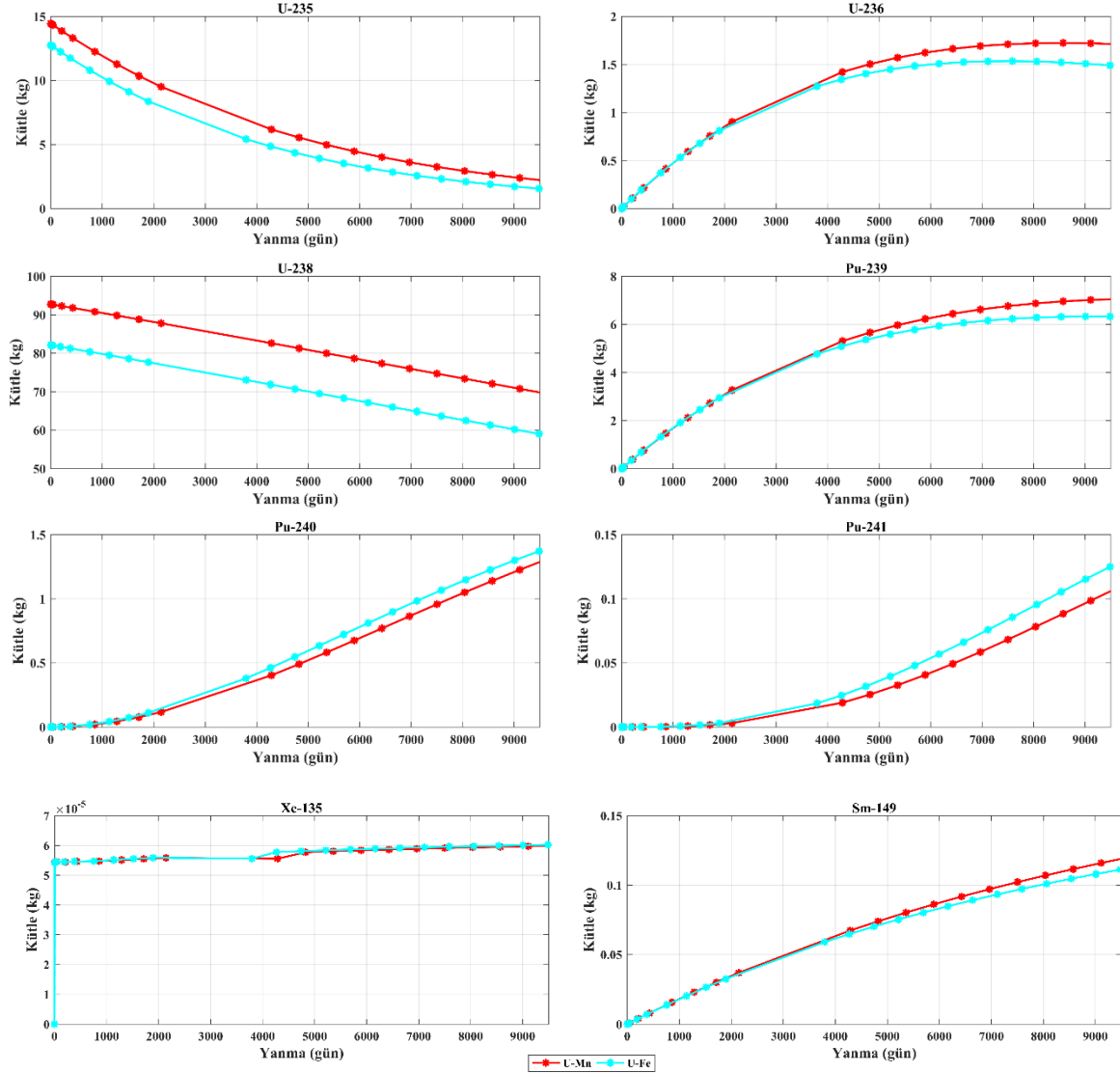
Şekil 4.28 DFR_m konsepti nötron enerji spektrumu.

4.4.3. DFR_m yakıtları için önemli izotoplar

Önerilen yakıtlarda incelenmesi gereken bir durumu yakıt bileşiminde bulunan ve fisyon sonucu üretilen izotop miktarlarının yanma boyunca sergilediği davranıştır. Bu amaçla uranyum yakıtta bulunan ve bu yakıtın fisyon reaksiyonu yapması sonucu oluşan önemli izotoplara ait veriler Şekil 4.29’da verilmektedir.

Demir izotoplarının yakalama ve saçılma tesir kesitleri ⁵⁵Mn’e göre yüksek olsa da bu izotopların tesir kesitleri arasında kritik bir fark olmamasından dolayı izotop değişimlerinde büyük bir fark görülmemektedir. Yakıt bileşimindeki ²³⁵U ve ²³⁸U izotopları incelendiğinde bu izotopların yanma boyunca soğurma reaksiyonları gerçekleştirerek tükendiği görülmektedir. Hem U-Fe hem de U-Mn yakıtları için paralel bir tükenme söz konusudur. Buradaki temel fark, başlangıçta U-Fe yakıtında ²³⁵U miktarının daha az olmasından kaynaklanmaktadır. U-Fe yakıtında demirin daha yüksek elastik saçılma tesir kesitine sahip olmasından dolayı ²³³U ve ²³⁹Pu üretimi U-Mn yakıtındakinden daha azdır. Yine aynı sebepten dolayı ²⁴⁰Pu ve ²⁴¹Pu izotoplarındaki üretim oranı U-Fe yakıtında daha fazladır. ¹³⁵Xe ve ¹⁴⁹Sm izotoplarının üretim miktarları ise iki yakıtta birbirine çok yakındır. ¹³⁵Xe izotopu reaktörün başlangıcında hızla artmış ve dengeye ulaşmıştır. ¹⁴⁹Sm ise kararlı bir izotop olmasından dolayı sistemde birikmeye devam etmektedir. Ancak DFR_m konsepti

çevrimiçi yakıt yeniden işleme prosesi sahip olduğundan dolayı ^{135}Xe ve ^{149}Sm , diğer fisyon ürünleriyle beraber yakıttan uzaklaştırılmaktadır.



Şekil 4.29 Metalik yakıt izotoplarının yanma boyunca değişimi.

4.5. DFR_m'de güvenlik: Sıcaklık geribildirim katsayıları

DFR_s konseptinde olduğu gibi, DFR_m konseptinde önerilen yakıt ve malzemeler için sıcaklık geri besleme katsayıları hesaplanmış olup sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

4.5.1.1. Doppler katsayısı

DFR_m'de ele alınan U-Mn ve U-Fe için hesaplanan Doppler katsayılarına ait sonuçlar Tablo 4.12'de verilmektedir. Buna göre U-Mn yakıtında 1100 K- 1200 K sıcaklık aralığında sistemdeki negatif reaktivite yakıtın yanması sonucunda YDB'den YDS'ye kadar artmıştır. 1200 K- 1400K sıcaklıkları için ise bu durum tersine dönmüştür. Aynı durum U-Fe yakıtı için de söz konusudur. Sonuçlar genel olarak değerlendirilirse SiC yakıt tüpü kullanılan geometride her iki yakıt için hem YDB hem de YDS'de negatif reaktivite katsayıları elde edilmiştir. Bu durumda her iki yakıt sıcaklık değişimlerine karşı istenen güvenliği sağlamaktadır.

Tablo 4.11 DFR_m Doppler katsayıları (pcm/ Δ K).

Yakıt	Zaman	1000 K-1200 K	1200 K -1400 K
U-Mn (SiC)	YDB	-2,9872	-4,4744
	YDS	-3.06915	-2,3736
U-Fe (SiC)	YDB	-1,38158	-6,9251
	YDS	-1.97085	-4,8212
U-Fe (MgO-BeO)	YDB	-5.268	-4.260
	YDS	-18.850	-6.923
U-Mn (MgO-BeO)	YDB	-0.173	-8.422
	YDS	1.9427	-9.679
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $3.007 \times 10^{-4} - 3.549 \times 10^{-4}$ arasındadır.			

Yakıt tüpü olarak MgO-BeO kullanılan geometride U-Fe yakıtı kullanıldığında sistemdeki negatif Doppler katsayıları korunmuştur. Ancak bu durumda U-Mn yakıtı için YDS'de pozitif Doppler katsayısı elde edilmiştir.

4.5.1.2. Yavaşlatıcı katsayısı

Reaktörün nötronik davranışlarını önemli derecede etkileyen bir diğer malzeme yakıt tüpü malzemesidir. DFR_m konsepti için önerilen MgO-BeO malzemesinin yakıt tüpü olarak kullanıldığı durumda sıcaklık artışına karşı reaktivitede yaptığı değişim önemlidir. Bu

yüzden MgO-BeO malzemesine ait yavaşlatıcı katsayıları hesaplanmış olup sonuçlar Tablo 4.12’de verilmiştir. Sonuçlara göre MgO-BeO neredeyse tüm sıcaklıklarda pozitif reaktiviteye sebep olmuştur.

Tablo 4.12 Yavaşlatıcı katsayısı (pcm/ ΔK).

Yakıt	Zaman	900 K-1200 K
U-Fe (MgO-BeO)	YDB	-0.08795
	YDS	0.3295
U-Mn (MgO-BeO)	YDB	0.1767
	YDS	0.70414
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $3.523 \times 10^{-4} - 3.549 \times 10^{-4}$ arasındadır.		

4.5.1.3. Soğutucu katsayısı

Kurşun soğutucuya ait soğutucu katsayıları DFR_m tasarımı için önerilen yakıtlar kullanılarak 900 K– 1800 K sıcaklıkları arasında değerlendirilmiştir. Sonuç olarak SiC kullanılan geometride U-Mn yakıtı için YDB’de 1200 K– 1500 K sıcaklıkları arasında negatif reaktivite katsayısı elde edilse de 900 K-1200 K ve 1500 K – 1800 K sıcaklıkları arasında düşük pozitif reaktivitelere ulaşılmıştır. YDS’de ise bu durumun tam tersi görülmektedir. Aynı durum U-Fe yakıtı için değerlendirildiğinde ele alınan tüm sıcaklıklar için YDB’de negatif reaktivite katsayısına ulaşılmıştır.

Yakıt tüpü malzemesi olarak MgO-BeO kullanılan geometri içinde aynı hesaplamalar yapılmıştır. Ancak SiC gibi, MgO-BeO kullanımında da hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda pozitif reaktivitelere ulaşılmıştır.

Tablo 4.13 DFR_m soğutucu katsayıları (pcm/ΔK).

Yakıt	Zaman	900 K-1200 K	1200 K-1500 K	1500 K-1800 K
U-Mn (SiC)	YDB	0,073	-1,105	0,155
	YDS	-0,954	0,607	-1,313
U-Fe (SiC)	YDB	-0,178	-1,324	-0,617
	YDS	-0,935	-0,682	0,167
U-Mn (MgO-BeO)	YDB	1.154	-2.184	0.120
	YDS	1.996	-1.696	-1.145
U-Fe (MgO-BeO)	YDB	-0.527	0.088	-0.878
	YDS	-4.152	5.144	-2.887
Not: Bu tabloda bulunan verilerin hata oranı $3.070 \times 10^{-4} - 3.404 \times 10^{-4}$ arasındadır.				

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında DFR_s ve DFR_m konseptlerinin nötronik davranışları incelenmiştir. Mevcut çalışmalarda ele alınan uranyum yakıtların aksine, DFR_s 'de toryum-plütonyum yakıt çevriminin nötronik davranışlarını incelemek amacıyla, bu reaktör için $ThCl_4$ - $PuCl_3$ ve $NaCl$ - $ThCl_4$ - $PuCl_3$ yakıtları incelenmiştir. Ele alınan yakıtlarda öncelikle fisil/fertil miktarının yakıt döngüsü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak referans geometride 5İP40 ve 10İP38 yakıtları kullanıldığında referans çalışmada kullanılan yakıt olan $(U-Pu)Cl_3$ 'e göre yakıt döngüsü ömrü yaklaşık 3,5 kat uzamıştır. Bu yakıtların Doppler, soğutucu ve yavaşlatıcı katsayıları hesaplanmıştır ve güvenli çalışma koşulları sağladıkları görülmüştür.

DFR_s konseptinde hızlı nötronların reaktörde kullanılan yapı malzemelerine verdiği zararı indirmek üzere termal DFR_s konsepti elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla $YH_{1,85}$ ve MgO - BeO yavaşlatıcıları önerilmiş ve bu malzemelerin nötron enerji spektrumundaki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, MgO - BeO ve SiC malzemeleri için benzer nötron spektrumu elde edilmiş ve her iki malzeme hızlı nötron spektrumu sağlanmıştır. Termal DFR_s konsepti ise yakıt tüpünde 0,05 cm $YH_{1,85}$ malzemesi kullanılarak elde edilmiştir.

Termal DFR_s 'de 60İP40 yakıtı kullanıldığında referans çalışmaya göre daha uzun yakıt döngüsü ömrüne ulaşılmıştır. Ancak hesaplanan reaktivite katsayılarında pozitif sıcaklık katsayıları elde edilmiştir. Aynı geometride 80İP38 yakıtı kullanıldığında yakıt döngüsü ömrü yaklaşık olarak 23 gün olarak elde edilmiştir. Bu durum için elde edilen Doppler katsayıları negatiftir ve 80İP38, yaklaşık yirmi günde bir yakıt yeniden işleme prosesi uygulanarak DFR_s 'de kullanılabilir.

Termal DFR_s 'de önerilen yakıtlar ile benzer bileşime sahip olan $ThCl_4$ - $PuCl_3$ blanketi kullanıldığında 60İP40 ve 80İP38 yakıtlarının etkisi incelendiğinde yakıt ömrü yaklaşık olarak 4700 güne uzamıştır. Ancak her iki yakıt için hesaplanan Doppler katsayılarında pozitif sıcaklık katsayıları elde edilmiştir.

Sonuç olarak, gelecekteki çalışmalarda, ^{240}Pu izotopunun sisteme getirdiği pozitif katsayılar, yakıt kompozisyonunda yapılacak değişikliklerle bertaraf edilebilir. Burada elde edilen yakıt kompozisyonu ile yakıt döngüsünün uzayacağı öngörülmektedir.

Referans DFR_s geometrisinde üçlü yakıt sisteminden TÜ, en uzun yakıt döngüsünü sağlamıştır. Ancak bu yakıttaki fisil/ağır metal oranı kütlece %21,029 olarak referans (U-Pu) Cl_3 yakıt kompozisyonundaki oranın (kütlece %15,3) çok üstündedir. Ancak TÜ yakıt için elde edilen Doppler katsayıları negatiftir ve reaktörde gerçekleştirilecek herhangi bir sıcaklık artışında malzeme güvenliğini sağlamaktadır. Diğer üçlü yakıt kompozisyonları için ise elde edilen Doppler katsayıları negatiftir. Ancak bu kompozisyonlarda elde edilen yakıt ömrünü referans çalışmaya göre daha kısadır ve bu reaktörde kullanılması önerilmemektedir.

Termal DFR_s geometrisi için düşük fisil izotop içeriğine sahip 60PÜ40 yakıt kullanıldığında yakıt ömrü 163 güne yükselmiştir. Ayrıca bu yakıt için elde edilen Doppler katsayılarının tamamı negatif elde edilmiş ve yakıt malzemesinin güvenliği sağladığı görülmüştür. Ancak $\text{YH}_{1,85}$ yavaşlatıcısı için çalışma sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda (900 K – 1200 K) pozitif sıcaklık katsayıları elde edilmiştir. Buna göre reaktörde düşük sıcaklıklarda $\text{YH}_{1,85}$, herhangi bir sıcaklık yükselişi durumunda reaktiviteyi artıracak şekilde davranış sergiler. Termal DFR_s 'de ThCl_4 -Pu Cl_3 kullanıldığında 60ÜP40 yakıtı, 60İP40 yakıtına benzer davranış göstermiştir. Burada en büyük fark üçlü yakıt bileşiminde toryum içeriğinin daha düşük olması sebebiyle k_{eff} değerinin ikili yakıtı göre daha yüksek olmasıdır.

Burada önerilen $\text{YH}_{1,85}$ ve MgO-BeO yavaşlatıcı malzemelerinin kurşun ve kullanılan yakıt bileşimiyle etkileşimlerinin yanı sıra DFR_s çalışma sıcaklığında $\text{YH}_{1,85}$ içerisinde bulunan hidrojenin malzeme içerisinde yeniden dağılım davranışı incelenmelidir. MgO-BeO nötronik açıdan SiC'a benzer özellik gösterse de termal iletkenliğinin ve yavaşlatma katsayısının düşük olmasından dolayı korda farklı geometrilerde kullanımı değerlendirilmelidir.

Çalışma kapsamında ele alınan bir diğer reaktör metalik yakıt kullanan DFR_m konseptidir. Bu çalışma kapsamında referans DFR_m konseptinde kullanılan U-Cr yakıtı yerine daha düşük erime sıcaklığına sahip U-Mn ve U-Fe yakıtları önerilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde U-Mn yakıtının U-Cr yakıt ile çok yakın k_{eff} değerleri ve yakıt ömrü sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak DFR_m konseptinde U-Mn yakıt kullanıldığında U-Cr ile aynı yakıt döngüsü uzunluğu elde edilerek reaktör çalışma sıcaklığı aralığı genişletilmiştir. U-Mn yakıtının DFR_m geometrisinde güvenlik olarak kullanılabilirliğini gösteren sıcaklık katsayıları incelendiğinde, yakıt tüpü olarak SiC ve MgO-BeO kullanılan durumlarda U-Mn yakıtına ait Doppler katsayıları negatif olduğu görülmektedir. Sonuç olarak U-Mn yakıtının herhangi bir sıcaklık artışında güvenliği sağladığı belirlenmiştir.

U-Fe yakıtı içeriğinde daha az fisil içeriğine sahip olması nedeniyle daha düşük k_{eff} değerleri sağlasa da yanma boyunca sergilediği k_{eff} davranışı, U-Cr yakıtı ile çok benzerdir. Bu yakıt için hesaplanan Doppler katsayıları incelendiğinde elde edilen katsayıların negatif olduğu gözlemlenerek U-Fe yakıtının nötronik açıdan bu geometride kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

SiC, her ne kadar CVD tekniği ile üretilmesi sonucunda etkileşimlere ve korozyona karşı yüksek direnç göstermesi özellikleriyle ön plana çıksa da burada ele alınan her iki yakıttaki bileşenlerin yakıt tüpü malzemesi (SiC) ile etkileşimi incelenmelidir. Reaktörde yakıt tüpü olarak MgO-BeO seramik malzemesi kullanılması planlandığında, bu malzemenin kurşun ve yakıt içeriğindeki elementlerle olan etkileşimleri ile DFR_m çalışma sıcaklığında ve yüksek nötron akısı ortamında değişen malzeme özellikleri incelenmelidir.

Sonuç olarak, gelecek çalışmalarda, mevcut nükleer reaktör tasarımının çeşitli iyileştirme ve optimizasyon potansiyellerini değerlendirmek mümkündür. Özellikle DFR_m konsepti, blanket malzemesi içermemesi, küçük geometriye sahip olması, uzun yakıt ömrü ve yüksek EROI değeri özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. DFR_m tasarımında çeşitli yakıt bileşimi ve malzemeler ile mikro boyutlarda reaktör tasarımının optimize edilmesi ve uygulanabilirliği üzerine odaklanılabilir. Burada, bu sistemde kullanılan yakıt bileşimi, reaktivite kontrolü ve kor geometri tasarımının geliştirilmesi için algoritma tabanlı analizler kullanılarak negatif sıcaklık katsayılarının elde edileceği kompozisyonlar ve geometriler belirlenebilir.

KAYNAKÇA

- Alexander, L. G., Carrison, D. A., Macpherson, H. G., & Roberts, J. T. (1959). *Nuclear characteristics of spherical, homogeneous, two-region, molten-fluid-salt reactors* (ORNL-2751; TID-4500, 14th ed.). Oak Ridge National Laboratory.
- Alwaeli, M., & Mannheim, V. (2022). Investigation into the Current State of Nuclear Energy and Nuclear Waste Management—A State-of-the-Art Review. *Energies*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/en15124275>
- Andersson, D. A., & Beeler, B. W. (2022). Ab initio molecular dynamics (AIMD) simulations of NaCl, UCl₃ and NaCl-UCl₃ molten salts. *Journal of Nuclear Materials*, 568. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153836>
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237-276.
- ASM International. (1992). ASM Handbook Alloy Phase Diagrams (H. Baker, Ed.; 1. bs, C. 3). *ASM International*. <https://tajhizkala.ir/doc/ASM/ASM%20Handbook%20Vol%203.pdf>
- Bak, S. in, Hong, S. W., & Kadi, Y. (2019). Design of an accelerator-driven subcritical dual fluid reactor for transmutation of actinides. *European Physical Journal Plus*, 134(12). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-13015-3>
- Bersano, A., Segantin, S., Falcone, N., Panella, B., & Testoni, R. (2020). Evaluation of a potential reintroduction of nuclear energy in Italy to accelerate the energy transition. *Electricity Journal*, 33(7). <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106813>
- Bettis, E. S., Cottrell, W. B., Mann, E. R., Meem, J. L., & Whitman, G. D. (1957). The Aircraft Reactor Experiment-Operation 1. *Nuclear Science and Engineering*, 2, 841-853.
- Bettis, E. S., & Robertson, R. C. (1969). The Design and Performance Features of a Single-Fluid Molten-Salt Breeder Reactor. *MSBR Design and Performance*, 8, 190-207.
- Bettis, E. S., Schroeder, R. W., Cristy, G. A., Savage, H. W., Affel, R. G., & Hemphill, L. F. (1957). The Aircraft Reactor Experiment-Design and Construction 1. *Nuclear Science and Engineering*, 2, 804-825.
- Chadwick, M. B., Obložinský, P., Herman, M., Greene, N. M., McKnight, R. D., Smith, D. L., Young, P. G., MacFarlane, R. E., Hale, G. M., Frankle, S. C., Kahler, A. C., Kawano, T., Little, R. C., Madland, D. G., Moller, P., Mosteller, R. D., Page, P. R., Talou, P., Trellue, H., ... Van der Marck, S. C. (2006). ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. *Nuclear Data Sheets*, 107(12), 2931-3060. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2006.11.001>
- Cheng, B., Duchnowski, E. M., Sprouster, D. J., Snead, L. L., Brown, N. R., & Trelewicz, J. R. (2022). Ceramic composite moderators as replacements for graphite in high temperature

- microreactors. *Journal of Nuclear Materials*, 563. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153591>
- Cinbiz, M. N., Taylor, C. N., Luther, E., Trellue, H., & Jackson, J. (2023). Considerations for Hydride Moderator Readiness in Microreactors. *Nuclear Technology*, 209, S136-S145. <https://doi.org/10.1080/00295450.2022.2121583>
- Çakar, N. D., Erdoğan, S., Gedikli, A., & Öncü, M. A. (2022). Nuclear energy consumption, nuclear fusion reactors and environmental quality: The case of G7 countries. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(4), 1301-1311. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.10.015>
- Daydas, S., & Tiftikci, A. (2024). Neutronic examination of the U–Mo accident tolerant fuel for VVER-1200 reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(7), 2625-2632. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.021>
- Dual Fluid. (2024, Mart 2). *Reinventing Nuclear*. <https://dual-fluid.com/wp-content/uploads/2022/04/220412-Dual-Fluid-EN.pdf>
- Dual Fluid. (2024, Mart 2). Reaktor DFR-600M. *Reaktor DFR-600M Simulation (3D)*. <https://dual-fluid.com/simulation/en/>
- Dual Fluid. (2023, Eylül 12). *Dual Fluid signs agreement with Rwanda to build demonstration reactor*. <https://dual-fluid.com/dual-fluid-signs-agreement-with-rwanda-to-build-demonstration-reactor/>.
- Duchnowski, E. M., Kile, R. F., Snead, L. L., Trelewicz, J. R., & Brown, N. R. (2020). Reactor performance and safety characteristics of two-phase composite moderator concepts for modular high temperature gas cooled reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110824>
- Duemmler, K., Andersson, D., & Beeler, B. (2024). First-principles investigation of the thermophysical properties of NaCl, PuCl₃, and NaCl-PuCl₃ Molten salts. *Journal of Nuclear Materials*, 591. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.154902>
- Dumaire, T., Ocádiz-Flores, J. A., Konings, R. J. M., & Smith, A. L. (2022). A promising fuel for fast neutron spectrum Molten Salt Reactor: NaCl-ThCl₄-PuCl₃. *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2022.102496>
- Duman, V. (2011). *Fukuşima Nükleer Santral Kazası: Kaza Hikayesi, Geline Son Durum Özeti ve Kazanın Etkileri*. TMMOB Fizik Mühendisleri Odası.
- Energy Institute. (2023). *Statistical review of world energy 2023* (72nd ed.). In partnership with EI, KPMG, & Kearney
- GIF. (2024, Şubat 6). *GIF 2022 Annual Report*. <https://www.gen-4.org/gif/>
- Hanusek, T., & Macian-Juan, R. (2022). Analyses of the shutdown system and transients scenarios for the dual fluid reactor concept with metallic molten fuel. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er.8387>

- Hu, X., & Terrani, K. A. (2021). Thermomechanical properties and microstructures of yttrium hydride. *Journal of Alloys and Compounds*, 867. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158992>
- Huke, A., Ruprecht, G., Weißbach, D., Czerski, K., Gottlieb, S., Hussein, A., & Herrmann, F. (2017). Dual-fluid reactor. İçinde *Molten Salt Reactors and Thorium Energy* (ss. 619-633). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101126-3.00025-7>
- Huke, A., Ruprecht, G., Weißbach, D., Gottlieb, S., Hussein, A., & Czerski, K. (2015). The Dual Fluid Reactor - A novel concept for a fast nuclear reactor of high efficiency. *Annals of Nuclear Energy*, 80, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.016>
- Huke, A., Ruprecht, G., Weißbach, D., Gottlieb, S., Hussein, A. H., & Czerski, K. (2014). The Dual Fluid Reactor - A New Concept for a Highly Effective Fast Reactor. *The 19th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC 2014)*. <https://www.researchgate.net/publication/265297594>
- IAEA. (1979). Status and Prospects of Thermal Breeders and their Effect on Fuel Utilization.
- IAEA. (2005). Management of high enriched uranium for peaceful purposes : status and trends (1. bs). International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2023a). Nuclear Power Reactors in the World (2023 Edition). International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2023b). Status of Molten Salt Reactor Technology. İçinde Technical Reports Series No. 489.
- IAEA. (2024). NGKB Nuclear Graphite Knowledge Base. Introduction to Nuclear Properties. <https://nucleus.iaea.org/sites/graphiteknowledgebase/Pages/home.aspx>
- IEA. (2021). Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector. <https://www.iea.org/t&c/>
- IEA. (2023). Energy Technology Perspectives 2023. <https://www.iea.org>
- Jahn, D., & Korolczuk, S. (2012). German exceptionalism: The end of nuclear energy in Germany! *Environmental Politics*, 21(1), 159-164. <https://doi.org/10.1080/09644016.2011.643374>
- Kartal, M. T. (2022). The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renewable Energy*, 184, 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.022>
- King, J. C. (1980). Separation Processes (J. J. Carberry, J. R. Fair, M. S. Peters, W. R. Schowalter, & J. Wei, Ed.; 2. bs). McGraw-Hill Book Company.
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). Introduction to Nuclear Engineering (M. J. Horton, L. Curless, E. Katchmar, D. W. Riccardi, V. O'Brien, L. Galen, P. Belfanti, C. Anson, J. Conte, A. Velthaus, B. Kenselaar, T. Piscioti, H. Stark, & K. Molly, Ed.; 3. bs). Prentice Hall.
- LeBlanc, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and Design*, 240(6), 1644-1656. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.033>

- LeBlanc, D. (2011). Denatured Molten Salt Reactors (DMSR): An Idea Whose Time Has Finally Come? *Health and the Environment 31st annual conference of the Canadian Nuclear Society and 34th annual conference of the Canadian Nuclear Society and Canadian Nuclear Association*.
- Leppänen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V., & Kaltiaisenaho, T. (2015). The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>
- Lewitz, J. C., Huke, A., Ruprecht, G., Weißbach, D., Gottlieb, S., Hussein, A., Czerski, K., Lewitz, J.-C., Huke, A., Ruprecht, G., Weißbach, D., Gottlieb, S., Hussein, A., & Czerski, K. (2020). The Dual Fluid Reactor-An Innovative Fast Nuclear-Reactor Concept with High Efficiency and Total Burnup. *atw*, 65(3), 145-154.
- Liu, C., Li, X., Luo, R., & Macian-Juan, R. (2020). Thermal hydraulics analysis of the distribution zone in small modular dual fluid reactor. *Metals*, 10(8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/met10081065>
- Luo, R., Liu, C., & Macián-Juan, R. (2021). Investigation of control characteristics for a molten salt reactor plant under normal and accident conditions. *Energies*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/en14175279>
- METI. (2021). Outline of Strategic Energy Plan Agency for Natural Resources and Energy. https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/
- NEA, & IEA. (2019). Technology Roadmap, *Nuclear Energy*. Nuclear Energy Agency and International Energy Agency.
- OECD NEA. (2024, Haziran 23). OECD NEA. JANIS (Java-based Nuclear Information Software). https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_39910/janis
- Ozawa, K., Nozawa, T., Katoh, Y., Hinoki, T., & Kohyama, A. (2007). Mechanical properties of advanced SiC/SiC composites after neutron irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 367-370 A(SPEC. ISS.), 713-718. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.03.033>
- Piowarska, K. (2023). The Impact of Abandoning Fossil Fuels and the development of Renewable Energy on the Global Labor Market Fossil fuels and renewable energy. *The Central European Journal of Social Sciences and Humanities*, 32(1), 103-136. <https://doi.org/10.48269/2451-0807-sp-2023-1-006>
- Prävălie, R., & Bandoc, G. (2018). Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonization imperativeness, and planetary environmental implications. İçinde *Journal of Environmental Management* (C. 209, ss. 81-92). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.043>
- Pusa, M., & Leppänen, J. (2010). Computing the matrix exponential in burnup calculations. *Nuclear Science and Engineering*, 164(2), 140-150. <https://doi.org/10.13182/NSE09-14>

- Rao, A. S. M., & Narender, K. (2014). Studies on thermophysical properties of CaO and MgO by γ -ray attenuation. *Journal of Thermodynamics*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/123478>
- Renault, C., & Delpech, M. (2005). MOST Final Report (Period November 2001 to October 2004). *CORDIS*. <https://cordis.europa.eu/project/id/FIKI-CT-2001-20183/fr>
- Robertson, R. C. (1965). MSRE Design and Operations Report Part I Description of Reactor Design.
- Robertson, R. C., Briggs, R. B., Smith, O. L., & Bettis, E. S. (1970). Two-Fluid-Molten-Salt Breeder Reactor Design Study (Status as of January 1, 1968).
- ROSATOM. (2016). *The new wave in project management: Highlights 2016*. State Atomic Energy Corporation ROSATOM Engineering Division. ASE.
- Rosenthal, M. W., Haubenreich, P. N., & Briggs, R. B. (1972). *The development status of molten-salt breeder reactors* (ORNL-4812). Oak Ridge National Laboratory.
- Shelley, A., Sharmin, F., Dipa, B., Ovi, M. H., & Salahuddin, M. (2022). Three-stage fuel option for VVER-1200 reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109025>
- Sierchuła, J. (2021). *Determination of the liquid eutectic metal fuel Dual Fluid Reactor design* (Doktora Tezi). National Centre for Nuclear Research Świerk.
- Sierchuła, J., Dąbrowski, M. P., & Czerski, K. (2022). Negative temperature coefficients of reactivity for metallic fuel Dual Fluid Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104126>
- Sierchuła, J., Weissbach, D., Huke, A., Ruprecht, G., Czerski, K., & Dąbrowski, M. P. (2019a). Determination of the liquid eutectic metal fuel dual fluid reactor (DFRm) design – steady state calculations. *International Journal of Energy Research*, 43(8), 3692-3701. <https://doi.org/10.1002/er.4523>
- Sierchuła, J., Weissbach, D., Huke, A., Ruprecht, G., Czerski, K., & Dąbrowski, M. P. (2019b). Determination of the liquid eutectic metal fuel dual fluid reactor (DFRm) design – steady state calculations. *International Journal of Energy Research*, 43(8), 3692-3701. <https://doi.org/10.1002/er.4523>
- Smith, J., Simmons, W. E., Asher, R. C., McKay, H. A. C., & Reed, D. L. (1974). *An assessment of a 2500 MWe molten chloride salt fast reactor* (AEEW-R 956). United Kingdom Atomic Energy Authority, Reactor Group.
- Taylor, R. E. (1962). Thermal conductivity and expansion of beryllia at high temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 45(2), 74-78.
- Terlizzi, S., & Labouré, V. (2023). Asymptotic hydrogen redistribution analysis in yttrium-hydride-moderated heat-pipe-cooled microreactors using DireWolf. *Annals of Nuclear Energy*, 186, 109735. <https://ssrn.com/abstract=4247825>

- United Nations. (2015). *Text of the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*. <https://www.un.org/en/conf/npt/2015/pdf/text%20of%20the%20treaty.pdf>
- Thurnay, K. (1998). *Thermal properties of transition metals* (FZKA 6095). Forschungszentrum Karlsruhe.
- Tiftikci, A. (2024). Possibility of YH_{1.85} and MgO–BeO as a moderator in high temperature reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.105041>
- TÜBİTAK ULAKBİM. (2024, Haziran 22). TRUBA. <https://www.truba.gov.tr/index.php/en/main-page/>
- U.S. Delegation to the 2010 Nuclear Nonproliferation Treaty Review Conference. (2010). *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*. <https://2009-2017.state.gov/documents/organization/141503.pdf>
- U.S. DOE. (2002). *A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems*. Issued by the U.S. Department of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum.
- Wang, C., Liang, Q., Liu, G., Chen, M., & Gao, H. (2019). Fusion crust characteristic of additional SiC particle in cast iron. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 493(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/493/1/012037>
- Wang, G., Li, B., Yang, P., & Andersson, D. A. (2023). Ab-Initio molecular dynamics simulations of binary NaCl–ThCl₄ and ternary NaCl–ThCl₄–UCl₃ molten salts. *Journal of Molecular Liquids*, 385. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122347>
- Wang, M., He, X., Macian-Juan, R., & Wang, X. (2021). One-dimensional transient analysis of the dual-fluid reactor system. *Annals of Nuclear Energy*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108481>
- Wang, X. (2017). *Analysis and evaluation of the Dual Fluid Reactor concept* (Doktora Tezi). Technische Universität München.
- Wang, X., & Macian-Juan, R. (2018). Steady-state reactor physics of the dual fluid reactor concept. *International Journal of Energy Research*, 42(14), 4313–4334. <https://doi.org/10.1002/er.4171>
- Wang, X., Seidl, M., & Macian-Juan, R. (2015). *Preliminary analysis of basic reactor physics of the Dual Fluid Reactor concept*. In *Proceedings of ICAPP 2015* (Paper No. 15270). May 03–06, 2015, Nice, France.
- Wang, X., Zhang, Q., He, X., Du, Z., Seidl, M., Macian-Juan, R., Czerski, K., & Dabrowski, M. (2019). The Neutron Physical Feasibility of a Small Modular Dual Fluid Reactor. The 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27). <https://doi.org/10.1299/jismeicone.2019.27.1229>
- Weber, W. P., Quirk, J. F., Lemmon, A. W. Jr., & Filbert, R. B. Jr. (1957). *Properties of beryllium oxide and carbides of beryllium, molybdenum, niobium, tantalum, and titanium* (Report No. BMI-1165). Battelle Memorial Institute.

- Wider, H., Tuček, K., Carlsson, J., Vidović, D., & Fütterer, M. (2007). *Synergy between fast reactors and thermal breeders for safe, clean, and sustainable nuclear power*. In *Proceedings of the 20th World Energy Congress* (pp. JRC43303). World Energy Council. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC43303>
- Worrall, M., Woolstenhulme, N., Downey, C., Jesse, C., Murdock, C., & Tippet, M. (2024). Fast neutron irradiation capability in existing thermal test reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110731>
- Zou, C. Y., Cai, C. Z., Yu, C. G., Wu, J. H., & Chen, J. G. (2018). Transition to thorium fuel cycle for TMSR. *Nuclear Engineering and Design*, 330, 420–428. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.033>



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : SEMRA DAYDAŞ

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Mersin Akdeniz Anadolu İmam Hatip Lisesi, 2015

Lisans : Sinop Üniversitesi, 2020

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Sinop Üniversitesi, 2022-

Yayın Listesi : Daydas, S., & Tiftikci, A. (2024). Neutronic examination of the U–Mo accident tolerant fuel for VVER-1200 reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(7), 2625-2632. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.021>