

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**FLİNABE BLANKETLİ APEX HİBRİT REAKTÖRÜNDE NÖTRON AKISI
HESAPLAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Güneş AÇIKGÖZ (BORA)

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Ali ARASOĞLU

VAN-2010

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fizik Anabilim Dalı'nda Yrd. Doç. Dr. Ali ARASOĞLU danışmanlığında, Güneş AÇIKGÖZ (BORA) tarafından sunulan “**Flinabe Blanketli APEX Hibrit Reaktöründe Nötron Akısı Hesaplamaları**” isimli bu çalışma “Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği” ve “Fen Bilimleri Enstitüsü Yönergesi”nin ilgili hükümleri gereğince 22/01/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği ile** başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan:

Prof. Dr. Salim ORAK

İmza:

Üye:

Yrd. Doç. Dr. Rafet YILMAZ

İmza:

Üye:

Yrd. Doç. Dr. Ali ARASOĞLU

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Enstitü Müdürü

ÖZET

FLİNABE BLANKETLİ APEX HİBRİT REAKTÖRÜNDE NÖTRON AKISI HESAPLAMALARI

AÇIKGÖZ, Güneş

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali ARASOĞLU

Ocak 2010, 71 Sayfa

Bu çalışmada Flinabe (35:27:38) blanketli APEX hibrit reaktörünün MCNP-X bilgisayar programında modellenmesi (simülasyonu) yapıldı. Program yardımıyla APEX hibrit reaktöründe UF_4 ve ThF_4 katkılı (% 0 -% 12) blanketler kullanılarak reaktör boyunca nötron akısı hesaplamaları yapıldı. Hesaplamalar sonucu nötron akısında ciddi bir artışın olmadığı gözlemlendi. Ayrıca nükleer reaksiyonlar sonucu nötronların blankette ve reaktör boyunca oluşturduğu radyoizotoplar ile yarı ömürleri nükleer tablolar yardımıyla tespit edildi.

Sonuç olarak hibrit blanket tasarımında, reaktör yapı bileşenlerinin kullanılabilir ömürlerinin olumsuz yönde etkilenmediği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: APEX, MCNP-X, Flinabe, Hibrit Blanket, Nötron Akısı

ABSTRACT

NEUTRON FLUX CALCULATIONS İN APEX HYBRID REACTOR WITH FLINABE BLANKET

AÇIKGÖZ, Güneş

Master Thesis, Physics

Supervisor: Assistant Professor Dr. Ali ARASOĞLU

January 2010, 71 pages

In this study APEX Hybrid reactor with Flinabe (35:27:38) blanket was simulated by computer program of MCNP-X. By means of the program, neutron flux calculations were made throughout the reactor via using UF_4 and ThF_4 - doped (% 0- % 12) blankets in APEX hybrid reactor. No considerable increase in neutron flux was detected as a result of calculations. Besides, radioisotopes which were formed by neutrons –produced in nuclear reactions- in balanket and throughout the reactor and half-life of these radioisotopes were determined by means of nuclear tables.

In conclusion, it was determined that available life-times of structure components of reactor were not negatively affected in hybrid blanket design.

Key words: APEX, MCNP-X, Flinabe, Hybrid Blanket, Neutron Flux

ÖNSÖZ

Sunulan bu çalışmada, çeşitli hibrit blanket tasarımlarına karşı tüm reaktör bölgesinin nötron akısı hesaplamaları ve hibrit blanketin reaktör kısımlarının ömrüne etkisinin incelenmesi esas alınmıştır. Bu hesaplamalar MCNP-X bilgisayar programı yardımı ile yapılmıştır.

Tez çalışmamda sabır ve hoşgörüyü bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ali ARASOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince her konuda desteğini, fedakarlığını esirgemeyen sevgili eşim İbrahim Açıkgöz'e ve kız kardeşim Hilal Bora'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Başkanlığı tarafından 2008-FBE-YLO18 kodu ile desteklenmiştir. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Başkanlığı'na 2008-FBE-YLO18 kodlu proje desteğinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji	2
1.2. Enerji Kaynakları	2
1.3. Fisyon	5
1.3.1 Fisyon reaktörleri	8
1.4. Füzyon	12
1.4.1. Temel füzyon reaksiyonları	13
1.4.2. Füzyon reaksiyonunda yayınlanan enerji	14
1.4.3. Füzyon reaktör tipleri	15
1.5. Hibrit Reaktörler	16
2. NÖTRON	17
2.1. Nötronun kütlesi	17
2.2. Nötronun dalga boyu	18
2.3. Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması	19
2.4. Nötron kaynakları	20
2.5. Nötronun madde ile etkileşmesi	21
2.6. Nötron akısı	22
2.7. Blankette (sıvı duvar) nötron üretim reaksiyonları	23
3. APEX FÜZYON REAKTÖRÜ	25
3.1. Flinabe blanketinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar	30
3.2. İlk çelik duvarda nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar	31
3.3. SS316 bölgesinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar	32
3.4. Vakum bölgesinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar	33

4. MONTE CARLO METODU	35
5. BULGULAR	36
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	67
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	1970 yılından 2030 yılına kadar dünyadaki genel enerji talebi.	3
Şekil 1.2.	1970 yılından 2030 yılına kadar bazı ülkelerdeki elektrik talebi.	3
Şekil 1.3.	Fisyon olayının şematik gösterimi.	6
Şekil 1.4.	^{238}U 'in kendiliğinden fisyonuna karşı koyan düzgün bir potansiyel engeli.	8
Şekil 1.5.	PWR (Pressurized Water Reactor) nükleer reaktörünün çalışma sistemi.	10
Şekil 1.6.	Füzyon reaksiyonunun şematik gösterimi.	12
Şekil 1.7.	Füzyon reaksiyonlarının tesir kesitleri.	14
Şekil 1.8.	Füzyon elektrik santrali güç dönüşümü.	15
Şekil 2.1.	Nötron etkileşimlerinin çeşitli kategorileri.	22
Şekil 3.1.	Yerçekimi/Momentum tahrikiyle (GMD) sıvının arka duvara yapışması.	27
Şekil 3.2.	Elektromanyetiksel tutma (EMR).	28
Şekil 3.3.	APEX füzyon reaktörünün şematik görünümü (ARIES-RS konfigürasyonu içine birleştirilen kalın FW/blanket dizaynı).	29
Şekil 3.4.	ARIES/CLIFF reaktöründe Flinabenin sıcaklık akış diyagramı.	34
Şekil 5.1.	Hesaplama kullanılan APEX hibrit reaktörünün tek boyutlu ölçeklendirilmesi.	49
Şekil 5.2.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ^6Li blanket dizaynı için 0,001 keV - 263,89 keV enerjili nötronların akısı.	50
Şekil 5.3.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ^6Li blanket dizaynı için 316,47 keV - 631,95 keV enerjili nötronların akısı.	50
Şekil 5.4.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ^6Li blanket dizaynı için 684,53 keV - 1000 keV enerjili nötronların akısı.	51
Şekil 5.5.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ^6Li blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı.	51

Şekil 5.6.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li blanket dizaynı için 9 MeV - 13 MeV enerjili nötronların akısı.	52
Şekil 5.7.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı.	52
Şekil 5.8.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 UF ₄ blanket dizaynı için 0,001 keV - 263,89 keV enerjili nötronların akısı.	53
Şekil 5.9.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 UF ₄ blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı.	53
Şekil 5.10.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 UF ₄ blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı.	54
Şekil 5.11.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 UF ₄ blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı.	54
Şekil 5.12.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 UF ₄ blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı.	55
Şekil 5.13.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 UF ₄ blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı.	55
Şekil 5.14.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 ThF ₄ blanket dizaynı için 0,001 keV – 263,89 keV enerjili nötronların akısı.	56
Şekil 5.15.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 ThF ₄ blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı.	56
Şekil 5.16.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 ThF ₄ blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı.	57
Şekil 5.17.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %12 ThF ₄ blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı.	57

Şekil 5.18.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı.	58
Şekil 5.19.	APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı.	58
Şekil 5.20.	APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı.	59
Şekil 5.21.	APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesitinin ayrıntılı gösterimi.	59
Şekil 5.22.	APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı.	60
Şekil 5.23.	APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesitinin ayrıntılı gösterimi.	60
Şekil 5.24.	APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı.	61
Şekil 5.25.	APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesitinin ayrıntılı gösterimi.	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa	
Çizelge 1.1.	Türkiye'nin birincil enerji üretim ve tüketim hedefleri	5
Çizelge 1.2.	Fisyon reaktör tipleri ve özellikleri	10
Çizelge 1.3.	Şubat 2009 İtibariyle Tiplerine Göre İşletmedeki ve İnşa Halindeki Reaktörler	11
Çizelge 3.1.	APEX sıvı duvar alternatifleri	26
Çizelge 3.2.	Flinabe blanketinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları	30
Çizelge 3.3.	İlk çelik duvarda nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları	31
Çizelge 3.4.	SS316 bölgesinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları	32
Çizelge 3.5.	Vakum kısmında nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları	33
Çizelge 5.1.	Hesaplama kullanılan APEX Model-1 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%100 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li)	36
Çizelge 5.2.	Hesaplama kullanılan APEX Model-2 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%98 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li + %2 UF ₄)	37
Çizelge 5.3.	Hesaplama kullanılan APEX Model-3 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%96 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %4 UF ₄)	38
Çizelge 5.4.	Hesaplama kullanılan APEX Model-4 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%94 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %6 UF ₄)	39

Çizelge 5.5.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-5 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%92 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %8 UF ₄)	40
Çizelge 5.6.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-6 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%90 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+%10 UF ₄)	41
Çizelge 5.7.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-7 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%88 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %12 UF ₄)	42
Çizelge 5.8.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-8 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%98 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %2 ThF ₄)	43
Çizelge 5.9.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-9 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%96 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %4 ThF ₄)	44
Çizelge 5.10.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-10 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%94 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %6 ThF ₄)	45
Çizelge 5.11.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-11 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%92 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %8 ThF ₄)	46
Çizelge 5.12.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-12 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%90 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %10 ThF ₄)	47
Çizelge 5.13.	Hesaplama da kullanılan APEX Model-13 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%88 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶ Li+ %12 ThF ₄)	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Kütle numarası
c	Işık hızı
E	Enerji
G	Enerji kazancı
G_0	Kazanç sabiti
h	Planck sabiti
k	Boltzman sabiti
k_{eff}	Etkin nötron çoğalma sayısı
m	Kütle
N	Nötron sayısı
p	Momentum
Q	Reaksiyon sonucunda alınan veya verilen enerji
R	Uzaklık
s	Saniye
T	Sıcaklık
u	Atomik kütle birimi
v	Hız
Z	Atom numarası

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ADS	Hızlandırıcı Sürücülü Sistem (Accelerator Driven System)
APEX	İleri Güç Üretimi (Advanced Power Extraction)
ARIES	İleri Araştırma Yenilik ve Değerlendirme Çalışması (Advanced Research Innovation and Evaluation Study)
BWR	Kaynar Sulu Reaktör (Boiling Light Water Cooled and Moderated Reactor)
EA	Enerji Yükselteci (Energy Amplifier)
eV	Elektron Volt
FBR	Hızlı Üretken Reaktör (Fast Breeder Reactor)
fm	Femtometre
GCR	Gaz Soğutmalı Reaktör (Gas Cooled Graphite Moderated Reactor)
HTGR	Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör (High Temperature Gas Cooled Reactor)
HWGCR	Ağır Sulu Gaz Soğutmalı Reaktör (Heavy Water Moderated Gas Cooled Reactor)
HWLWR	Ağır Su Moderatörlü Hafif Su Soğutmalı Reaktör (Heavy Water Moderated Light Water Cooled Reactor)
kWh	Kilo Watt Saat
LWGR	Hafif Sulu Grafit Moderatörlü Reaktör (Light Water Cooled Graphite Moderated Reactor)
mA	Miliamper
MeV	Milyon Elektron Volt
MCNP	Monte Carlo N Parçacık Taşınım (Monte Carlo N-Particle Transport)
MW	Megawatt
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (Organisation for Economic Cooperation and Development)
SGHWR	Ağır Su Moderatörlü Hafif Su Soğutuculu Reaktör (Steam Generating Heavy Water Reactor)
ST	Küresel Torus (Spherical Torus)
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
X	ABD’de bulunan Halam reaktörü

1. GİRİŞ

Enerji şüphesiz insanlık tarihinde bugün olduğu kadar önem arz etmemiştir. Artan nüfus, şehirleşme, sanayileşme, teknolojinin yaygınlaşması gibi gelişmelere paralel olarak enerji tüketimi kaçınılmaz bir şekilde büyüyor. Buna karşılık enerji tüketiminin mümkün olduğu kadar alt düzeyde tutulması, enerjinin tasarruflu ve verimli olarak kullanılması gerekiyor.

Türkiye'nin son yıllarda nüfus artışı ve kalkınma alanında kaydettiği önemli gelişmeler enerji tüketimine de yansımıştır. En önemli enerji kaynağı olan petrol ve kömür gibi fosil yakıtlar hızla tükenmektedir.

Dünya petrol rezervinin 2050, doğal gazın 2070 ve kömür rezervinin de 2150 yılında tükenmiş olması beklenmektedir. Bu durum, dikkatlerin nükleer enerji ile alternatif enerji kaynaklarının üzerinde odaklanmasına sebep olmaktadır (Baltacıoğlu, 1997).

Bir yandan enerji üreten temel maddelerin bitmesi, öte yandan enerji ihtiyacının artması, insanları tam bir çıkmazla karşı karşıya getirmiştir. Aşırı talep durumunda enerji kısıtlamalarının veya kesintilerinin olması ülkede sosyal –ekonomik sorunlara neden olmaktadır.

Enerji ihtiyacının artmasına paralel olarak enerji fiyatları da artmaktadır. Bu durum, gelişmiş ülkelerden çok gelişmekte olan ülkelerde problem yaratmaktadır. Çünkü bu ülkeler, gelirlerinin daha büyük bir kısmını enerjiye harcamakta olup ve artan enerji faturasını karşılamak üzere diğer istihdam alanlarında kısıtlamaya gitmektedir. Bunun yanında enerji verimliliğini arttıracak yatırımlar açısından, kapasiteleri sınırlı olduğundan enerji sorunu daha da çıkılmaz hale gelmektedir. Bütün bu sorunlar yani arz yeterliliği, fiyat istikrarı ve temin güvenliği aşılsa bile, fosil yakıt bağımlılığının yol açtığı yerel, bölgesel ve küresel çevre sorunları oluşmaktadır. Dünya genelinde enerji kaynaklı olarak atmosfere, 2000 yılında 6.2 milyar ton karbon eşdeğeri yani 22.5 milyar ton karbondioksit salınmış bulunuyor. Bunun yanında bazı enerji türleri işletme sırasında atmosfere net olarak kirletici salmaz. Bu enerji türleri; hidro, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve nükleer enerji türleridir (Altın, 2004).

1.1. Enerji

Enerji kısaca bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanır ve çeşitli süreçlerden sonra bir enerji türü bir başka enerji türüne dönüşebilir. Genel olarak enerji türleri kinetik enerji, potansiyel enerji, kimyasal enerji, elektrik enerjisi, nükleer enerji ve termal enerji şeklinde sınıflandırılır.

Nükleer enerji atomun çekirdeğiyle ilgili bir olaydır. Maddenin yapısını oluşturan en temel parçacığa atom denir. Atomun çekirdeğinde Z tane proton ve N tane nötron vardır, çekirdeğin etrafında ise değişik yörüngelerde dolaşan Z tane elektron bulunmaktadır. Bir çekirdeği genellikle ${}^A_Z X_N$ şeklinde gösteririz. N ise $N = A - Z$ ile bulunur. Burada A kütle numarasını göstermektedir ve kütle numarası A olan bir çekirdek, A tane nükleon içerir.

Atomun oluşumu esnasında atomu meydana getiren nükleonların kütlelerinin bir kısmının kaybolduğu gözlenmiştir. Bu azalan kütle ise ışınım enerjisi ve elde kalan kütlelerin kinetik enerjisi olarak açığa çıkmıştır. Bu enerjiye nükleer enerji denir. Kütle kaybına bağlı olarak enerji (E), kütle kaybı (Δm), ışık hızı (c) olmak üzere Einstein tarafından $E = \Delta mc^2$ şeklinde açıklanmıştır (Krane, 2000; Yapıcı ve Çürüttü, 1997).

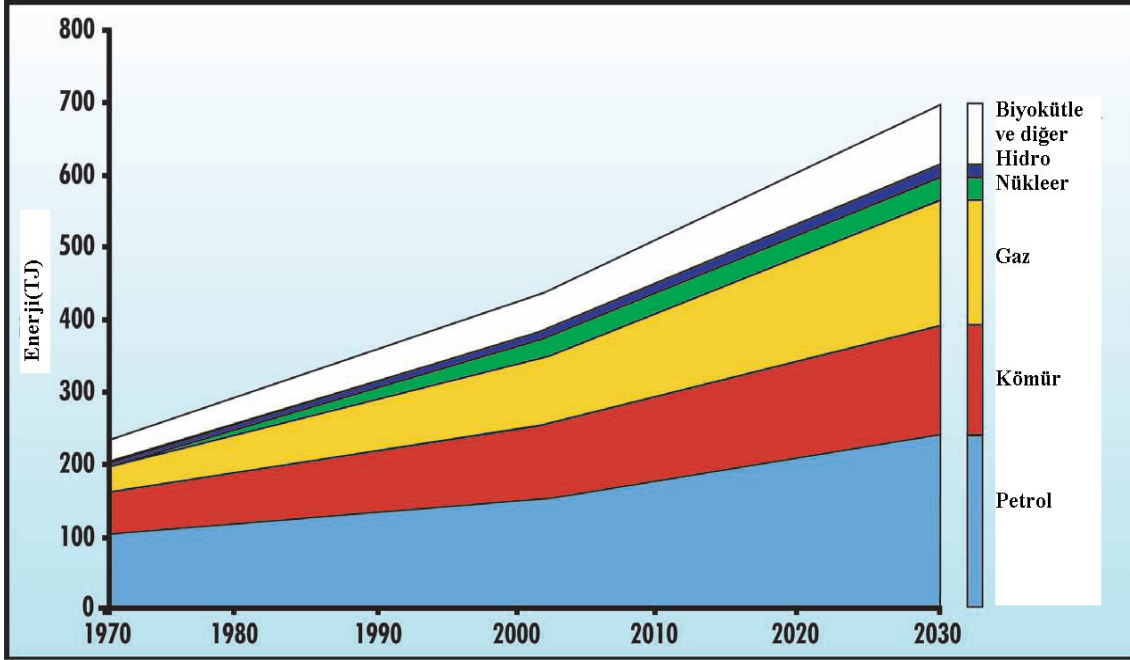
1.2. Enerji Kaynakları

İnsanoğlunun kullandığı enerji kaynakları genel olarak ikiye ayrılır. Bunlardan birincisi yenilenemez enerji kaynakları, ikincisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenemez enerji kaynakları; petrol, kömür, doğalgaz gibi kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında ise güneş gelir.

Güneşten biz hem fosil yakıtlarını hem de temel çağdaş yenilenebilir kaynakları elde ederiz. Güneş gezegenimizi ısıtır ve bitkilerin büyümesi için gerekli ışığı sağlar. Eski jeolojik çağlardan beri Güneş aynı tür enerji girdisini sağladı. Bu enerjisi belli bitki ve hayvan hayatıyla (biomass) birleştirdi ki buradan uygarlığımızın bağlı olduğu tüm önemli fosil yakıtları olan günümüzün kömür, petrol ve doğal gaz kaynakları türemiştir.

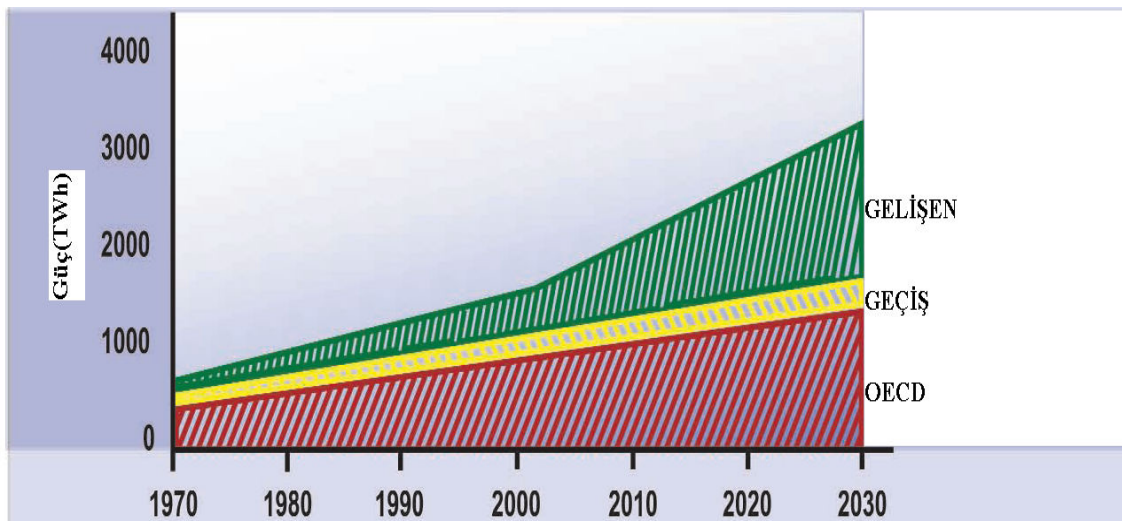
1970'den beri ekonomik faktörler enerji ihtiyacını zoraki hale getirmiş, endüstri ve ulaşımda enerji veriminde görülmemiş bir artışa sebebiyet vermiştir. OECD

ülkelerindeki temel enerji tüketimindeki artışın az olması tahmin edilirken gelişmekte olan ülkelerde bunun daha hızlı olması beklenmektedir.



Şekil 1.1. 1970 yılından 2030 yılına kadar dünyadaki genel enerji talebi (Hore-Lacy, 2006).

Güneş enerjisi günümüzde daha çok gelişmiş ülkelerde katı yakıtların ortaya çıkardığı çevresel sorunları hafifletmek amacıyla alternatif bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisi temiz bir enerji kaynağıdır ve AB ülkeleri başta olmak üzere bu tür temiz enerji kaynaklarına ilgi giderek artmaktadır.



Şekil 1.2. 1970 yılından 2030 yılına kadar bazı ülkelerdeki elektrik talebi (Hore-Lacy, 2006).

Elektrik ihtiyacı tüm enerji ihtiyacından daha çok ve daha hızlı artmaktadır. Dünya tüm enerji ihtiyacının 2002'den 2030'a kadar %60 oranında artması beklenirken, elektrik ihtiyacının iki katı olması, en çok da gelişmekte olan ülkelerde, beklenmektedir (Bkz. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2). Dünya elektrik ihtiyacının 2002'de 16.000 milyar kWh ile karşılaştırıldığında bunun 2030'da yaklaşık 31.600 milyar kWh olacağı ve en büyük artışın (nerdeyse 4000 milyar kWh) Çin'de olacağı beklenmektedir (Hore-Lacy, 2006).

Türkiye birincil enerji kaynakları açısından yeterli bir ülke olmamakla birlikte kömür (özellikle linyit) ve hidroelektrik açısından önemli yerli potansiyele sahiptir. Hidroelektrik enerji yenilenebilir bir enerjidir ve bu enerjinin üretimi diğerlerinden daha ucuz olmaktadır. Suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden yararlanılarak çeşitli tipte hidroelektrik santraller yapılabilir. 2007 yılı Şubat sonu itibariyle Türkiye'nin ekonomik hidroelektrik enerji potansiyeli 129.5 milyar kWh/yıl'dır. Bu potansiyelin yaklaşık %36'sı işletmede, %11'i inşa halinde ve geri kalan %53'ü ise çeşitli proje seviyelerinden oluşmaktadır. 2007 yılı itibariyle 142 adet işletmedeki hidroelektrik santrallerin kurulu kapasitesi 12788 MW değerine ulaşmıştır (Akpınar ve ark., 2008).

Termik santrallerde üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti hidroelektrik santrallerde üretilen elektriğe göre çok daha pahalıdır. Bir termik santralin kurulacağı yerin seçimi yapılırken birçok özelliğe dikkat edilmelidir. En önemli özellikler; enerji kaynağına yakınlığı, yakıtın santrale getirilme yöntemleridir. Bu santrallerde yakıt olarak genellikle linyit, doğal gaz, petrol ve biyokütle kullanılmaktadır. Düşük kalorili linyit yataklarının kullanılması çevre kirliliğine neden olmaktadır.

Çizelge 1.1. Türkiye'nin birincil enerji üretim ve tüketim hedefleri (Bin TEP) (Akpınar ve ark., 2008)

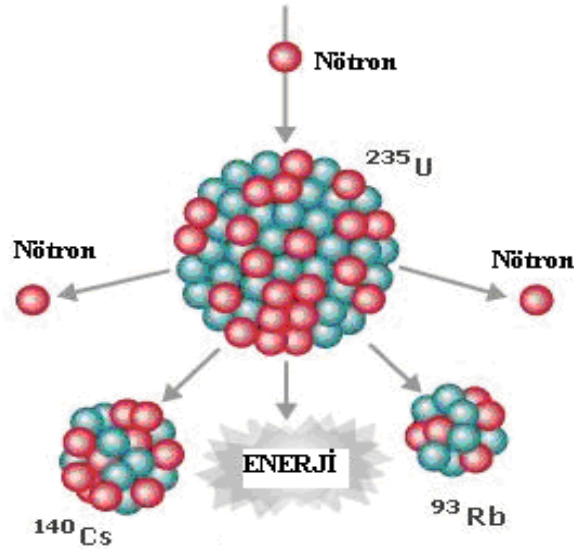
	Enerji üretimi			Enerji tüketimi		
	2010	2015	2020	2010	2015	2020
Taşkömürü	5092	5109	4755	17282	26864	48156
Linyit	18001	24190	32044	18001	24190	32044
Asfaltit	301	301	301	301	301	301
Doğal gaz	1573	1069	693	41184	50420	60918
Petrol	235	213	229	37192	44747	51536
Hidroelektrik	4903	7060	9419	4903	7060	9419
Jeotermal	2080	3166	4914	2080	3166	4914
Rüzgar	421	571	721	421	571	721
Güneş	495	605	862	495	605	862
Odun	3383	3075	3075	3383	3075	3075
Bitki-hayvan artığı	1034	926	850	1034	926	850
Nükleer	0	8229	8229	0	8229	8229
Toplam	37516	54514	66094	126274	170154	222424

Rüzgâr enerjisi de yenilenebilir enerji kaynağı olduğundan enerji de dış ülkelere olan bağımlılığın azalmasına yardımcı olur. Bu enerjinin temel hammaddesi olan rüzgâr, güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde aynı derecede ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve basınç farklarından meydana gelir. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, bataryaların şarj edilmesi, su pompalanması gibi pratik amaçlar için kullanılır.

1.3. Fisyon

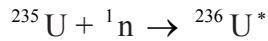
Fisyon, atom çekirdeğinin bölünmesi ya da ağır çekirdeklerin bölünmesi olayıdır. Fisyon olayında önemli ölçüde enerji, nötron ve gama ışınları çıkar. Fisyon doğal bir bozunma sonucu olabildiği gibi kendiliğinden veya nötron ve foton gibi düşük enerjili bir parçacığın soğurulması sonucunda potansiyel engelini aşmak veya çok kolay olarak geçmeye yetecek kadar yüksek enerjili uyarılmış durumlar veya bileşik çekirdek

durumları oluşturarak meydana gelebilir. Yeterli uyarılma enerjisi sağlandığında her çekirdek bölünebilir fakat bu durum ağır çekirdekler için daha önemlidir.



Şekil 1.3. Filyon olayının şematik gösterimi.

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



Bu reaksiyonda uyarılma enerjisi;

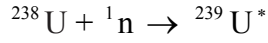
$$E_{uy} = [m(^{236}\text{U}^*) - m(^{236}\text{U})]c^2$$

Termal bölgede nötronun enerjisinin çok küçük olduğunu kabul edersek;

$$\begin{aligned} m(^{236}\text{U}^*) &= m(^{235}\text{U}) + m_n \\ &= 235.043924 \text{ u} + 1.008665 \text{ u} \\ &= 236.052589 \text{ akb} \\ E_{uy} &= (236.052589 \text{ u} - 236.045563 \text{ u}) \times 931.502 \text{ MeV/u} \\ &= 6.5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

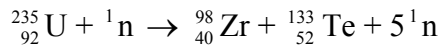
^{236}U için aktivasyon enerjisi 6.2 MeV olarak hesaplanır (Krane, 2002). Buna göre ^{236}U 'yı filyon oluşturabilecek bir duruma yükseltmek için gerekli enerji (aktivasyon enerjisi) ^{235}U 'e bir n ekleyerek sağlanan enerji ile aşılır. Bu, termal bölgede gözlenen

büyük tesir kesiti ile uyumlu olarak, ^{235}U 'in sıfır enerjili nötronlarla fisyonu uğrayabileceği anlamına gelir. "Benzer hesaplama ile



reaksiyonunun uyarılma enerjisini $E_{uy} = 4.8 \text{ MeV}$ olur, bu değer ^{239}U 'un hesaplanan aktivasyon enerjisi 6.6 MeV 'den küçük olur.

^{235}U ile ^{238}U 'in termal nötronlarla fisyonu uğrayabilirlikleri arasındaki farkların başlıca açıklaması, onların sırası ile 6.5 ve 4.8 MeV 'lik uyarılma enerjileri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.



$$\begin{aligned} Q &= [m(^{235}_{92}\text{U}) + m(^1_0\text{n}) - m(^{98}_{40}\text{Zr}) - m(^{133}_{52}\text{Te}) - 5m(^1_0\text{n})] c^2 \\ &= [235.043924 - 97.912735 - 132.910910 - 4 \times 1.0086600] \times 931.502 \text{ MeV/u} \\ &= 172.904 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Coulomb enerjisi;

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

$$V = 1.44 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \times \frac{40 \times 52}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = 1.25 \times 98^{1/3} = 5.7630 \text{ fm}$$

$$R_2 = 1.25 \times 133^{1/3} = 6.3805 \text{ fm}$$

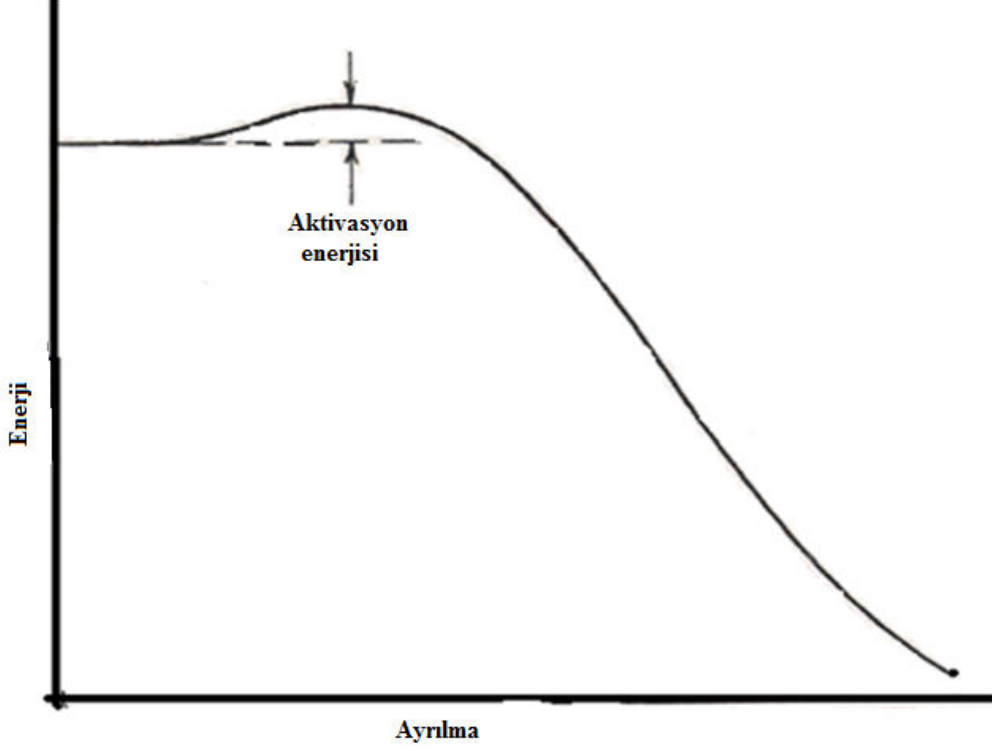
$$V = 246.65 \text{ MeV}$$

Coulomb engeli parçacıkların birbirlerinden ayrılmasını önler ve engel delinmediği için bozunma olasılığı azdır.

Bu hesaplama fisyonun oluşmasının niçin engellendiğini gösterebilir fakat kullandığımız değerler (engel yüksekliği için 246.65 MeV ve serbest bırakılan enerji için 214 MeV) yalnız tahmini değerlerdir ve kolaylıkla değiştirilebilirler.

Kendiliğinden fisyon yapabilen çekirdekler için, açığa çıkan enerji iki parçacığın engeli delip çıkmalarına bir şans tanımak için coulomb engelini hemen altında kalır. Bazı çekirdekler ise fisyon gözlenemeyecek kadar engelin altında kalırlar, fakat bunlar düşük enerjili nötronlar veya fotonlar yardımı ile oldukça küçük bir enerji soğurdıklarında engel yüksekliğinde veya daha üstünde bir ara durum oluşur, bu

durumda indüklenmiş fisyon meydana gelir. Bir çekirdeğin indüklenmiş fisyonla uğraması ara durum enerjisine bağlı olacaktır; bazı çekirdekler için, termal nötronların enerjisi, onları engeli aşmaya yeterli olurken bazıları için hızlı nötronlar gerekli olabilir. Şekil 1.4 ağır çekirdekler için fisyon engelinin daha gerçekçi temsilini göstermektedir.



Şekil 1.4. ^{238}U 'in kendiliğinden fisyonuna karşı koyan düzgün bir potansiyel engeli (Krane, 2002).

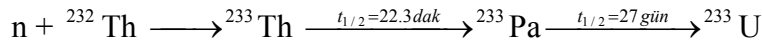
Fisyon ürünleri nötron fazlalığını, fisyon sırasında (10^{-16} s içinde) yayınlamaya atarlar. Bu nötronlara ani nötronlar denir. Bir fisyon olayında yayınlanan ani nötronların sayısı iki fisyon ürününün yapısına bağlı olarak değişir. Fisyonda ani nötronlara ilaveten gecikmiş nötronlar da yayınlanır (Krane, 2002).

1.3.1. Fisyon reaktörleri

Nükleer reaksiyonlar nükleer reaktörler içinde kontrollü bir biçimde sürdürülür. Günümüzde nükleer reaktörler fisyon reaksiyonları esasına göre yapılmışlardır. Fisyon enerjisinin temel kaynağı ^{235}U izotopudur ve nükleer reaktörlerin ana yakıtıdır. Ancak ^{235}U doğal uranyum içinde % 0,7 oranında bulunmaktadır. Bu da günümüz

reaktörlerinin nükleer yakıtın çok az bir miktarını enerjiye dönüştürebildiğini göstermektedir (Yıldız ve Acır, 2005).

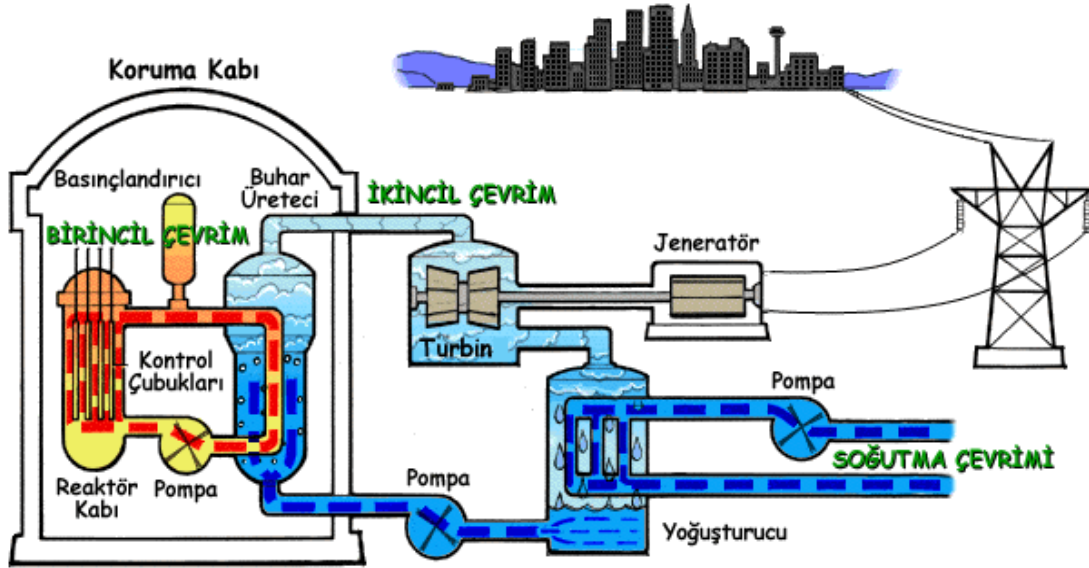
Nükleer yakıt olarak kullanılan uranyum yakıt teknolojisi pek çok ülkede mevcuttur. Yerli kaynaklarımızdan uranyumun (yaklaşık 9000 ton) günümüz koşullarında yakıt olarak kullanılması, dünya piyasalarıyla karşılaştırıldığında, ekonomik gözükmemektedir. Ayrıca, ülkemizde 380.000 ton toryum bulunmaktadır. Ancak mevcut rezervin tenör ortalaması düşüktür (yaklaşık %0.2). Günümüzde toryum tabanlı yakıt çevrimi ticari olarak kullanılmadığından dolayı, ülkemizde bulunan toryum kaynağının ekonomikliğinin değerlendirilmesi çok kolay değildir. Ayrıca uranyum fiyatlarının günümüzde düşük seyretmesi halen uranyuma olan talebin devamını kaçınılmaz kılmaktadır. Unutulmaması gereken bir diğer husus da toryumun tek başına fisil madde, yani nükleer yakıt, olmamasıdır. Diğer bir deyişle, toryum doğrudan nükleer yakıt olarak kullanılamaz ve bir tetikleyiciye gereksinimi vardır. U^{235} veya Pu^{239} ile birlikte kullanıldığında toryum kaynak maddesinden ^{233}U fisil yakıt üretilebilir.



Ekonomikliği bugün için sorgulansa bile uranyum ve toryum yerli kaynaklarımızın varlığı gelecekte nükleer enerji kullanımında ülkemiz için bir güvencedir. Ancak, nükleer enerjide yakıt maliyetinin toplam üretim maliyeti içindeki yerinin çok az (yaklaşık %10-12) olduğu ve dünyadaki uranyum stoklarının ve rezervin fazlalığı nedeniyle gelecekte yakıt maliyetinde fazla bir değişimin beklenmediği gerçeği de göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, nükleer santrallerin bir özelliği de taze yakıtın kolayca depolanabilmesidir. Böylelikle uzun süre yakıt üreticilerine bağlı kalmadan enerji üretimi mümkündür (Anonim, 2009).

Çizelge 1.2. Filyon reaktör tipleri ve özellikleri

Reaktör tipi	Yakıt	Soğutucu	Moderatör
PWR	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Su
BWR	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Su
GCR	Doğal U, zenginleştirilmiş UO_2	CO_2	Grafit
PHWR “CANDU”	Doğal UO_2	Ağır su	Ağır su
LWGR	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Grafit
FBR	PuO_2 ve UO_2	Sıvı sodyum	Yok

**Şekil 1.5.** PWR (Pressurized Water Reactor) nükleer reaktörünün çalışma sistemi (Aytan,2009).

Yeni nesil reaktörler Hızlandırıcı Sürücülü Sistemler (ADS-Accelerator Driven System) veya Enerji Yükselteci (EA-Energy Amplifier) sistemleridir. Dünyada 436 nükleer reaktör vardır ve bu reaktörlerden dolayı nükleer atıklar birikmektedir. (Bkz. Çizelge 1.3). ADS/EA sistemlerinde hem enerji üretimi ve hem de mevcut atıkların dönüşümü mümkün olmaktadır. Gelişmiş ülkelerin problemleri enerji üretiminden ziyade mevcut atıkların yok edilmesidir. Gelişmekte olan ülkelerde ise enerji üretimi ve bu üretim sonucu ortaya çıkabilecek atıkların zararsız hale getirilmesi öncelikle düşünülmektedir.

ADS/EA sistemleri konvansiyonel nükleer reaktörlerdeki olası kritiklik kazası ($k_{eff} > 1$) riskinin giderileceği ($k_{eff} = 0.96-0.98$ aralığında), pasif güvenliğe sahip bir kritikaltı reaktör sistemiyle, yüksek proton akımlı (>10mA) ve enerjili bir hızlandırıcı kompleksinin birlikte çalıştırılarak, daha yüksek verimle enerji üreten ve mevcut radyoaktif atıkları kısa ömürlü radyonüklitlere dönüştürerek yakmak için planlanan reaktörlerdir.

ADS, hızlandırıcı, ısının oluştuğu birim ve ısının transfer edildiği-kullanıldığı bölüm olarak üç kısma ayrılabilir. ADS'de fisyon yöntemiyle elde edilen ısı, elektrik enerjisi üretmek ve hızlandırıcıyı beslemek için kullanılır. Etkin nötron çoğalma sayısı k_{eff} , G_0 kazanç sabitidir ve enerji kazancı G ;

$$G = \frac{G_0}{1 - k_{eff}} \quad (1.1)$$

denklemleri hesaplanır.

Gelecek 10 yıl içinde ADS/EA için araştırma ve geliştirme, tasarım, yapım aşamaları gerçekleştirilecek. Bu aşamalarda, yakıt ve soğutucu seçimi, hızlandırıcı ve hedef sisteminin birleştirilmesi ile 2015 yılından itibaren de kritikaltı sistemlerin hizmete alınması ve çalıştırılması planlanmaktadır (Karadeniz ve ark., 2001).

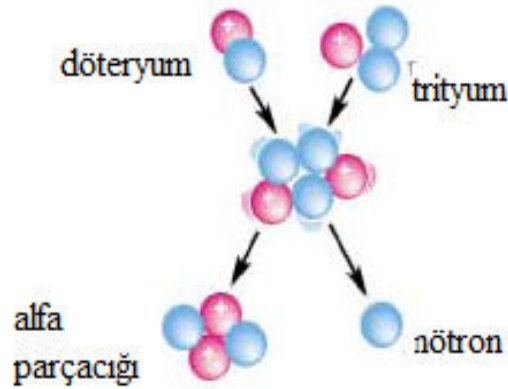
Çizelge 1.3. Şubat 2009 İtibariyle Tiplerine Göre İşletmedeki ve İnşa Halindeki Reaktörler (Anonim,2009)

Reaktör tipi	İşletmede		İnşa halinde		Tekrar çalıştırılmamak üzere kapalı	
	Ünite sayısı	Toplam MWe	Ünite sayısı	Toplam MWe	Ünite sayısı	Toplam MWe
BWR	92	85710	3	3925	23	6671
FBR	2	690	2	1220	6	1578
GCR	18	8909			34	5977
LWGR	16	11404	1	925	8	4953
PHWR	44	22441	4	1298	5	307
PWR	264	243051	34	31520	34	15645
HTGR					4	679
HWGCR					3	263
HWLWR					2	398
SGHWR					1	92
X					2	87
TOPLAM	436	370205	44	38888	122	36650

Şubat 2009 itibarıyla dünyada ticari olarak işletilmekte olan 436 nükleer reaktör vardır. Nükleer güç dünya elektrik talebinin yaklaşık %16'sını karşılamaktadır (Anonim, 2009).

1.4. Füzyon

Füzyon, iki çekirdeğin birleşerek daha ağır bir çekirdek oluşturması olayıdır. Füzyon tepkimeleri Güneş'te her an doğal olarak gerçekleşmektedir. Güneşin yaklaşık 15×10^6 °C olan merkez sıcaklığında atom çekirdeklerinin kinetik enerjileri Coulomb itmesini yenebilecekleri bir dereceye çıkabilir, bu yüzden çarpışma yolu ile birbiriyle kaynaşabilirler. Güneş'ten gelen ısı ve ışık, hidrojen çekirdeklerinin birleşerek helyuma dönüşür ve bu dönüşüm sırasında kütle kaybı karşılığı enerji ortaya çıkar. Füzyon reaksiyonları çok yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği için termonükleer reaksiyonlar olarak ta adlandırılır(Yapıcı ve Çürüttü, 1997).



Şekil 1.6. Füzyon reaksiyonunun şematik gösterimi.

Fisyon enerjisi yerine füzyon enerjisi kullanmak daha avantajlıdır. Füzyon yakıtı olarak kullanılan ^2D izotopu su içinde mevcuttur ve su içinde 1/6000 oranında bulunur. Diğer bir füzyon yakıtı olan ^3T izotopu ise yapay olarak üretilebilmektedir. Füzyon ürünleri genellikle hafif çekirdeklerdir ve radyoaktif ağır çekirdeklerden daha kararlıdır. Füzyonun en önemli dezavantajı, hafif çekirdeklerin birleşmeden önce Coulomb engelini aşmak zorunda olmalarıdır.

Füzyon reaksiyonunun meydana gelmesi için temel şartlar, yüksek sıcaklık ve plazma yoğunluğudur. Bu şartları ilk kez dikkate alan İngiliz bilim adamı Lawson'dur. Lawson kriterlerine göre, T (sıcaklık) ve $n \cdot \tau$ (plazmanın yoğunluğu ile sıcak tutma süresi çarpımı), D-T reaksiyonu için

$$T = 10^8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$n \cdot \tau = 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s olmalıdır.}$$

Bir gazın ($3kT/2$) molekülü başına ortalama kinetik enerjisinin 21.2 MeV'un yarısı olması için $k \cdot T = 7 \text{ MeV}$ 'a sahip olması gerekir. Oda sıcaklığında $k \cdot T = 0.025 \text{ eV}$ 'tur ve bu işleme oda sıcaklığının 3×10^8 katı bir sıcaklık gerektirir.

1.4.1. Temel füzyon reaksiyonları

En temel füzyon reaksiyonu,

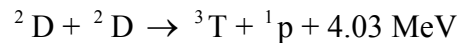
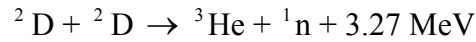


reaksiyonudur. Bu reaksiyonun tesir kesiti çok küçük olduğundan bu reaksiyonu oluşturmak oldukça zordur.

Diğer bir reaksiyon,



^4He 'un nötron ve proton bölünme enerjilerinin ikisinden büyük olan 23.8 MeV'luk enerji açığa çıkar. Olması en muhtemel reaksiyonlar şunlardır,



Bu döteryum-döteryum veya D-D reaksiyonları olarak bilinir ve her birinin oluşma ihtimali %50'dir. D-D reaksiyonuna benzeyen başka bir reaksiyon hafif helyum ile döteryum etkileşmesinde meydana gelir. Fakat böyle bir reaksiyon ihtimali çok düşüktür.

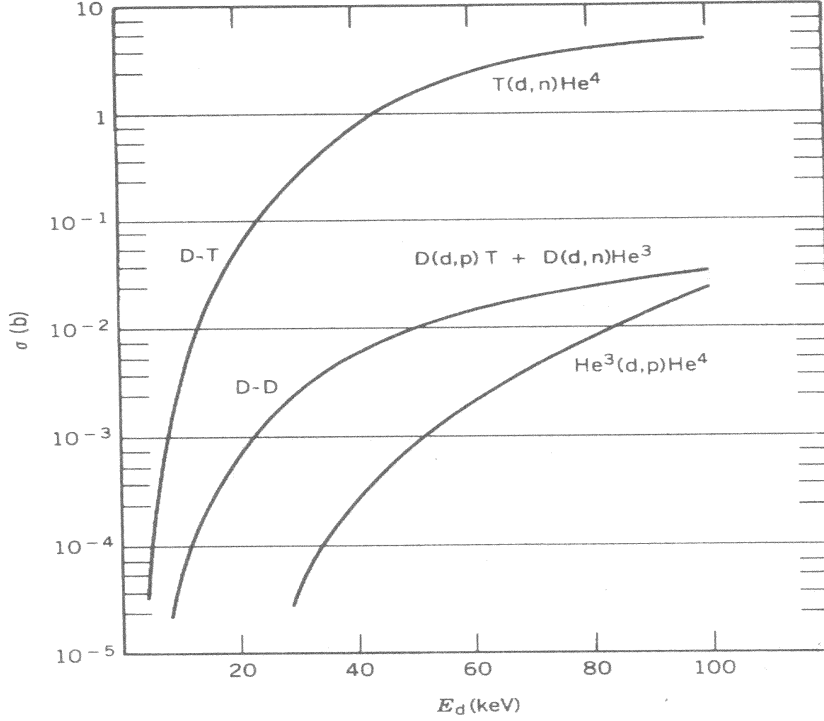


Tritiyum döteryum ile daha hızlı olarak reaksiyona girer.



Bu reaksiyona döteryum-tritiyum veya D-T reaksiyonu denir. Bu reaksiyon hızlı nötronların kaynağı olarak füzyon reaktörlerinde kullanılmak için seçilmiştir ve bu reaksiyon sonucunda 14.1 MeV'lik tek enerjili bir nötron meydana çıkar. 10 keV 'de

D-T reaksiyonunun tesir kesiti D-D reaksiyonuna göre 100 kat daha büyüktür (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Füzyon reaksiyonlarının tesir kesitleri (Krane, 2002).

1.4.2. Füzyon reaksiyonunda yayınlanan enerji

Füzyon reaksiyonlarında reaksiyona giren parçacıkların enerjileri 1-10 keV arasında değişir. D-T reaksiyonunda açığa çıkan enerjinin çoğu nötronun kinetik enerjisi formundadır.

D-T reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerji,

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

$$Q = [2.014102 \text{ u} + 3.016049 \text{ u} - 4.002603 \text{ u} - 1.008665 \text{ u}] \times 931.502 \text{ MeV/u}$$

$$Q = 17.589 \text{ MeV}$$

elde edilir.

Enerjinin korunumu; $E_\alpha + E_n = Q$

$$\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2} m_n v_n^2 = Q$$

Momentum korunumu; $P_\alpha = P_n$

$$m_{\alpha} v_{\alpha} = m_n v_n$$

$$E_{\alpha} = Q \frac{m_n}{m_{\alpha} + m_n} = 17.589 \times \frac{1.008665}{4.002603 + 1.008665}$$

$$E_{\alpha} = 3.54 \text{ MeV}$$

ve

$$E_n = Q \frac{m_{\alpha}}{m_{\alpha} + m_n} = 17.589 \times \frac{4.002603}{4.002603 + 1.008665}$$

$$E_n = 14.04 \text{ MeV}$$

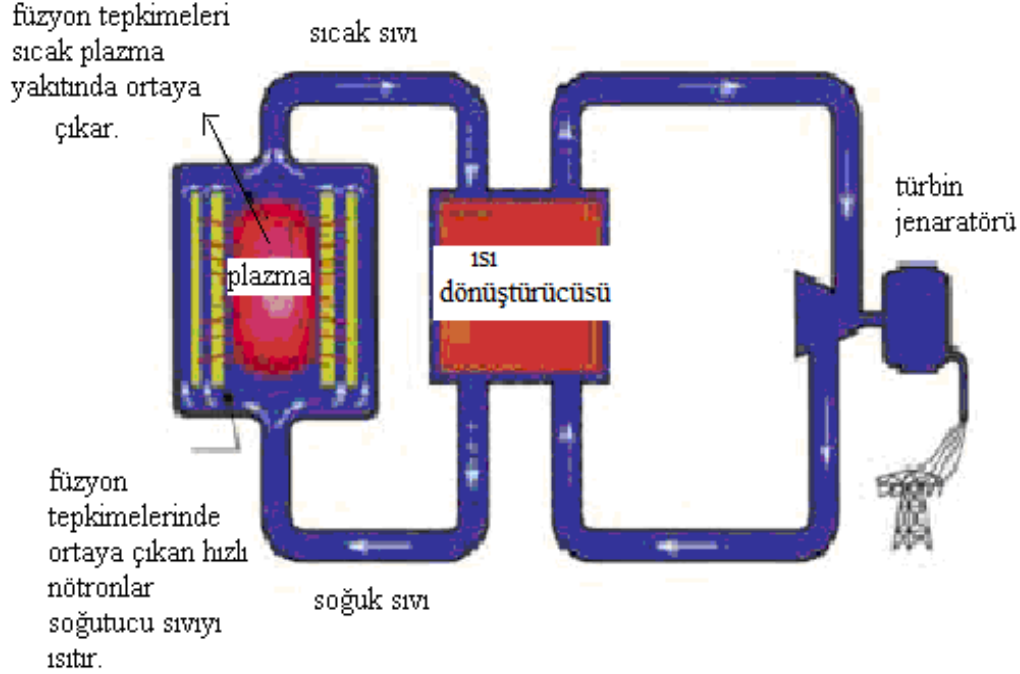
bulunur (Yapıcı ve Çürüttü,1997; Krane, 2002).

1.4.3. Füzyon reaktör tipleri

1.PACER (Peaceful Nuclear Explosion Reactor) Reaktörleri

2.MCF (Magnetic Confinement Reactor)

3.ICF (HYLIFE) Reaktörleri



Şekil 1.8. Füzyon elektrik santrali güç dönüşümü (Altın, 2004).

1.5. Hibrit (Füzyon-Fisyon) Reaktörler

Füzyon-fisyon hibrit sistemi, füzyon ve fisyon reaktör özelliklerinin birleşimi olarak tanımlanabilir. Hibrit reaktör, yüksek oranda füzyon nötronlarının yakalanmasıyla, fertil malzemelerin (^{238}U veya ^{232}Th) fisyonu ve fisil malzemelere (^{239}Pu veya ^{233}U) dönüşümü prensibine dayanır.

Füzyon-Fisyon hibrit reaktöründe nötron enerji kaynağı olarak 14.1 MeV ortalama enerjili nötronlar üreten (D-T) füzyon reaksiyonları kullanılmaktadır.

Hibrit reaktörün en önemli avantajları;

1. Hızlı bir besleyici, başlangıç için değerli plutonyum malzemesine ihtiyaç duyarken, hibrit reaktör doğal veya harcanmış uranyum ve toryumu kullanır.
2. LWR'lerin harcanmış yakıtını değerlendirerek maliyeti azaltır.

Harcanmış yakıtın yeniden işlenmesinde kullanılan süreçlerin ortadan kaldırılması ve bu yolla zaman ve maliyetin azaltılması mümkün görülmektedir (Sözen ve ark., 2001).

2. NÖTRON

Nükleon ailesinin yüksüz üyesi olan nötron, nükleer kuvvetlerle ilgili çalışmalarda temel bir rol oynar. Çok düşük enerjili (eV veya altında) nötronlar bile Coulomb engelinden etkilenmeden, çekirdeğe girerek çekirdek reaksiyonlarını başlatabilirler.

Nötronlar yüksüz parçacıklar olduğundan, yüksüz parçacıklar bir madde içerisinden geçtiklerinde maddeyi iyonize edemezler. Bu nedenle nötronlar ile ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır.

Nötronların deneysel olarak ilk gözlenmesi 1930'da gerçekleşmiştir. Bothe ve Becker berilyumu (radyoaktif parçalanma kaynaklı) α tanecikleri ile bombardıman ederek, çok delici fakat iyonlaşma gücü olmayan bir ışınım elde ettiler. Kısa bir süre sonra Curie ve Joliot, bu ışın parafinden geçerken, yüksek enerjili bir protonun yayınlandığını fark ettiler. Protonların parafin içindeki menziline kullanarak, enerjilerini 5.3 MeV olarak saptadılar. 1932 yılında Chadwick deneyleri tekrarlamış ve giriciliği bu kadar yüksek olan bir radyasyonun gamma ışınlarından değil elektrik yükü olmayan taneciklerden ibaret olduğunu farz etmiş ve bu taneciğe nötron adını vermiştir.

Nötronun kütlesi 1.008665 akb dir. Nötronların ömürleri 12 dakika civarındadır ve serbest nötronlar doğada bulunmazlar.

2.1. Nötronun kütlesi

Chadwick, nötronu keşfettikten sonra elastik çarpışma kanunlarından yararlanarak nötronun kütlesini ilk defa ve yaklaşık bir şekilde tayin etmiştir. Bu nedenle Wilson odasını bir defa hidrojenle, bir defa da azotla doldurmuştur ve her durumda momentum ve enerji korunması kanunlarını uygulamıştır.

Bir nötronun kütlesinin kabaca bir protonunkine eşit olduğu gösterilebilir. v hızında m_1 kütleli bir parçacıkla durmakta olan m_2 kütleli bir parçacık arasındaki elastik çarpışmayı göze alalım. Parçacıkların hızları çarpışmadan sonra v_1 ve v_2 olsun. Parçacıkların hareket doğrultuları çarpışmadan önce ve sonra aynı ise enerji ve momentum korunumuna göre;

$$\frac{1}{2}m_1v^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad (2.1)$$

$$m_1v = m_1v_1 + m_2v_2 \quad (2.2)$$

Bu iki eşitlikten v_1 'i çekecek olursak

$$v_1 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2}v \quad (2.3)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeyi hidrojen ve azota uygulayacak olursak v_P ve v_N hızları için sırasıyla

$$v_P = \frac{2m}{m+1}v \quad (2.4)$$

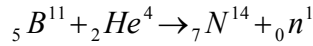
$$v_N = \frac{2m}{m+14}v \quad (2.5)$$

bağıntılarını elde ederiz. Burada m bir nötronun kütesini göstermektedir. Proton ve azotun kütleleri sırasıyla 1 akb ve 14 akb alınmıştır. (2.4) eşitliği (2.5) eşitliğine bölünürse

$$\frac{m+14}{m+1} = \frac{v_P}{v_N} = \frac{3.3 \times 10^9 \text{ cm/s}}{4.7 \times 10^8 \text{ cm/s}} \quad (2.6)$$

olur. Buradan $m_n = 1.15$ akb bulunur.

Chadwick nötronun kütesini daha iyi bir yaklaşım olarak



reaksiyonu kullanılarak sağlanmıştır. Bu metotla elde edilen nötronun kütlesi 1.005 ile 1.008 akb arasındadır (Arya, 1983).

2.2. Nötronun dalga boyu

Dalga mekaniği kanunlarına göre nötron bazı uygun hallerde dalga özelliği gösterir. Nötronun kinetik enerjisi E , hızı v , momentumu p olmak üzere dalga boyu

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (2.7)$$

Bu bağıntıya göre hız azaldıkça dalga boyu artar. Nötronun dalga karakteri göstermesi için hızının çok küçük olması gerekir. Hızı büyük olan nötronlar daha çok tanecik gibi hareket ederler. Nötronun 10^{-8} cm'lik bir dalga boyuna sahip olabilmeleri

için enerjisi 0.1 eV olması gerekir. Bu küçük enerjili nötronu tanecik olarak düşünmektense bir dalga olarak düşünmek daha doğru olur.

Çekirdeğin içinde bulunan nötronlar çok hızlı hareket ederler. Bundan dolayı çok küçük bir dalga boyuna sahiptirler. Çekirdeğin içinde bulunan bir nötronun enerjisi yaklaşık olarak 50 MeV'dir. Bu da 10^{-13} cm dalga boyuna karşılık gelir (Yaramış, 1974).

2.3. Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması

Nötronlar enerjilerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar:

1. Yavaş nötronlar: Enerjileri 0 ile 1000 eV arasındadır. Bu gruptaki nötronların ağır çekirdeklerle etkileşimi, keskin absorpsiyon rezonansları ile ve çok düşük enerjili nötronlar için büyük absorpsiyon tesir kesitleri ile karakterize edilir.

1.1. Soğuk nötronlar: Bu nötronların enerjileri 0.002 eV'den azdır. Bu nötronlar düşük sıcaklıktaki materyal ile termal dengede olabilir.

1.2. Termal nötronlar: Bu nötronların enerjileri 0.002 eV ile 0.5 eV arasındadır. 20^0C sıcaklığındaki materyal içerisinde nötronlar saçılmadan dolayı termal dengeye ulaşırlar. Maxwell-Boltzmann dağılımında k Boltzmann sabiti ve T sıcaklık olmak üzere enerji;

$$E = kT = 0.025 \text{ eV} \quad (2.8)$$

olur.

1.3. Epitermal nötronlar: Bu nötronların enerjileri 0.5 eV ile 1000 eV arasındadır. Bu nötronların verilen materyaldaki difüzyonu ortamla termal dengede olmaz.

1.4. Rezonans nötronları: Bu nötronların enerjileri 1 eV ile 100 eV arasındadır. Bu enerji bölgesindeki nötronların ağır çekirdeklerle etkileşiminde çok sayıda belirli, keskin absorpsiyon rezonansları tespit edilir.

2. Orta hızlı nötronlar: Bu nötronların enerjileri 1 keV ile 500 keV arasındadır. Bu bölgede en çok görülen reaksiyon elastik difüzyondur.

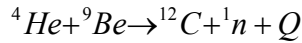
3. Hızlı nötronlar: Bu nötronların enerjileri 0.5 MeV ile 10 MeV arasındadır. Bu bölgede en önemli reaksiyon inelastik difüzyondur.

4. Çok hızlı nötronlar: Enerjileri 10 MeV'den büyük olan nötronlardır (Gibson, 1980; Yaramış, 1974).

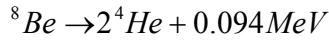
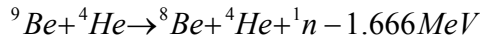
2.4. Nötron kaynakları

Nötronları elde etmek için kullanılan birçok reaksiyon vardır. Bu reaksiyonlarda hedef çekirdek alfa taneciği, proton, döteron ve gama ışınları ile bombardıman edilince uyarılmış halde olan bileşik çekirdek meydana gelir. Nötron elde etmede hafif çekirdekler büyük bir rol oynar, çünkü kuvvetli potansiyel duvardan dolayı ağır çekirdeklerle yüklü taneciklerin reaksiyonları yüksek enerjilerde mümkündür.

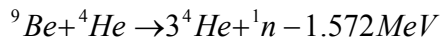
1. α -Berilyum kaynakları: Genel olarak nötronların kaynağı ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ reaksiyonunun kullanılmasıyla elde edilir. Reaksiyon için gerekli olan α taneciği ${}^{226}\text{Ra}$ gibi doğal radyoaktif izotoplardan elde edilir. Böylece bir gram radyum ve birkaç gram berilyum karışımından dakikada 10^7 civarında nötron elde edilebilir (Yapıcı ve Çürüttü, 1997). Kararlı yapıya sahip ${}^9\text{Be}$ çekirdeği α taneciği ile çarpıştırılırsa reaksiyon sonunda bir nötron serbest kalır.



Burada Q değeri 5.7 MeV'dir. Ürün çekirdek olan ${}^{12}\text{C}$; temel seviyede, 4.43 MeV'lik birinci uyarılma seviyesinde veya 7.65 MeV'lik ikinci uyarılma seviyesinde kalabilir. Uygun bombardıman enerjilerinde aşağıdaki reaksiyon meydana gelebilir;

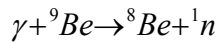


İki reaksiyonu birleştirip yazarsak

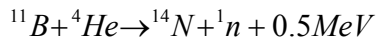


Bu reaksiyon inelastik diffüzyon olayı olarak da tarif edilebilir.

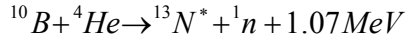
2. γ -Berilyum kaynakları: Bunlara fotonötron kaynakları da denir. Fotonötron elde etmenin avantajı, foton kaynağı tekenerjili ise nötronların da tekenerjili olmasıdır. ${}^{24}\text{Na}$ yaklaşık olarak 2.76 MeV'lik γ -ışını yayımlar. Bu γ -ışınının ${}^9\text{Be}$ ile reaksiyonundan 0.8 MeV civarında enerjiye sahip olan nötronlar elde edilir.



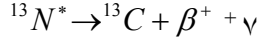
3. α -Bor kaynakları: Bor çekirdeğinin (α, n) reaksiyonu, tabii bor'u meydana getiren ${}^{10}\text{B}$ ve ${}^{11}\text{B}$ izotopları ile meydana gelir. Tabii bor'un %81,2'sini ${}^{11}\text{B}$ oluşturur.



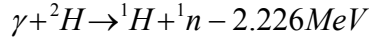
^{14}N temel seviyede veya 2.31 MeV'lik birinci uyarılma seviyesinde veya 3.95 MeV'lik ikinci uyarılma seviyesinde kalabilir.



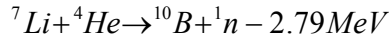
$^{13}\text{N}^*$ 10 dakikalık bir periyotla pozitron neşrederek ^{13}C 'ye bozunur.



4. γ - ^2H kaynakları:

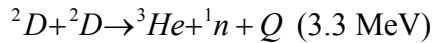
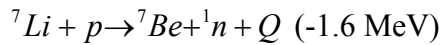
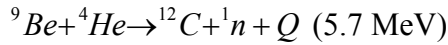
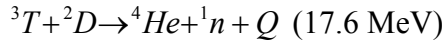


5. α -Li kaynakları: Bu reaksiyonun verimi az olmasına rağmen önemli bir reaksiyondur. Çünkü düşük enerjili nötronlar çıkar.



6. Kendiliğinden fisyon: ^{252}Cf gibi kendiliğinden fisyonu uğrayan izotoplar nötron kaynağı olarak yaygın bir biçimde kullanılırlar. Fisyon sadece bozunmanın %3'ü oranında meydana gelir ve nötron elde etme oranı, 1 gram ^{252}Cf için 2.3×10^{12} nötrondur.

7. Nükleer reaksiyonlar:



8. Nükleer reaktörler: Reaktörler en fazla nötron üreten kaynaklardır. Akıları $10^{12} - 10^{14} \text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ civarında bulunan reaktörlerde genellikle, yavaş nötronlar için fisyon tesir kesitleri büyük olan, doğal ^{235}U ile yapay olarak üretilen ^{233}U ve ^{239}Pu kullanılmaktadır (Krane, 2002; Meriç, 1990; Yaramış, 1974; Yapıcı ve Çürüttü, 1997).

2.5. Nötronun madde ile etkileşmesi

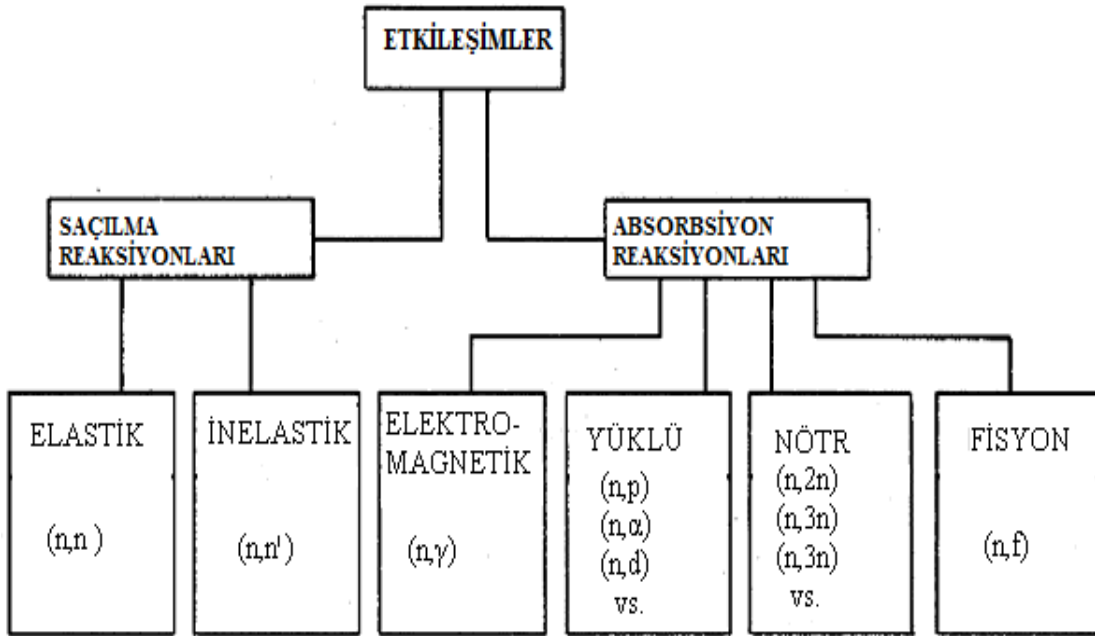
Bir nötron madde ile birkaç tip etkileşme yapabilir. Bu etkileşmeler iki ana başlık altında toplanabilir; saçılma veya absorpsiyon. [Bkz. Şekil 2.1]

Elastik saçılmada nötron hedef çekirdeğe çarptıktan sonra kinetik enerjisinin bir kısmını hedef çekirdeğe vererek farklı bir doğrultuda sapar. Bu saçılmada çekirdeğin

fiziksel yapısı değişmez. Elastik saçılmada kinetik enerji ve momentum korunur. Elastik saçılma çarpan nötronun kinetik enerjisinin her değeri ile meydana gelir.

Elastik olmayan saçılmada nötron hedef çekirdeğin içersine girer ve çekirdeğin fiziksel yapısını değiştirmiş olur. Nötron kinetik enerjisinin bir kısmını hedef çekirdeğe verir, bu enerji hedef çekirdeği uyarmak için harcanır. Nötronun çekirdeği terk etmesinden sonra çekirdek gama ışınları yayarak temel enerji haline döner. Elastik olmayan saçılma enerji açısından yalnız hızlı nötronlar ile mümkündür.

Absorbsiyon (yutulma) reaksiyonlarında ise, nötronun hedef çekirdekle etkileşmesi sonucu, gama ışını, nötron ve yüklü parçacıkların salındığı (n,γ) , (n,p) , (n,α) , $(n,2n)$ gibi reaksiyonlardır (Rinard, 2004).



Şekil 2.1. Nötron etkileşimlerinin çeşitli kategorileri; parantez içindeki virgülle ayrılmış harfler gelen ve çıkan parçacıkları gösterir (Rinard, 2004).

2.6. Nötron akısı

Bir yönde birim zamanda birim alandan geçen nötron sayısına nötron akısı denir. Bir reaktör korunda nötronlar tüm yönlerde hareket ederler. Nötron yoğunluğu n (nötron/cm³) ve nötron hızı v (cm/s) olmak üzere birim zamanda tüm yönlerden bir birim alanı etkileyen nötronların sayısını belirleyen nötron akısı Φ ile gösterilirse

$$\Phi = nv \quad (2.9)$$

şeklinde elde edilir.

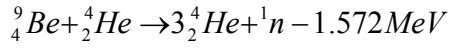
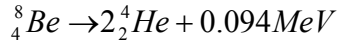
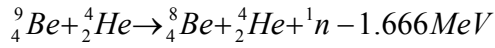
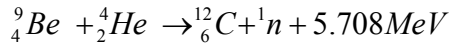
Nötron akısının birimi nötron/s.cm² olup, hıza ve enerjiye bağlıdır. N yoğunlukta çekirdekleri ihtiva eden bir ortam, Φ nötron akısına maruz kalırsa, çekirdek ile nötronlar arasındaki etkileşim reaksiyon oranı,

$$\text{Reaksiyon oran} = (nv)N\sigma = \Phi\Sigma = \Phi/\lambda \text{ reaksiyon/cm}^3 \text{ s} \quad (2.10)$$

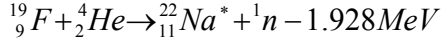
bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada σ , göz önüne alınana reaksiyonun mikroskopik tesir kesitidir. λ ise tüm nötronlar tarafından alınan ortalama serbest yoldur.

2.7. Blankette (sıvı duvar) nötron üretim reaksiyonları

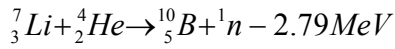
1. ${}^9\text{Be}(\alpha, n)$ reaksiyonu



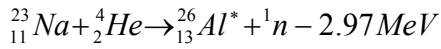
2. $\text{F}(\alpha, n)$ reaksiyonu



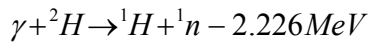
3. $\text{Li}(\alpha, n)$ reaksiyonu



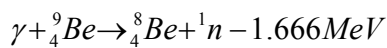
4. $\text{Na}(\alpha, n)$ reaksiyonu



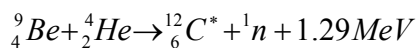
5. ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$ reaksiyonu



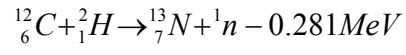
6. ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ reaksiyonu



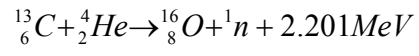
7. ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ reaksiyonu



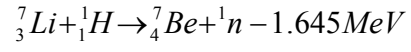
8. ${}^{12}\text{C}(d, n){}^{13}\text{N}$ reaksiyonu



9. ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ reaksiyonu



10. ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ reaksiyonu



3. APEX FÜZYON REAKTÖRÜ

APEX (Advanced Power Extraction) çalışmasında Füzyon güç teknolojisi (Fusion Power Technology) için yenilikçi kavramları incelemek hedefleniyor ki bu füzyonu daha cazibeli ve rekabet edilebilen enerji kaynağı haline getirebilir (Abdou ve ark., 1999).

Füzyon güç teknolojisi plazmanın dışında mevcut olan kısımları kapsar. Bu kısımlar; ilk duvar (first wall), blanket, saptırıcı ve vakum kabıdır. Füzyon güç teknolojisi füzyon enerji sistemlerinin ekonomik ve güvenilir olmasında etkilidir.

Füzyon güç teknolojisinin işlevsel gereksinimleri;

- Vakum kısmının temini
- Plazma yanma ürünlerinin dışarı atılması
- Isı iletimi ve plazmadaki parçacıklardan ve radyasyondan güç çekilmesi
- Nötronlardan ve ikincil gama parçacıklarından ortaya çıkacak gücün çekilmesi
- Tiryumun kendi kendine yetebilirlik oranını sağlamak
- Radyasyondan korunma

Füzyon güç teknolojisinin önemli kriterleri ise;

- Yüksek güç yoğunluğu
Nötron duvar yükü $>10 \text{ MW/m}^2$
Yüzey ısı akısı $>2 \text{ MW/m}^2$
- Termodinamik verim $> \%40$
- Yüksek kullanılabilirlik
Daha düşük bozulma oranı
Daha hızlı onarım
- Basit teknolojik ve materyal sınırlamaları

şeklinde sıralanır.

Plazma ile etkileşen ilk duvarın yapısının katı olması halinde en çok hasar bu bölgede oluşur ve ömrü sadece birkaç yıl ile sınırlanır. Çünkü ilk duvar plazmada açığa çıkan yüksek enerjili nötron, gama ışını ve yüklü parçacık akılarına maruz kalır. APEX çalışmalarında ilk katı duvarın yerini yenilikçi bir yaklaşım olan ilk sıvı duvar almıştır (Abdou ve ark., 1999).

APEX çalışmasındaki geliştirilen kavramlardan biri olan sıvı duvar (Liquid Wall) kavramı yüksek nötron duvar yükünün ve yüzey ısı akısının üstesinden gelir. İnce ve kalın sıvı duvar kavramları farklı karakterlere sahiptir ve yüksek güç yoğunluk uygulaması için çeşitli avantajlar sağlar.

Sıvı duvar kullanmanın avantajları;

1. Yapısal malzemelerin radyasyon hasarını azaltır.
2. Yüksek güç yoğunluğu kapasitesi
3. Reaktörün ömrünü uzatır.
4. Daha iyi trityum üretimi
5. Daha yüksek kullanılabilirlik

(Abdou ve ark., 1999; Arasoğlu, 2004; Gulec ve ark., 2000; Şarer ve ark., 2003).

Enerji taşıyıcı sıvı yeterli trityum üretebilen ortam olmalıdır. Bu sıvı için gereken sıvı üretici adaylar; Lityum, Li-Sn, Li-Pb, Flibe (Li_2BeF_4) ve Flinabe erimiş tuzudur (Şarer ve ark., 2005; Youssef ve Abdou, 2000; Yousef ve Sawan, 2002).

Trityum üretimi yalnızca lityum bileşiklerinde mümkündür. Trityum üretim materyallerinin bazıları:

- a) Sıvı metaller: Li, PbLi, SnLi
- b) Eriyik tuzlar: Flibe, Flinabe
- c) Katı Üreticiler: Li_2O , Li_4SiO_4 , LiAlO_2 , Li_2ZrO_3

dir (Arasoğlu, 2004).

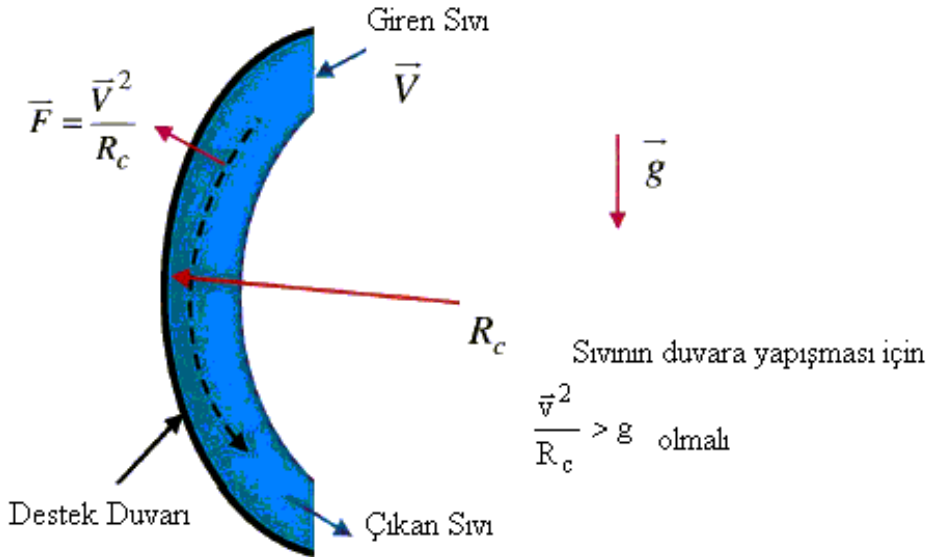
Çizelge 3.1. APEX sıvı duvar alternatifleri (Abdou ve ark., 2001)

Kalınlık	<ul style="list-style-type: none"> • İnce (~2cm) • Orta (~15 cm) • Kalın (>40 cm)
Enerji taşıyıcı sıvı	<ul style="list-style-type: none"> • Lityum • Sn-Li • Flibe, Flinabe
Hidrodinamik tahrikli tutma kuvveti	<ul style="list-style-type: none"> • Yerçekimli momentum sürücü (GMD) • Girdap (Swirl) akışlı GMD • Elektromanyetik olarak tutma • Manyetik itme
Sıvı yapı	<ul style="list-style-type: none"> • Tekil sürekli akış • İki akış (Plazma kısmında hızlı akan ince tabaka ve yavaş akan esas akış)

Sıvı akışını sürdüren ve katı bir destek duvarına tutturmak için çeşitli kuvvetler uygulanır ve bu kuvvetlerin uygulanmasıyla farklı sıvı duvar kavramları elde edilir. Bu kuvvetlerden ikisi sırasıyla Şekil 3.1. ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

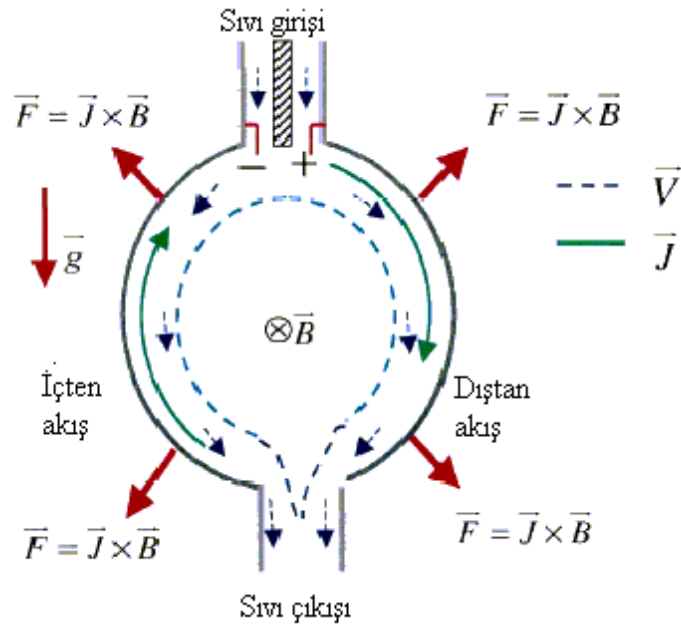
GMD kavramında sıvı, bölmenin üstünden destek duvarına teğet açıyla enjekte edilir. Enjekte edilen sıvı merkezci kuvvetle destek duvarına yapışır ve bölmenin altında toplanır. Sıvının duvara sürekli yapışması için merkezci kuvvetin yerçekimi kuvvetinden büyük olması gerekir (Abdou ve ark., 2001).

APEX’te GMD tokamaklar için araştırılmıştır. Girdap akışlı GMD hem Küresel Torus (ST) hem de Alan Tutuculu Konfigürasyonlar (FRC) için incelenmiştir (Şarer ve ark., 2003).



Şekil 3.1. Yerçekimi/Momentum tahrikiyle (GMD) sıvının arka duvara yapışması.

Elektromanyetik tutma (EMR) kavramı sadece sıvı metallere uygulanabilir ve bu kavram tokamak konfigürasyonlarında sadece lityum için araştırılmıştır (Abdou ve ark., 1999; Arasoğlu, 2004; Şarer ve ark., 2003).



Şekil 3.2. Elektromanyetiksel tutma (EMR).



Şekil 3.3. APEX füzyon reaktörünün şematik görünümü (ARIES-RS konfigürasyonu içine birleştirilen kalın FW/blanket dizaynı).

3.1. Flinabe blanketinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar

Çizelge 3.2. Flinabe blanketinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları

Reaksiyon	Ürün Radyoizotopun	
	Yarı ömrü	Bozunma modu
${}^9\text{Be}(n,\gamma){}^{10}\text{Be}\rightarrow{}^{10}\text{B}$	1.6 My	β^-
${}^9\text{Be}(n,t){}^7\text{Li}$	-	-
${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}\rightarrow{}^3\text{He}$	12.3 y	β^-
${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$	-	-
${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}\rightarrow{}^8\text{Be}$	0.84 s \rightarrow 0.07 fs	$\beta^- \rightarrow \alpha$
${}^{19}\text{F}(n,\gamma){}^{20}\text{F}\rightarrow{}^{20}\text{Ne}$	11 s	β^-
${}^{19}\text{F}(n,2n){}^{18}\text{F}\rightarrow{}^{18}\text{O}$	110 dak	ϵ
${}^{19}\text{F}(n,\alpha){}^{16}\text{N}\rightarrow{}^{16}\text{O}$	7.13 s	β^-
${}^{19}\text{F}(n,t){}^{17}\text{O}$	-	-
${}^{19}\text{F}(n,p){}^{19}\text{O}\rightarrow{}^{19}\text{F}$	26.9 s	β^-
${}^{23}\text{Na}(n,p){}^{23}\text{Ne}\rightarrow{}^{23}\text{Na}$	37.6 s	β^-
${}^{23}\text{Na}(n,\alpha){}^{20}\text{F}\rightarrow{}^{20}\text{Ne}$	11 s	β^-
${}^{23}\text{Na}(n,t){}^{21}\text{Ne}$	-	-
${}^{23}\text{Na}(n,2n){}^{22}\text{Na}\rightarrow{}^{22}\text{Ne}$	2.60 y	ϵ
${}^{23}\text{Na}(n,\gamma){}^{24}\text{Na}\rightarrow{}^{24}\text{Mg}$	150 saat	β^-
${}^{232}\text{Th}(n,\gamma){}^{233}\text{Th}\rightarrow{}^{233}\text{Pa}\rightarrow{}^{233}\text{U}$	22.3 dak \rightarrow 27 gün \rightarrow 0.1592 My	$\beta^- \rightarrow \beta^- \rightarrow \alpha$

3.2. İlk çelik duvarda (first wall) nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar

Blanket ve çelik bölgede meydana gelen reaksiyonların hepsi koruyucu bölgede de meydana gelebilir.

Kaplan ve ark. (2009), bazı füzyon yapı materyalleri (^{27}Al , ^{51}V , ^{52}C , ^{55}Mn ve ^{56}Fe) için (n,xn) reaksiyonları ile üretilen nötronların yayınlanma spektrumunun 16 MeV'a kadar gelme enerjili nötronlar için araştırdılar. Hesaplama sonucu nötron yayınlanma tesir kesitlerinin 2 MeV civarında maksimum olduğunu gösterdiler ve deneylerle karşılaştırdılar.

Çizelge 3.3. İlk çelik duvarda nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları

Reaksiyon	Ürün radyoizotopun	
	Yarı ömrü	Bozunma modu
$^{56}\text{Fe}(n,2n)^{55}\text{Fe} \rightarrow ^{55}\text{Mn}$	2.7 y	ϵ
$^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{57}\text{Fe}$	-	-
$^{56}\text{Fe}(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$	-	-
$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn} \rightarrow ^{54}\text{Cr}$	312 gün	ϵ
$^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr} \rightarrow ^{51}\text{V}$	27.7 gün	ϵ
$^{52}\text{Cr}(n,\gamma)^{53}\text{Cr}$	-	-
$^{52}\text{Cr}(n,\alpha)^{49}\text{Ti}$	-	-
$^{52}\text{Cr}(n,t)^{50}\text{V}$	-	-
$^{184}\text{W}(n,2n)^{183}\text{W}$	-	-
$^{184}\text{W}(n,\gamma)^{185}\text{W} \rightarrow ^{185}\text{Re}$	75.1 gün	β^-
$^{184}\text{W}(n,\alpha)^{181}\text{Hf} \rightarrow ^{181}\text{Ta}$	42.4 gün	β^-
$^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti} \rightarrow ^{51}\text{V}$	5.8 dak	β^-
$^{51}\text{V}(n,2n)^{50}\text{V}$	-	-
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	43.7 saat	β^-
$^{51}\text{V}(n,\gamma)^{52}\text{V} \rightarrow ^{52}\text{Cr}$	3.76 dak	β^-
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}$	20.4 dak	ϵ
$^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B} \rightarrow ^{12}\text{C}$	20.4 ms	β^-
$^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$	-	-
$^{12}\text{C}(n,\gamma)^{13}\text{C}$	-	-
$^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta} \rightarrow ^{182}\text{W}$	115 gün	β^-
$^{181}\text{Ta}(n,\alpha)^{178}\text{Lu} \rightarrow ^{178}\text{Hf}$	28.4 dak	β^-
$^{181}\text{Ta}(n,p)^{181}\text{Hf} \rightarrow ^{181}\text{Ta}$	42.4 gün	β^-

3.3. SS316 bölgesinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar

İlk çelik duvarda meydana gelebilen Fe ve Cr reaksiyonlarına ilaveten aşağıda verilen çizelgedeki reaksiyonlarda meydana gelebilir.

Çizelge 3.4. SS316 bölgesinde nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları

Reaksiyon	Ürün Rayoizotopun	
	Yarı ömrü	Bozunma modu
$^{55}\text{Mn}(n,2n)^{54}\text{Mn} \rightarrow ^{54}\text{Cr}$	312 gün	ϵ
$^{55}\text{Mn}(n,\alpha)^{52}\text{V} \rightarrow ^{52}\text{Cr}$	3.76 dak	β^-
$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	2.58 saat	β^-
$^{55}\text{Mn}(n,p)^{55}\text{Cr} \rightarrow ^{55}\text{Mn}$	3.50 dak	β^-
$^{28}\text{Si}(n,2n)^{27}\text{Si} \rightarrow ^{27}\text{Al}$	4.13 s	ϵ
$^{28}\text{Si}(n,\alpha)^{25}\text{Mg}$	-	-
$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al} \rightarrow ^{28}\text{Si}$	2.24 dak	β^-
$^{28}\text{Si}(n,\gamma)^{29}\text{Si}$	-	-
$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$	36 saat \rightarrow 271 gün	$\epsilon \rightarrow \epsilon$
$^{58}\text{Ni}(n,\alpha)^{55}\text{Fe} \rightarrow ^{55}\text{Mn}$	2.7 y	ϵ
$^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{59}\text{Ni} \rightarrow ^{59}\text{Co}$	0.075 My	ϵ
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co} \rightarrow ^{58}\text{Ni}$	70.8 gün	ϵ
$^{98}\text{Mo}(n,2n)^{97}\text{Mo}$	-	-
$^{98}\text{Mo}(n,\alpha)^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95}\text{Nb} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$	64 gün \rightarrow 35 gün	$\beta^- \rightarrow \beta^-$
$^{96}\text{Mo}(n,2n)^{95}\text{Mo}$	-	-
$^{96}\text{Mo}(n,\alpha)^{93}\text{Zr} \rightarrow ^{93}\text{Nb}$	1.5 My	β^-
$^{96}\text{Mo}(n,\gamma)^{97}\text{Mo}$	-	-
$^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	23.4 saat	β^-
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92}\text{Nb} \rightarrow ^{92}\text{Zr}$	35 My	ϵ
$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$	64.1 saat	β^-
$^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{94}\text{Nb} \rightarrow ^{94}\text{Mo}$	0.02 My	β^-
$^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$	70.8 gün	ϵ
$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	2.58 saat	β^-
$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu} \rightarrow ^{62}\text{Ni}$	9.73 dak	ϵ
$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$	5.27 y	β^-
$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{64}\text{Ni}$	12.7 saat	ϵ

Aydın ve ark. (2008), 14-15 MeV enerjili nötronlar için yeni değerlendirilmiş deneysel ve yarıdeneysel sistematikleri kullanarak (n,d) reaksiyon tesir kesitlerini hesapladılar. Hesaplama sonuçlarını deneysel datalarla karşılaştırdılar.

Fang ve ark. (2007), 14 MeV civarındaki nötronlarla meydana getirilen reaksiyonların [$^{180}\text{W}(n,2n)^{179m}\text{W}$, $^{186}\text{W}(n,2n)^{185m}\text{W}$, $^{165}\text{Ho}(n,\alpha)^{164m}\text{Ho}$, $^{64}\text{Ni}(n,\alpha)^{61}\text{Fe}$, $^{165}\text{Ho}(n,\alpha)^{162}\text{Tb}$ ve $^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti}$] tesir kesitlerini aktivasyon tekniği kullanarak ölçtüler. Bu dört çekirdeğin yarı ömürleri kısa olduğundan (birkaç dakika) füzyon reaktörlerinin bakımı ve onarımı için önemlidir.

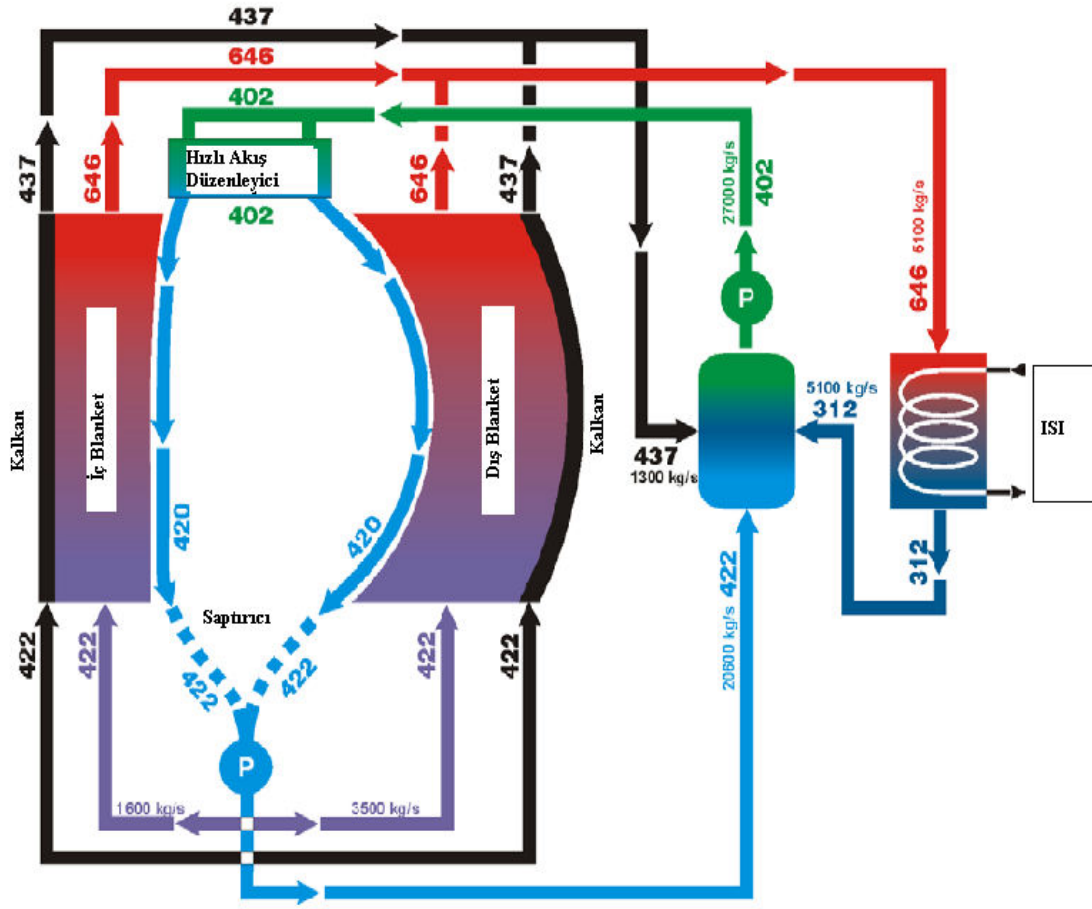
Tel ve ark. (2008), 14-15 MeV gelme enerjili nötronlar için (n,t) reaksiyon tesir kesitlerini kullanarak yeni değerlendirilmiş deneysel ve yarı deneysel sistematik formülleri kullanarak 14-15 MeV nötron enerjileri için (n,t) reaksiyon tesir kesitlerini araştırdılar. Yeni tesir kesiti formülü elde ederek, bununla yapılan hesaplamaları deneysel ve yarıdeneysel verilerle karşılaştırdılar.

3.4. Vakum kısmında nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar

Bu kısımda SS316 kısmında meydana gelebilen reaksiyonlara ilaveten H ve O reaksiyonları da oluşabilir.

Çizelge 3.5. Vakum kısmında nötronların meydana getirdiği reaksiyonlar, oluşan ürün radyoizotopların yarı ömürleri ve bozunma modları

Reaksiyon	Ürün Rayoizotopun	
	Yarı ömrü	Bozunma modu
$^{16}\text{O}(n,2n)^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N}$	122 s	ϵ
$^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$	-	-
$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N} \rightarrow ^{16}\text{O}$	7.13 s	β^-
$^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{N}$	-	-



Şekil 3.4. ARIES/ CLIFF reaktöründe Flinabenin sıcaklık akış diyagramı (Nygren ve ark.,2003).

4. MONTE CARLO METODU

Monte Carlo metodu istatistiksel metodlar kullanılarak fizik, matematik veya diğer bilimlerde rastgele sayıları baz alarak, tahmini sistemi modellemesi yöntemidir. Bu metodlar olasılık teorisine dayalıdır.

Hesaplamalarda, fiziksel sistemi tanımlayan olasılık yoğunluk fonksiyonlarından rastgele seçilmiş sayılarla gerçekleştirilir Los Alamos laboratuvarlarında nükleer silah geliştirilmesi projesinde çalışan bilim adamları tarafından ilk kez ortaya atılmıştır.

MCNP (Monte Carlo N-Particle transport) kodu nötron, foton ve elektronların zamana bağlı sürekli enerji geçişini (transport) üç boyutlu geometride çözen genel bir koddur. MCNP, Monte Carlo simülasyonu ve bir takım modelleri içeren, nükleer özellikleri olan fizik ve matematik konularını içeren bir koddur. MCNP kodu karmaşık parçacık geçişini modellemede oldukça iyi uygulanır çünkü sürekli tesir kesiti verisini kullanır.

MCNP, materyallerin üç boyutlu konfügrasyonunun geometrik hücrelerinde gelişigüzel davranır. MCNP kartezyen koordinat sisteminde arakesitlerle şekillendirilen hücrelerde ve yüzeylerle sınırlanan bölgelerin bileşenlerinde gelişigüzel davranır. MCNP birinci ve ikinci derece yüzeyleri ve dördüncü derece eliptik torusu ele alır. Tekrarlı yapıların karışık geometrilerini tanımlamak için çok sayıda komutları (lat ve trcl) vardır. MCNP geometrik hataları kontrol etmek için kullanıcıya yardım eden bir çizim programına da sahiptir.

Bir MCNP hesaplamasının sonucu birçok modelleyiciden gelen çıktıların toplanmasıyla elde edilir. Sonuçlar akımlar, akılar, enerji oluşumu, dedektör verimi ve reaksiyon oranları olarak elde edilir. Bütün uzantılar kaynak parçacık başına normalize edilir (Arasoğlu, 2004; Hançerlioğulları, 2006).

5. BULGULAR

Çizelge 5.1. Hesaplamada kullanılan APEX Model-1 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%100 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F	5,250000E-02 1,225000E-01 1,350000E-01 1,266667E-01 5,633333E-01	2.08175	7.77553E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Fe Cr W V C Ta	2,100000E-02 4,900000E-02 5,400000E-02 5,066667E-02 2,253333E-01 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.55184	8.09444E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.2. Hesaplama da kullanılan APEX Model-2 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%98 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %2 UF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238	5,145000E-02 1,200500E-01 1,323000E-01 1,241333E-01 5,680667E-01 2,900000E-05 3,971000E-03	2.16043	7.62772E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238 Fe Cr W V C Ta	2,058000E-02 4,802000E-02 5,292000E-02 4,965333E-02 2,272267E-01 1,160000E-05 1,588400E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.55730	8.02980E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.3. Hesaplama da kullanılan APEX Model-3 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%96 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%4 UF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238	5,040000E-02 1,176000E-01 1,296000E-01 1,216000E-01 5,728000E-01 5,800000E-05 7,942000E-03	2.23959	7.49686E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238 Fe Cr W V C Ta	2,016000E-02 4,704000E-02 5,184000E-02 4,864000E-02 2,291200E-01 2,320000E-05 3,176800E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.56745	7.97302E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.4. Hesaplama da kullanılan APEX Model-4 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%94 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%6 UF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütle sel Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238	4,935000E-02 1,151500E-01 1,269000E-01 1,190667E-01 5,775333E-01 8,700000E-05 1,191300E-02	2.31924	7.38044E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238 Fe Cr W V C Ta	1,974000E-02 4,606000E-02 5,076000E-02 4,762667E-02 2,310133E-01 3,480000E-05 4,765200E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.57945	7.91987E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H2O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.5. Hesaplama da kullanılan APEX Model-5 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%92 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%8 UF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238	4,830000E-02 1,127000E-01 1,242000E-01 1,165333E-01 5,822667E-01 1,160000E-04 1,588400E-02	2.39937	7.27645E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238 Fe Cr W V C Ta	1,932000E-02 4,508000E-02 4,968000E-02 4,661333E-02 2,329067E-01 4,640000E-05 6,353600E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.59425	7.87158E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge5.6. Hesaplama da kullanılan APEX Model-6 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%90 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%10 UF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238	4,725000E-02 1,102500E-01 1,215000E-01 1,140000E-01 5,870000E-01 1,450000E-04 1,985500E-02	2.47999	7.18321E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238 Fe Cr W V C Ta	1,890000E-02 4,410000E-02 4,860000E-02 4,560000E-02 2,348000E-01 5,800000E-05 7,942000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.61155	7.82762E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H2O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.7. Hesaplamada kullanılan APEX Model-7 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%88 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%12 UF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238	4,620000E-02 1,078000E-01 1,188000E-01 1,114667E-01 5,917333E-01 1,740000E-04 2,382600E-02	2.56111	7.09937E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F U-235 U-238 Fe Cr W V C Ta	1,848000E-02 4,312000E-02 4,752000E-02 4,458667E-02 2,366933E-01 6,960000E-05 9,530400E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.63110	7.78753E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.8. Hesaplama da kullanılan APEX Model-8 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%98 Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%2 ThF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütle sel Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flınabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th	5,145000E-02 1,200500E-01 1,323000E-01 1,241333E-01 5,680667E-01 4,000000E-03	2.15554	7.62116E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flınabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th Fe Cr W V C Ta	2,058000E-02 4,802000E-02 5,292000E-02 4,965333E-02 2,272267E-01 1,600000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.55528	8.02872E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.9. Hesaplama da kullanılan APEX Model-9 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütle sel yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%96 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%4 ThF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütle sel Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th	5,040000E-02 1,176000E-01 1,296000E-01 1,216000E-01 5,728000E-01 8,000000E-03	2.22960	7.48333E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th Fe Cr W V C Ta	2,016000E-02 4,704000E-02 5,184000E-02 4,864000E-02 2,291200E-01 3,200000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.56063	7.96689E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.10. Hesaplama kullanılan APEX Model-10 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%94 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%6 ThF₄)

Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th	4,935000E-02 1,151500E-01 1,269000E-01 1,190667E-01 5,775333E-01 1,200000E-02	2.30392	7.35963E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th Fe Cr W V C Ta	1,974000E-02 4,606000E-02 5,076000E-02 4,762667E-02 2,310133E-01 4,800000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.56891	7.91027E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.11. Hesaplama kullanılan APEX Model-11 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%92 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%8 ThF₄)

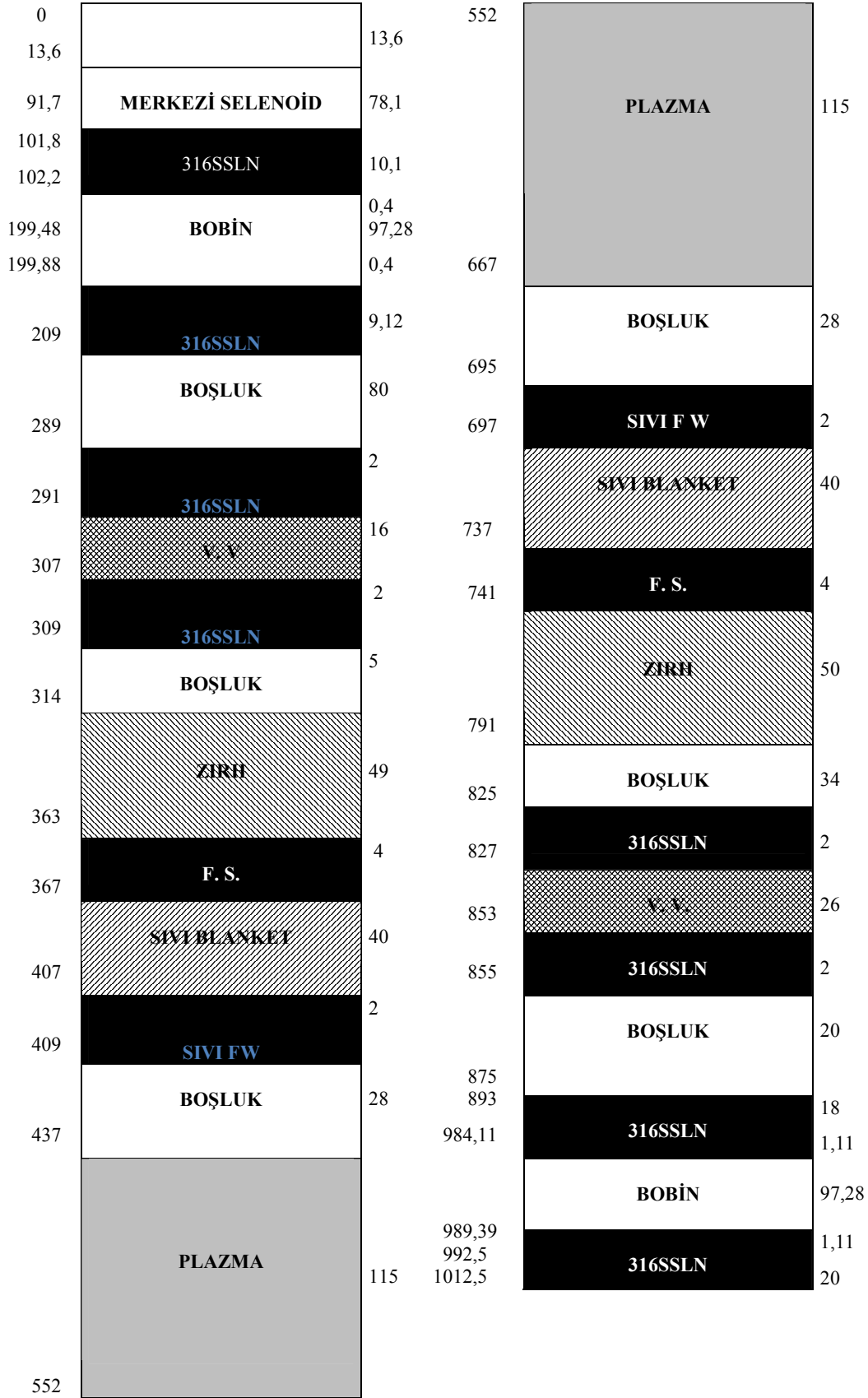
Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th	4,830000E-02 1,127000E-01 1,242000E-01 1,165333E-01 5,822667E-01 1,600000E-02	2.37850	7.24813E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th Fe Cr W V C Ta	1,932000E-02 4,508000E-02 4,968000E-02 4,661333E-02 2,329067E-01 6,400000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.57980	7.85830E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.0431E-02

Çizelge 5.12. Hesaplama kullanılan APEX Model-12 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%90 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%10 ThF₄)

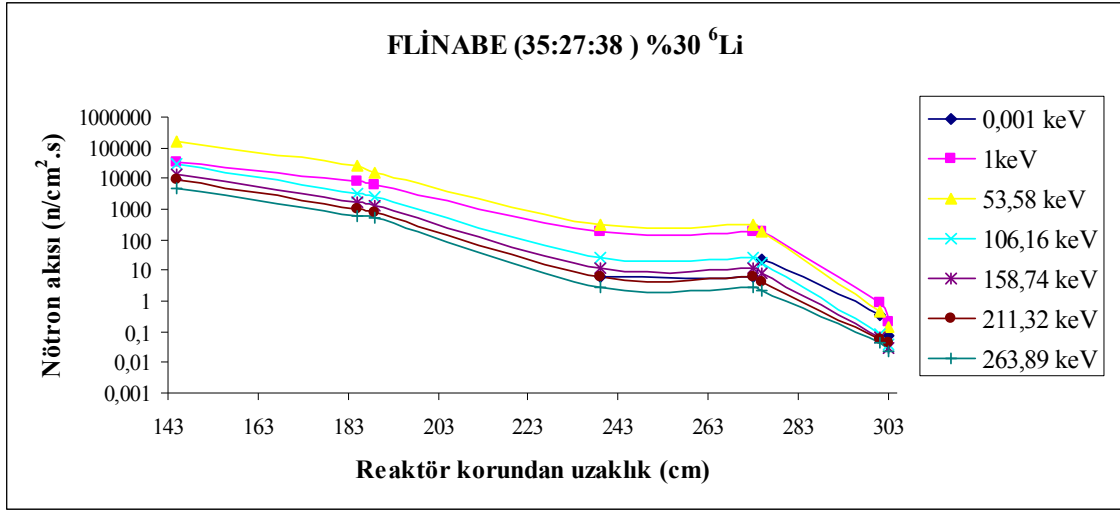
Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th	4,725000E-02 1,102500E-01 1,215000E-01 1,140000E-01 5,870000E-01 2,000000E-02	2.47999	7.18321E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th Fe Cr W V C Ta	1,890000E-02 4,410000E-02 4,860000E-02 4,560000E-02 2,348000E-01 8,000000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.1155	7.82762E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02

Çizelge 5.13. Hesaplama kullanılan APEX Model-13 için malzemeler, malzemelerin içeriği, atomik oranları, kütleli yoğunlukları ve atomik yoğunlukları (%88 Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li+%12 ThF₄)

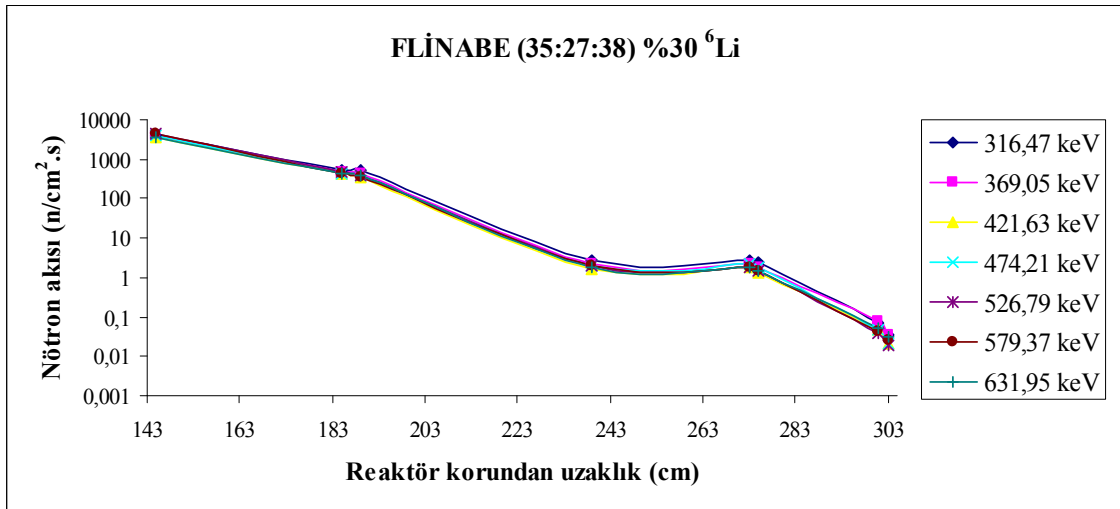
Reaktör Bölgesi	Malzeme	Malzeme İçeriği	Atomik Oran	Kütleli Yoğunluk (g/cm ³)	Atomik Yoğunluk (Atom/barn.cm)
1. Bölge	Vakum				
2. ve 3. Bölge	Sıvı Duvar (Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th	4,620000E-02 1,078000E-01 1,188000E-01 1,114667E-01 5,917333E-01 2,400000E-02	2.56111	7.09937E-02
4. Bölge	Çelik Duvar (F. S.)	Fe Cr W V C Ta	8,858000E-01 9,000000E-02 2,000000E-02 2,500000E-03 1,000000E-03 7,000000E-04	8.03125	8.32554E-02
5. Bölge	Koruyucu (%60 F. S. + %40 Flinabe 35:27:38)	Li-6 Li-7 Na Be F Th Fe Cr W V C Ta	1,848000E-02 4,312000E-02 4,752000E-02 4,458667E-02 2,366933E-01 9,600000E-03 5,314800E-01 5,400000E-02 1,200000E-02 1,500000E-03 6,000000E-04 4,200000E-04	5.63110	7.78753E-02
7. ve 9. Bölge	SS316	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	6,528182E-01 1,750790E-01 1,800886E-02 2,501178E-03 1,200552E-01 2,501178E-02 1,500660E-03 2,501178E-03 2,524038E-03	8.01756	8.54339E-02
8. Bölge	Vakum Vessel (%80 SS316 + %20 H ₂ O)	H O Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	1,333333E-01 6,666667E-02 5,222545E-01 1,400632E-01 1,440709E-02 2,000943E-03 9,604412E-02 2,000943E-02 1,200528E-03 2,000943E-03 2,019230E-03	6.78548	8.80431E-02



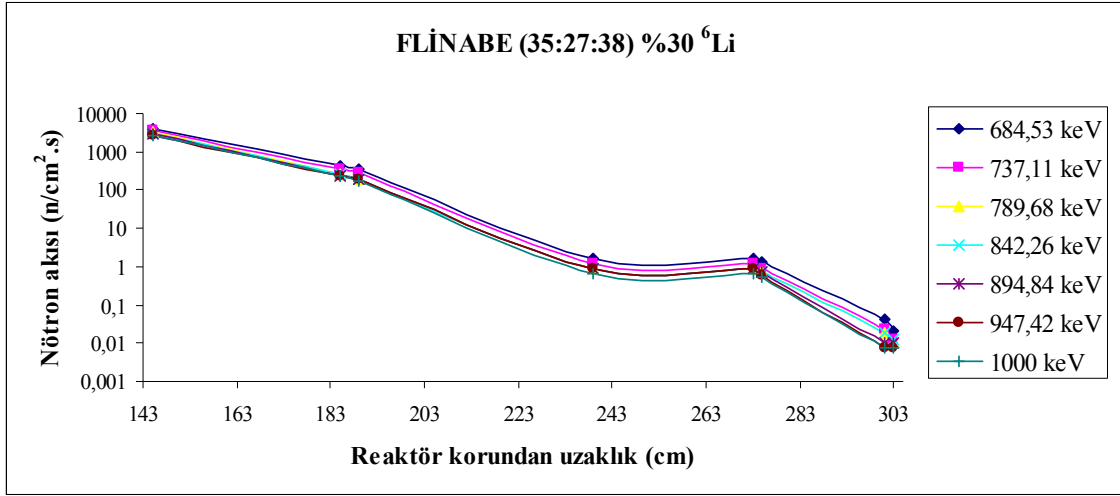
Şekil 5.1. Hesaplama da kullanılan APEX hibrit reaktörünün tek boyutlu ölçeklendirilmesi



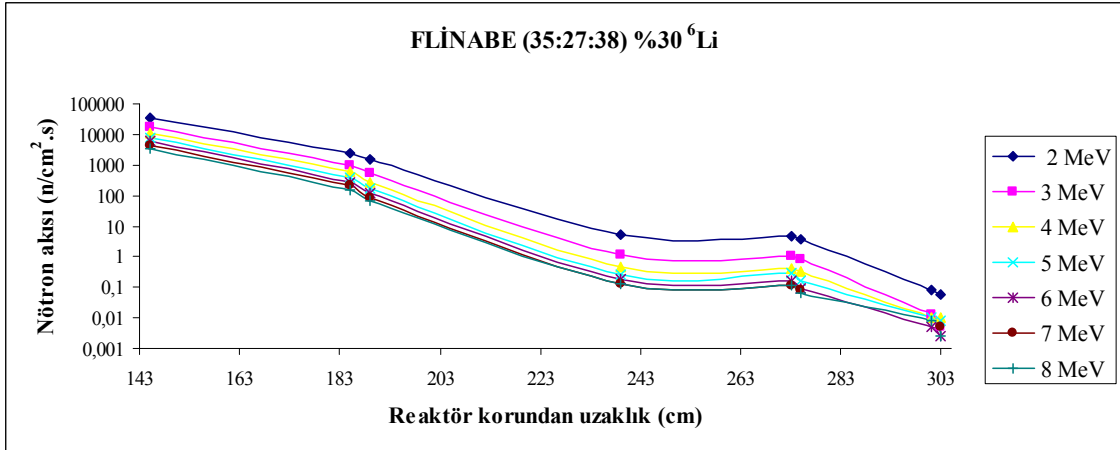
Şekil 5.2. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li blanket dizaynı için 0,001 keV - 263,89 keV enerjili nötronların akısı.



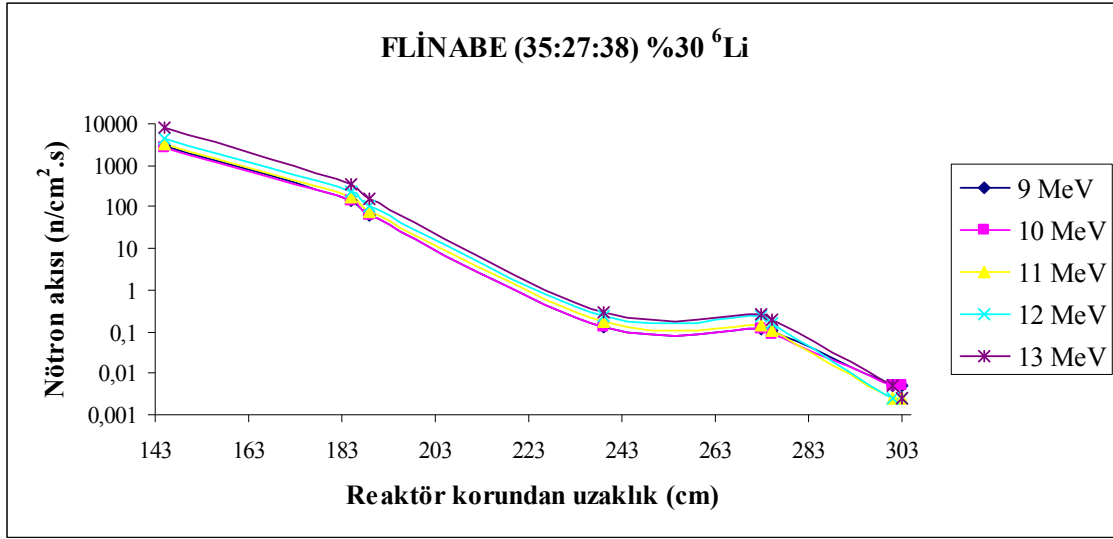
Şekil 5.3. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li blanket dizaynı için 316,47 keV - 631,95 keV enerjili nötronların akısı.



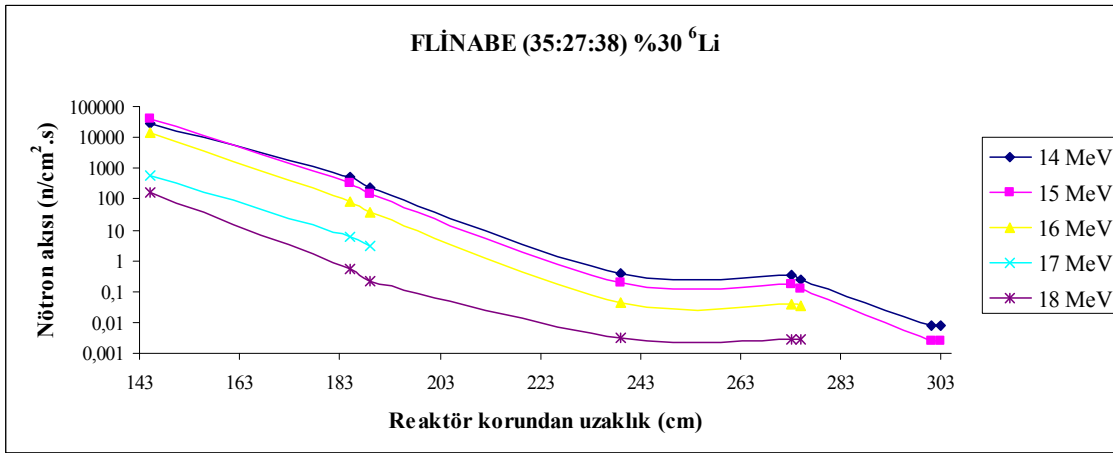
Şekil 5.4. APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li blanket dizaynı için 684,53 keV - 1000 keV enerjili nötronların akısı.



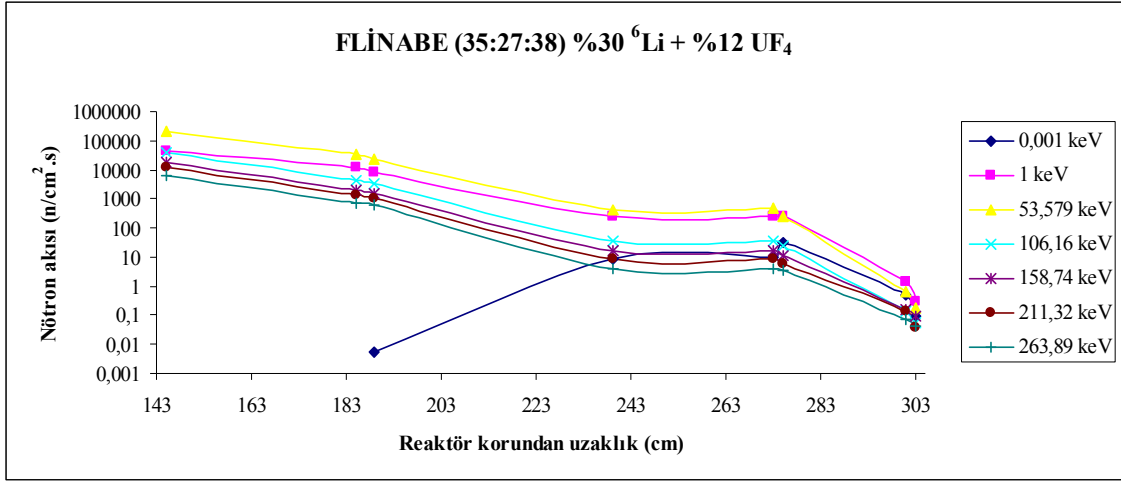
Şekil 5.5. APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı.



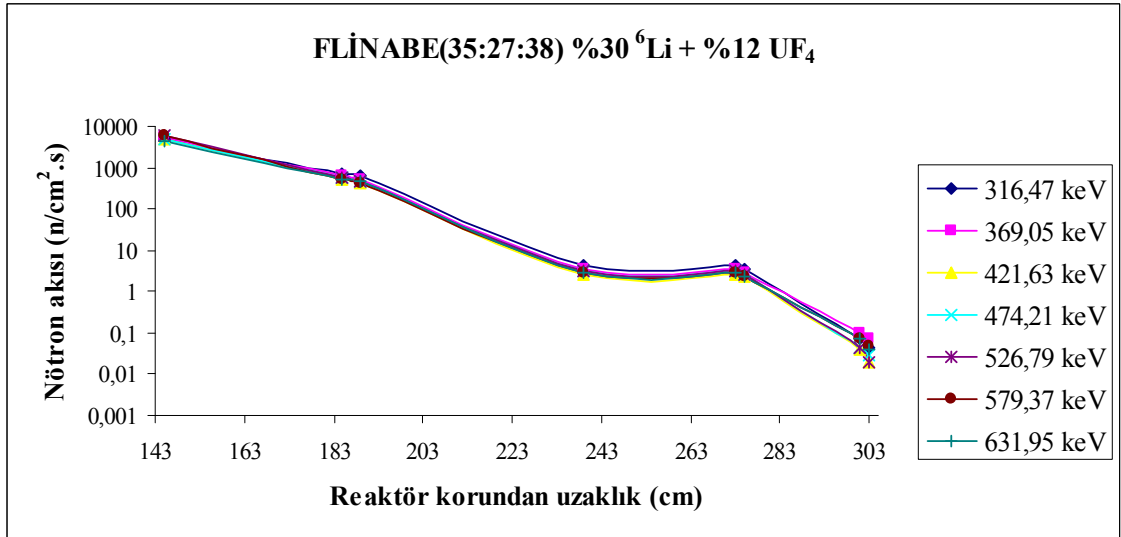
Şekil 5.6. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li blanket dizaynı için 9 MeV - 13 MeV enerjili nötronların akısı.



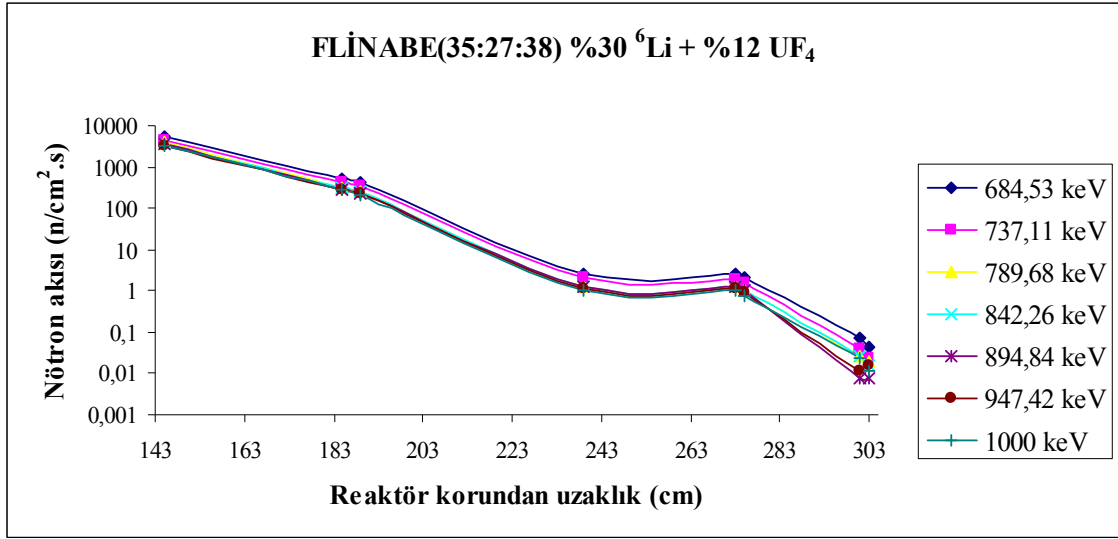
Şekil 5.7. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı.



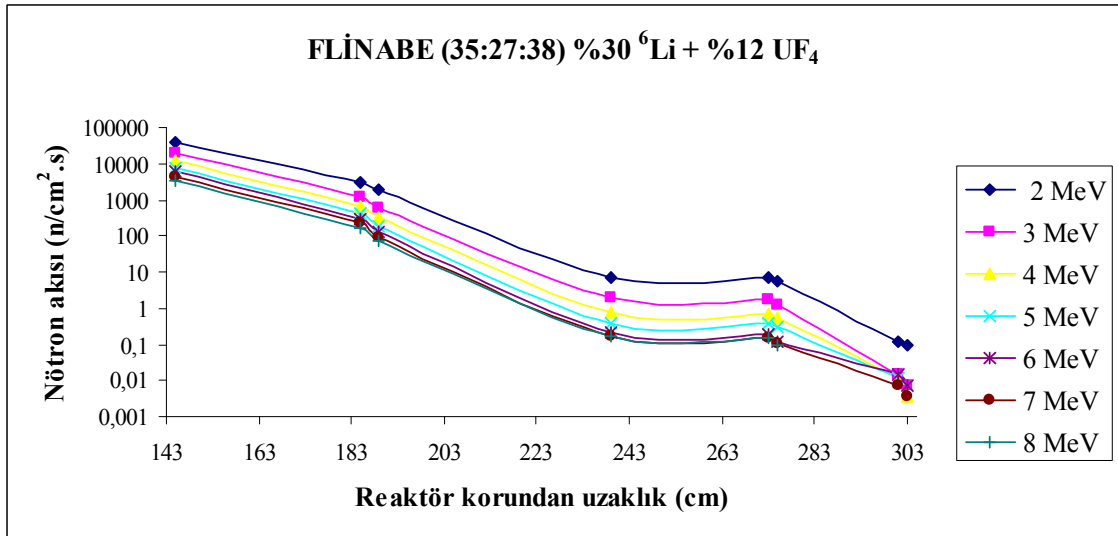
Şekil 5.8. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 UF₄ blanket dizaynı için 0,001 keV - 263,89 keV enerjili nötronların akısı.



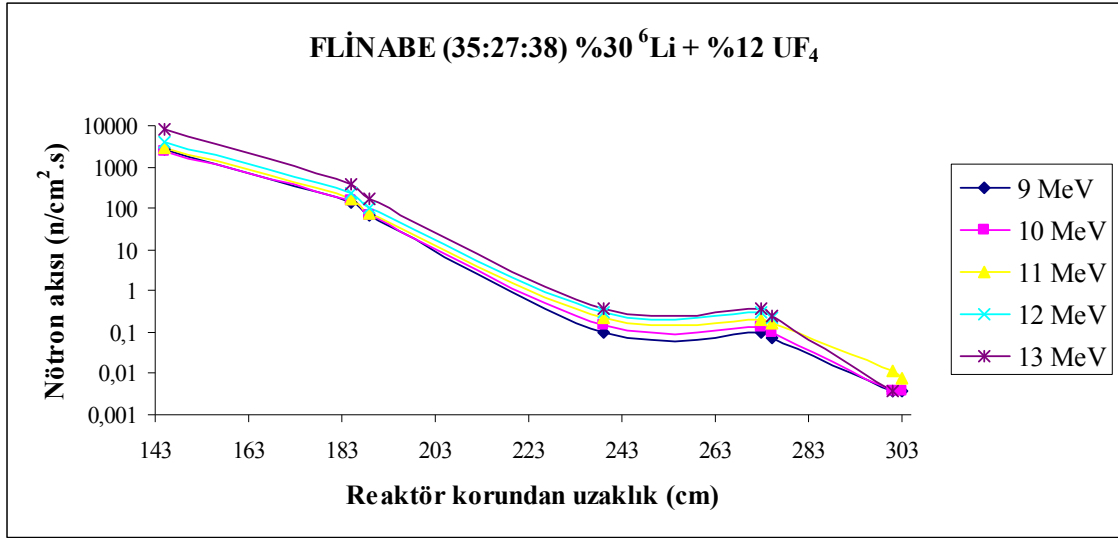
Şekil 5.9. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 UF₄ blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı.



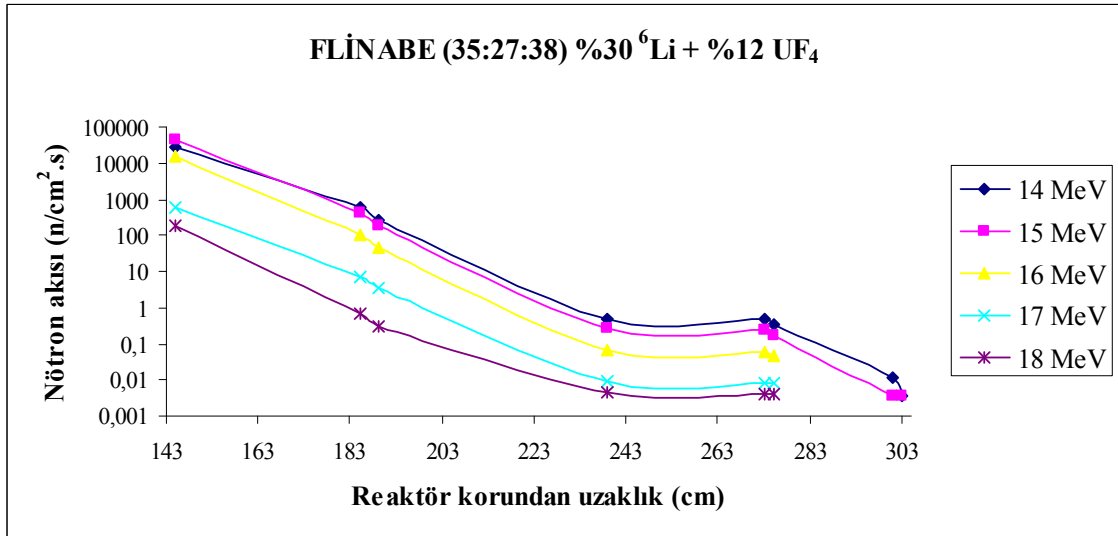
Şekil 5.10. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 UF₄ blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı.



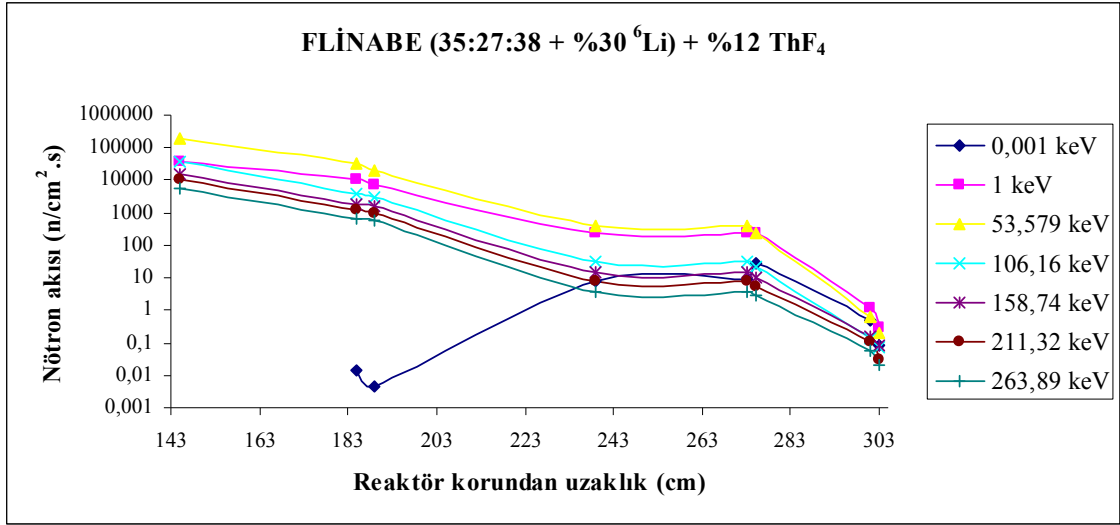
Şekil 5.11. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 UF₄ blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı.



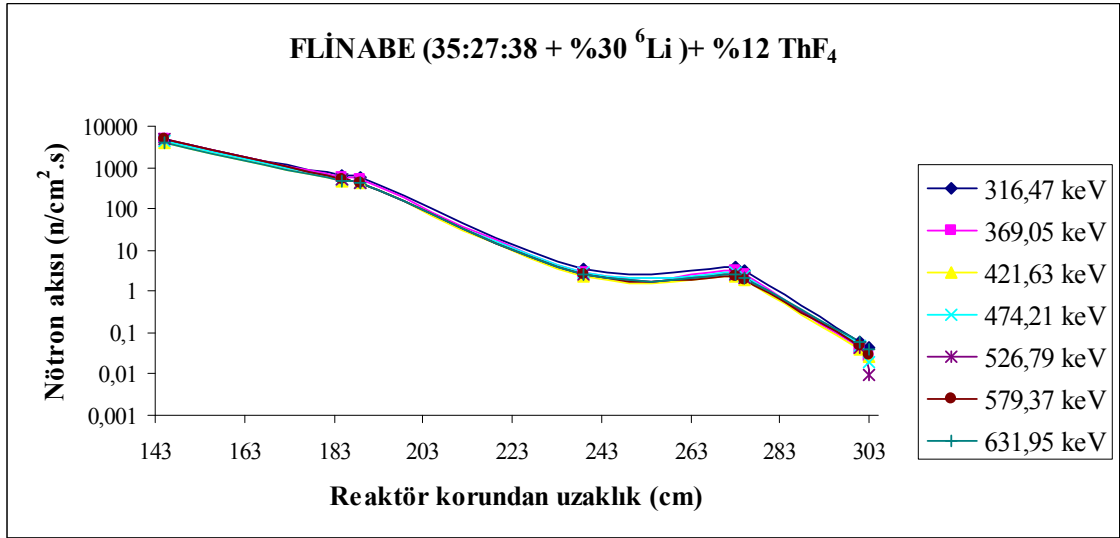
Şekil 5.12. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 UF₄ blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı.



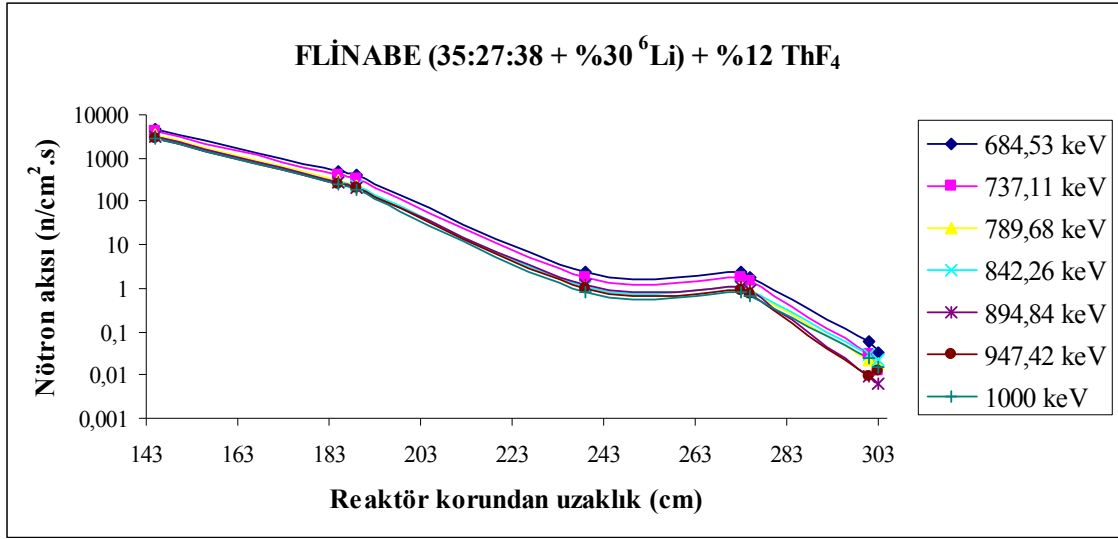
Şekil 5.13. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 UF₄ blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı.



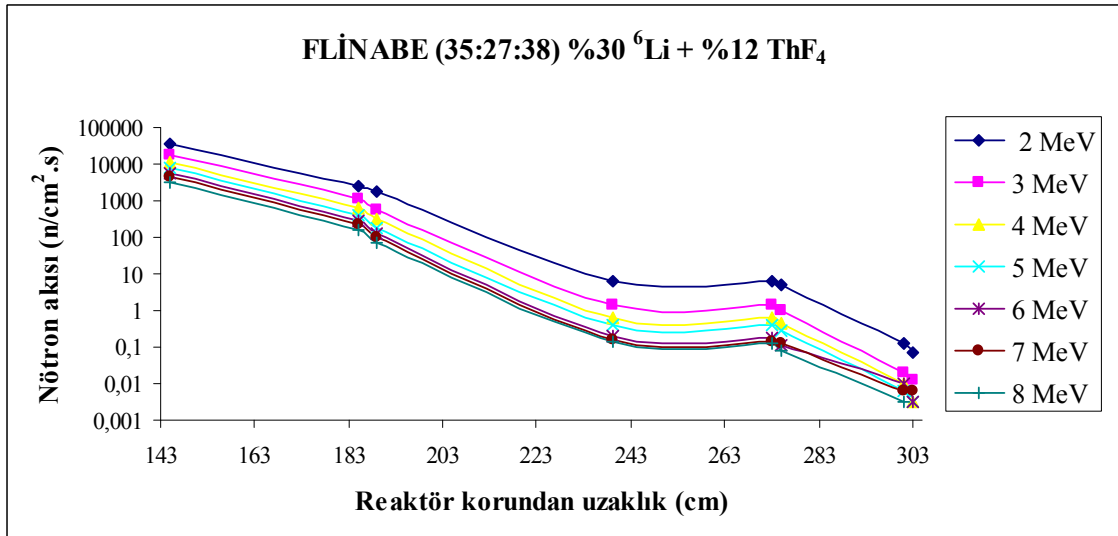
Şekil 5.14. APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 ThF₄ blanket dizaynı için 0,001 keV – 263,89 keV enerjili nötronların akısı.



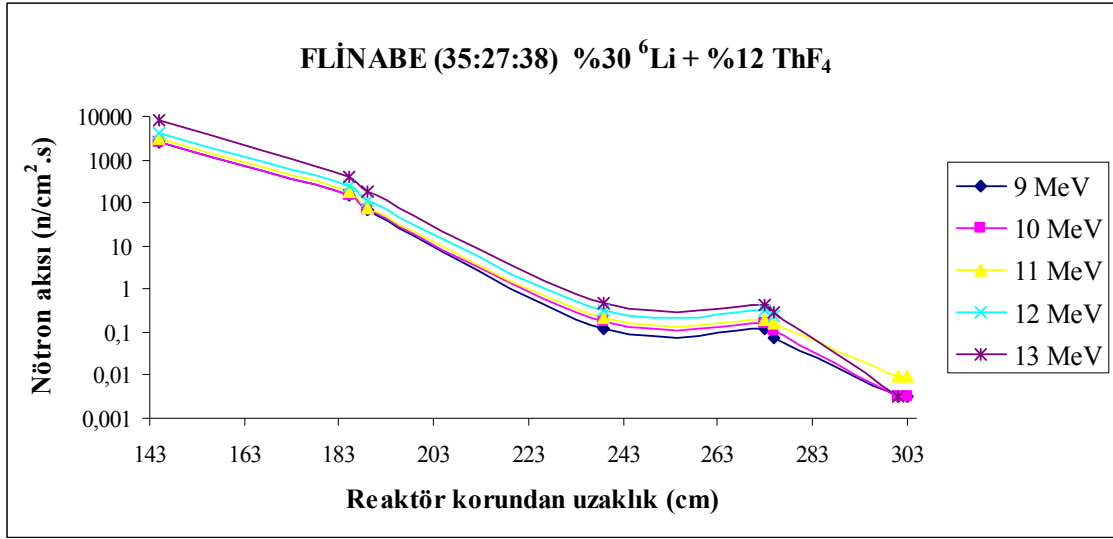
Şekil 5.15. APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 ThF₄ blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı.



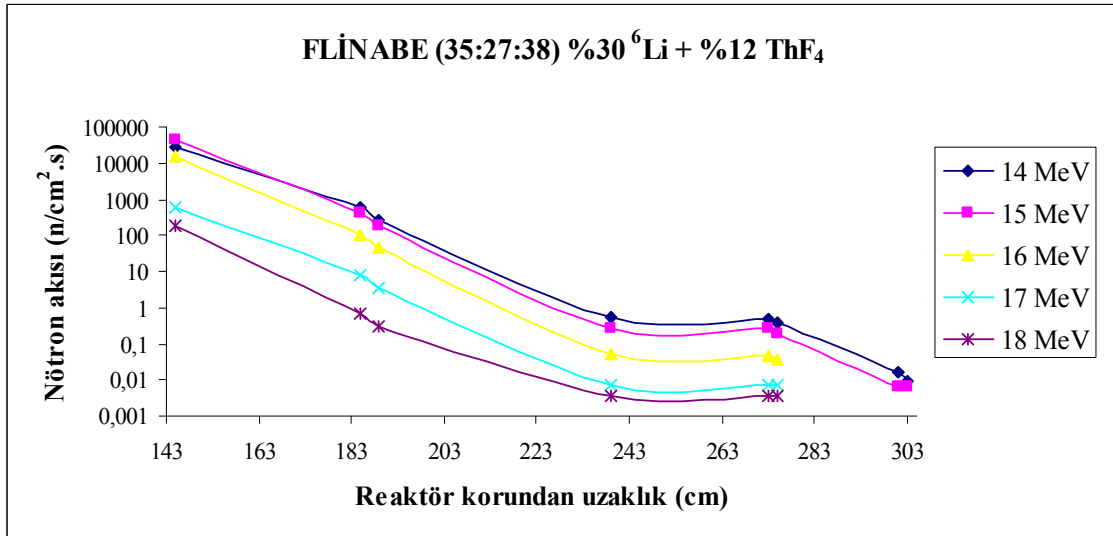
Şekil 5.16. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 ThF₄ blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı.



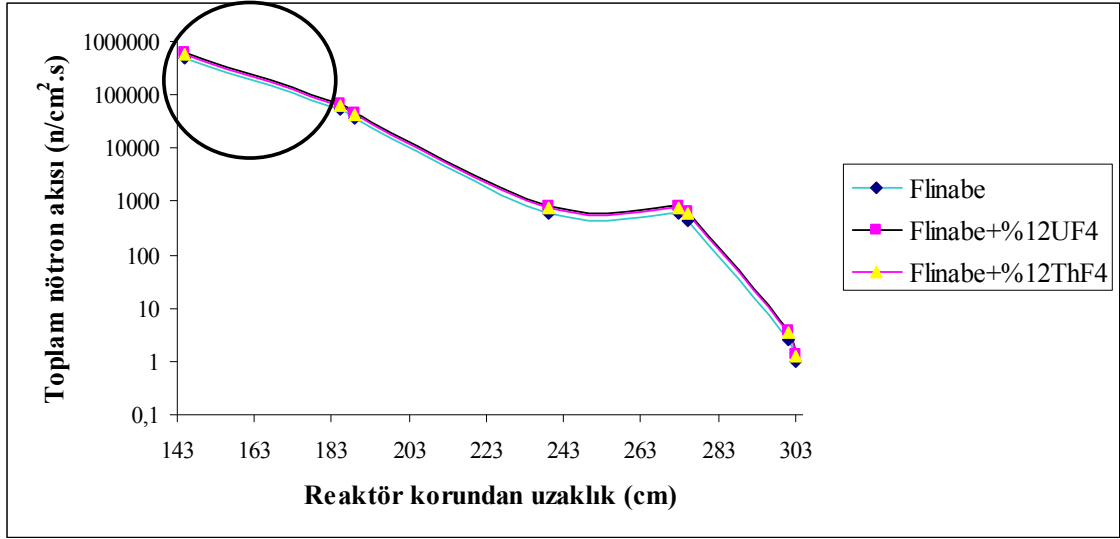
Şekil 5.17. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 ThF₄ blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı.



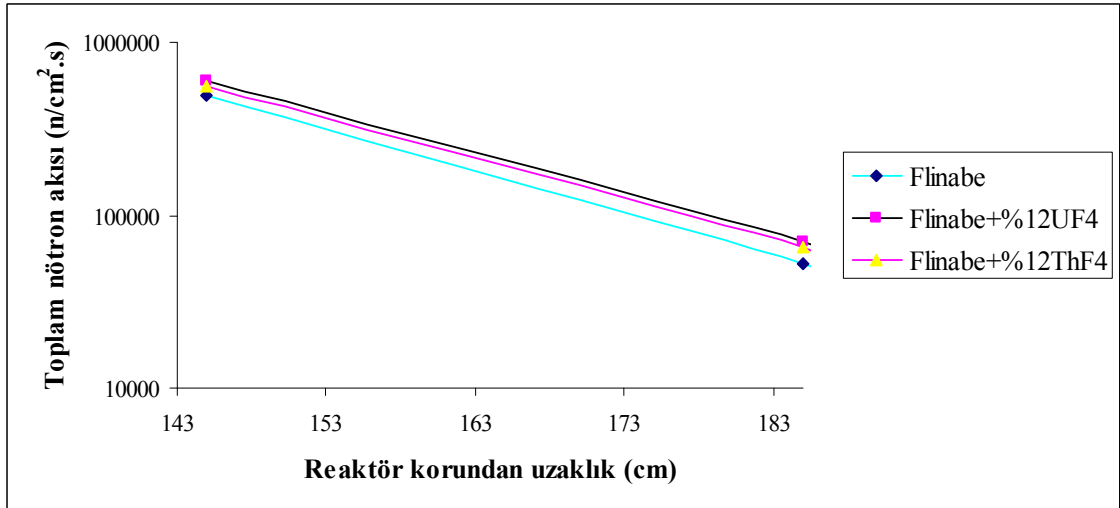
Şekil 5.18. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 ThF₄ blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı.



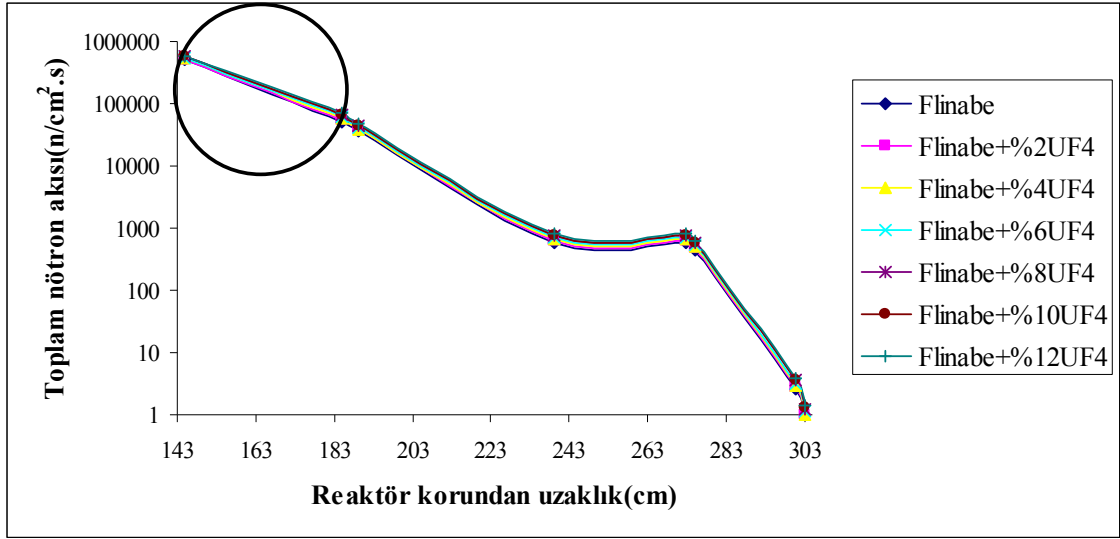
Şekil 5.19. APEX Hibrit Reaktöründe Flınabe (35:27:38) %30 ⁶Li + %12 ThF₄ blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı.



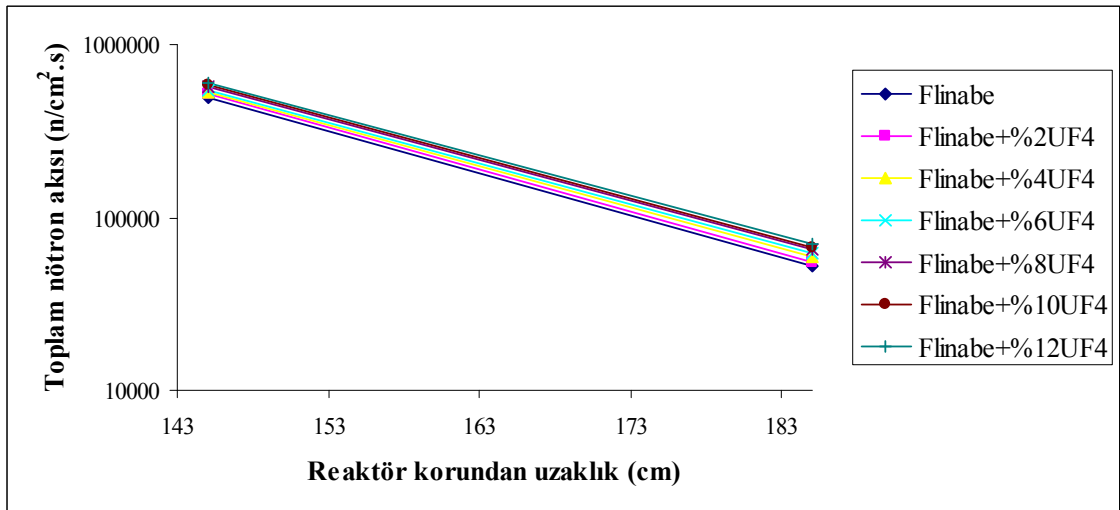
Şekil 5.20. APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı.



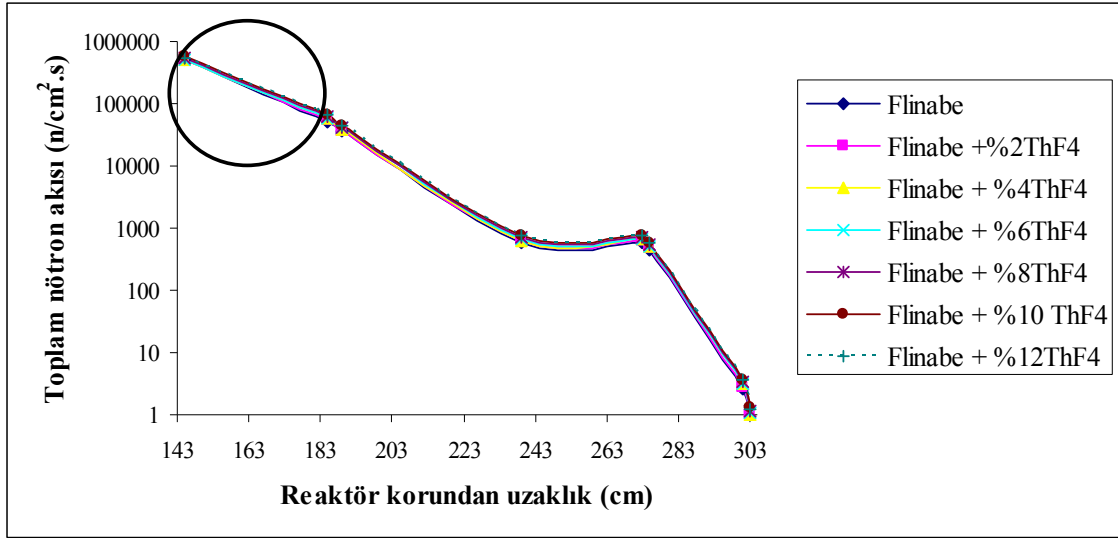
Şekil 5.21. APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesitinin ayrıntılı gösterimi.



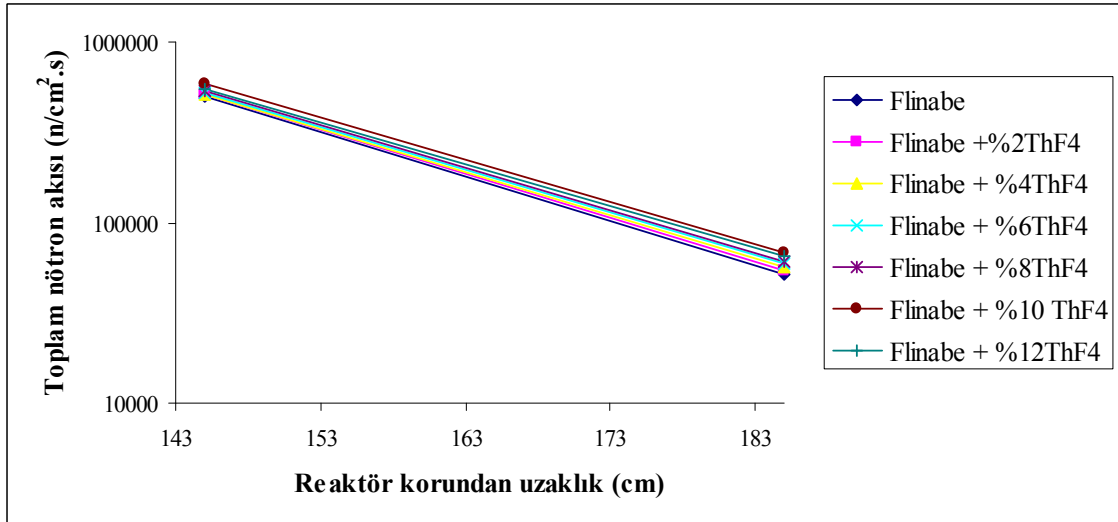
Şekil 5.22. APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı.



Şekil 5.23. APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesitinin ayrıntılı gösterimi.



Şekil 5.24. APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı.



Şekil 5.25. APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesitinin ayrıntılı gösterimi.

Şekil 5.2 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ blanket dizaynı için 0,001 keV - 263,89 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 53,58 keV lik nötronların akısı maksimum (163046,15 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 263,89 keV lik nötronların akısı ise minimum (14968,86 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır. Ayrıca 0,001 keV enerjili nötron akısı zırh bölgesinde (reaktör korundan uzaklık = 239 cm) oluşmuştur.

Şekil 5.3 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 526,79 keV lik nötronların akısı maksimum (4595,99 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 631,95 keV lik nötronların akısı ise minimum (3614,54 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.4 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 684,53 keV lik nötronların akısı maksimum (4124,45 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 1000 keV lik nötronların akısı ise minimum (2689,4 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.5 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 2 MeV lik nötronların akısı maksimum (34641,8 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 8 MeV lik nötronların akısı ise minimum (3436,6 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.6 da APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 13 MeV lik nötronların akısı maksimum (8299,87 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 10 MeV lik nötronların akısı ise minimum (2719,79 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.7 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 15 MeV lik nötronların akısı maksimum ($42328,7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 18 MeVlik nötronların akısı ise minimum ($171,423 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.8 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 UF_4 blanket dizaynı için 0,001 keV – 263,89 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 53,579 keV lik nötronların akısı maksimum ($217571,48 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 0,001 keV lik nötronların akısı ise minimum ($0 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca bu minimum enerjili nötronlar ilk çelik duvar bölgesinde oluşmaktadır.

Şekil 5.9 da APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 UF_4 blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı hesaplandı. Şekilde 526,79 keV lik nötronların akısı maksimum ($5798,47 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 631,95 keV lik nötronların akısı ise minimum ($4588,06 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.10 da APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 UF_4 blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 684,53 keV lik nötronların akısı maksimum ($5178,63 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 1000 keV lik nötronların akısı ise minimum ($3242,2 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.11 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 UF_4 blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 2 MeV lik nötronların akısı maksimum ($39448,3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 8 MeV lik nötronların akısı ise minimum ($3254,53 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve

blanket bölgesinde çok fazla değişmemesi son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.12 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 UF_4 blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 13 MeV lik nötronların akısı maksimum (8087,98 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 10 MeV lik nötronların akısı ise minimum (2500,61 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.13 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 UF_4 blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 15 MeV lik nötronların akısı maksimum (42799,2 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 18 MeV lik nötronların akısı ise minimum (174,62 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.14 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 0,001 keV – 263,89 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 53,579 keV lik nötronların akısı maksimum (198614,35 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 0,001 keV lik nötronların akısı ise minimum (0 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca 0,001 keV enerjili nötronlar sıvı blanket bölgesinde oluşmaktadır.

Şekil 5.15 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 316,47 keV – 631,95 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 526,79 keV lik nötronların akısı maksimum (5143,38 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 631,95 keV lik nötronların akısı ise minimum (4062,91 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5. 16 da APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 684,53 keV – 1000 keV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 684,53 keV lik nötronların akısı maksimum (4582,92 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 1000 keV lik nötronların akısı ise minimum (2857,50 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı.

Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.17 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 2 MeV – 8 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 2 MeV lik nötronların akısı maksimum (35203,6 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 8 MeV lik nötronların akısı minimum (3204,72 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.18 de APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 9 MeV – 13 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 13 MeV lik nötronların akısı maksimum (8113,9 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 10 MeV lik nötronların akısı ise minimum (2480,13 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.19 da APEX Hibrit Reaktöründe Flinabe (35:27:38) %30 ${}^6\text{Li}$ + %12 ThF_4 blanket dizaynı için 14 MeV – 18 MeV enerjili nötronların akısı gösterilmiştir. Şekilde 15 MeV lik nötronların akısı maksimum (42940,5 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), 18 MeV lik nötronların akısı ise minimum (174,442 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.20 de APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı gösterilmiştir. Şekilde Flinabe + %12 UF_4 blanketi için toplam nötron akısı maksimum (598838,54 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), Flinabe için minimum (497201,05 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.21 de APEX Hibrit reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesiti gösterilmiştir.

Şekil 5.22 de APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı gösterilmiştir. Şekilde Flinabe + %12 UF_4 blanketi için toplam nötron akısı maksimum (598838,54 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$), Flinabe için minimum (497201,05 $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$) olarak

hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.23 de APEX Hibrit reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesiti gösterilmiştir.

Şekil 5.24 de APEX Hibrit Reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısı gösterilmiştir. Şekilde Flinabe + %10 ThF₄ blanketi için toplam nötron akısı maksimum (581441,93 n/cm².s), Flinabe için minimum (497201,05 n/cm².s) olarak hesaplandı. Nötron akısı blanket bölgesinde çok fazla değişmemesine rağmen zırh bölgesinde hızla azalmakta ve son çelik bölgede ise sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 5.25 de APEX Hibrit reaktöründe çeşitli hibrit blanketler için toplam nötron akısının belli bir kesiti gösterilmiştir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Nötron akısının 2. ve 3. bölgeyi geçtikten sonra %50 civarında azaldığı, 9. bölgede ise yaklaşık sıfır olduğu gözlenmiştir. Saf flinabe blanketi ile %12 U ve %12 Th katkılı blanketlerde nötron akısının çok az değişmesi hibrit blanketin füzyon reaktörlerinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Hibrit blanket konseptinde nötron akısının çok az değişmesine rağmen enerji üretiminin arttığı önceki çalışmalarda (Arasoğlu, 2004) yapılmıştır ve kullanılabilir olduğunu ise bu çalışmada gözlemledik. Ölçülen akı değerlerinin sonucunda meydana gelebilecek radyoizotoplar önceki bölümde çizelgeler halinde verilmiştir (Bkz. Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5). Reaktörlerin bakım ve onarımına başlamadan önce bu radyoizotopların yarı ömürleri göz önüne alınarak işlem yapılması gerekmektedir.

Son çelik bölgede (SS316) nötron akısı çok küçük ve enerjisi düşük olduğu için bu bölgede meydana gelebilecek reaksiyon sayısı ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum ise çalışanların güvenliği açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- Abdou, M. A., The APEX Team, 1999. Exploring novel high power density concepts for attractive fusion systems. *Fusion Engineering and Design*, **45**: 145-167.
- Abdou ,M. Z., The APEX Team, Ying, A., Morley, N., Gulec, K., Smolentsev, S., Kotshchenreuther, M., Malang, S., Zinkle, S., Rognlén, T., Fogarty, P., Nelson, B., Nygren, R., McCarthy, K., Youssef, M. Z., Ghoniem, N., Sze, D., Wong, C., Sawan, M., Khater, H., Woolley, R., Mattas, R., Moir, R., Sharafat, S., Brooks, J., Hasanein, A., Petti, D., Tillack, M., Ulrickson, M., Uchimoto, T., 2001. On the exploration of innovative concepts for fusion chamber technology. *Fusion Engineering and Design*, **54**: 181-247.
- Arya, A. P., 1983. Atom Çekirdeği, Bölüm 1. *Çekirdek Fizikinin Esasları* (Editör: Şahin, Y.). Erzurum. 370.
- Arasoğlu, A., 2004. *Flinabe Blanketli Apex Füzyon Reaktöründe Nötronik Hesaplar* (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Altın, V., 2004. Nükleer Enerji. *Bilim Teknik Dergisi (ek)*. 1-23.
- Anonim, 2009. TAEK'in nükleer yakıt konusunda dışa bağımlı olup olmayacağımız, yerli kaynaklarımız ve nükleer enerjinin dünyadaki durumu hakkındaki tespitleri. <http://www.taek.gov.tr/bilgi/sss/disabgimlimi.html>. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara. Erişim tarihi: 24.08.2009.
- Aydın, A., Tel, E., Kaplan, A., 2008. Calculation of 14-15 MeV (n,d) reaction cross sections using newly evaluated empirical and semi-empirical systematics. *J. Fusion Energy*, **27**: 308-313.
- Aytan, Ö.,2009. Nükleer Teknoloji. <http://tr-2.aytan.net/sunum.html> . Erişim tarihi: 24.08.2009.
- Baltacıoğlu, N., 1997. *Fisyon reaktörlerinde kullanılmış yakıt çubuklarının füzyon-fisyon hibrit reaktörlerinde yeniden kullanılabilir hale dönüştürülmesi*. (Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Akpınar, A., Kömürcü, M. İ., Filiz, H. M., 2008. Türkiye'nin enerji kaynakları ve çevre, sürdürülebilir kalkınma ve temiz enerji. *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. 17-19 Aralık, İstanbul.

- Tel, E., Aydın, A., Kaplan, A., Şarer, B., 2008. Investigation of 14-15 MeV (n,t) reaction cross-sections by using new evaluation empirical and semi-empirical systematic formulas. *J. Fusion Energy*, **27**: 188-194.
- Fang, K., Xu S., Lan, C., Xu, X., Kong, X., Liu, R., Jiang, L., 2007. Cross-section measurement for the reactions producing short-lived nuclei by neutrons around 14 MeV. *Journal of Accounting and Economics*. PII: S0969-8043(07)00334-X
- Gulec, K., Abdou, M. A., Moir, R. W., Morley, N. B., Ying, A., 2000. Novel liquid blanket configurations and their hydrodynamic analyses for innovative confinement concepts. *Fusion Engineering and Design*, **59–60**, 567–576.
- Gibson, W. M., 1980. *The Physics of Nuclear Reactions*. University of Bristol, England. 335.
- Hançerlioğulları, A., 2006. Monte carlo simülasyon metodu ve MCNP kod sistemi. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, **14(2)**: 545-556.
- Hore-Lacy, I., 2006. Energy Use, Chapter 1. *Nuclear Energy in the 21 st Century*. Academic Press, London. 167.
- Kaplan, A., Tel, E., Aydın, A., 2009. The equilibrium and pre-equilibrium neutron-emission spectra of some structural fusion materials for (n,xn) reactions up to 16 MeV energy. *J. Fusion Energy*, **72**: 903-910.
- Karadeniz, H., Çetiner, M. A., Yücel, H., Arıkan, P., Sultansoy, S., 2001. Hızlandırıcı Güdümlü Reaktörler/Enerji Yükseltici. *I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi*. 25-26 Ekim, TAEK, Ankara.
- Krane, K. S., 2001. Temel Nükleer Yapı, Bölüm 1. *Nükleer Fizik* (Editör: Şarer B.). 1. cilt, Palme Yayıncılık, Ankara. 404.
- Krane, K. S., 2002. *Nükleer Fizik* (Editör: Şarer B.). 2. cilt, Palme Yayıncılık, Ankara. 839.
- Nygren, R. E., Sze, D. K., Eberle, C., Fogarty, P. J., Rognlien, T. D., Rensink, M. E., Smolentsev, S. S., Yousef, M. Z., Sawan, M. E., Merrill, B. J., Majeski, R., 2003. ARIES/CLIFF molten salt chamber design. *Sandia National Laboratories* 1-25.
- Meriç, N., 1990. *Nötron Aktivasyon Enerjisi ile Madde Tayini* (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Rinard, P., 2004. Neutron Interactions with Matter. Los Alamos Technical Report <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00326407.pdf>.
Erişim tarihi:24.08.2009.
- Sözen, A., şahin, H. M., Übeyli M., 2001. Nükleer yakıt üretimi ve nükleer yakıt dönüşümünde hızlandırıcı kaynaklı sistemle füzyon-fisyon (hibrit) sistemlerin karşılaştırılması. *I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi*. 25-26 Ekim, TAEK, Ankara.
- şarer, B., Hançerlioğulları, A., Übeyli, M., 2003. Füzyon teknolojisinde sıvı ilk duvar yaklaşımı: APEX. *8. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Kongresi*. Kayseri.
- şarer, B., Hançerlioğulları, A., şavruk, N., 2005. Apex füzyon reaktör modelinin monte carlo yöntemi kullanarak tasarlanması. *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **18(1)**: 201-210.
- Yaramış, B., 1974. *Neutron Fiziği*. İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi Basımevi, Yay. No: 124, İstanbul. 165.
- Yapıcı, H., Çürüttü, İ., 1997. *Nükleer Enerji*. Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kayseri. 176.
- Yousef, M. Z., Abdou, M. A., 2000. Heat deposition and tritium breeding characteristics in thick liquid wall blanket concept. *Fusion Engineering and Design*, **49-50**: 719-725.

ÖZ GEÇMİŞ

1981 yılında Van'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Van'da tamamladı. 2000 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliğini kazandı. 2005 yılında bölümü dereceyle bitirdikten sonra 2006 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Bu süre zarfında özel bir kurumda 2 yıl fizik öğretmeni olarak çalıştı.